



Universidad Tecnológica Centroamericana

Facultad de Ingeniería Mecatrónica

Proyecto de Investigación

Diseño de modelo matemático mediante el algoritmo Denavit-Hartenberg para un robot de 7-GdL en la industria.

Previo a la obtención del título:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

21541328 Roger Mauricio Midence Saucedá.

Asesor: Ing. José Luis Ordoñez

San Pedro Sula, Cortés

Abril 2021

Derechos de Autor

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada:

Primeramente, a Dios quien me ha dado la oportunidad de vivir e interponerme al día a día de las adversidades durante este largo camino, por darme fuerzas y esperanzas de levantarme y seguir adelante encarando los problemas que se presentaban sin caer en el intento.

A mis padres Roger Midence Hernández & Doris Patricia Saucedo Funes por haberme forjado como persona y ser los promotores de mis sueños y ambiciones, gracias a ellos por cada día creer en mis expectativas y objetivos dándome su apoyo incondicional en las tareas difíciles de la vida, amor y comprensión. A mis hermanas Cinthia Midence & Andrea Midence por alentarme a seguir y no parar, a mi pareja Gina Pineda por ser el apoyo en los momentos difíciles de todo este trayecto.

Se la dedico a mis compañeros que me permitieron entrar en sus vidas a lo largo de estos 4 años conviviendo en los diferentes salones de clases.

Agradecimiento

Este trabajo debe ser reconocido como una labor conjunta, agradeciendo primeramente a Dios por permitirme levantarme cada día y afrontar las adversidades que se encuentran en el camino, darle gracias por permitirme tener y disfrutar de la familia que el escogió para mí.

Quiero agradecerle a mi padre Roger Midence que desde muy pequeño me enseñó a no rendirse a pesar de los problemas que se presenten a lo largo de nuestras vidas, me enseñó que siempre hay una salida para las adversidades, solo es de buscar la manera de salir victoriosos de ella. Cada día me recalca su mentalidad visionaria y positiva de resolver los obstáculos haciendo énfasis en que todo esfuerzo tiene su recompensa. Gracias por apoyarme en un ciento diez por ciento moral y económicamente para poder realizar y sobresalir en mis sueños y objetivos. Quiero agradecerle a mi madre Doris Saucedo por estar siempre a mi lado, por darme el aliento que necesito para continuar y no rendirme en el intento, por apoyarme incondicionalmente en mis ideas y objetivos de vida, darle gracias por haberme inculcado el respeto, humildad, esfuerzo, perseverancia, tolerancia, honestidad, generosidad que la caracterizan como persona. Le doy gracias a ambos por ser los pilares de esta edificación que hoy está dando frutos, gracias por las noches de desvelo, horas de trabajo, olvidarse de ellos mismos solo para dar a mis hermanas y a mí una educación de calidad y una vida sin complicaciones en un país que los problemas son el pan diario. Realizaría otras 157 páginas solo de agradecimiento hacia mis padres, pero me resulta más significativo los hechos, que las palabras. Gracias, muchas gracias papá y mamá.

Quiero agradecerle a mi hermana Cinthia Midence, por ser un modelo a seguir, ser mi orgullo, por demostrarme que hay que empezar para ver resultados, por demostrarme que tengo un cómplice en quien confiar para futuros proyectos. Quiero agradecerle a mi hermana Andrea Midence por demostrarme objetividad en la vida, por mostrarme que vida, solo hay una. Quiero agradecerle a mi pareja Gina Pineda por enseñarme que todo es posible siempre y cuando se propone, enseñarme que la vida sigue, aunque te dé un golpe bajo. Quiero agradecer a cada uno de mis maestros de colegio y catedráticos de UNITEC por transmitir la sabiduría y conocimientos, haciendo una mención especial al

ingeniero José Luis Ordoñez, quien me retó para poder superarme, demostrándome que soy capaz de lograr lo que me proponga siempre y cuando haya dedicación y esfuerzo. Quiero agradecer a mis amigos, el famoso grupo "Proyecto Circuitos", por haber compartido esta travesía, por haber hecho momentos difíciles en amenos y fácil de digerirlos, gracias por esas experiencias y decirles que me llevo una enseñanza de cada uno.

Gracias a cada uno, gracias, muchas gracias.

Epígrafe

"Todos los triunfos nacen cuando nos atrevemos a comenzar."

-Eugene Fitch

Resumen Ejecutivo

Actualmente los manipuladores seriales son el auge en la industria, la mayoría de empresas buscan soluciones que mejoren los procesos de producción y que sean humano-colaborativos, buscan simular las aptitudes que el ser humano realiza. Hoy en día es constante el cuestionamiento de comparación entre un robot redundante de 7-GDL y uno que cumple con las articulaciones necesarias para realizar trabajos complejos útiles en la industria como lo es el de 6 grados de libertad. En este artículo se diseñará un modelo matemático que describa la cinemática directa del manipulador de 7 grados de libertad usando la famosa convención D-H y determinar si la cadena cinemática de los manipuladores interfiere en el desempeño de su trabajo y así llegar a una comparación con su predecesor de 6 grados de libertad en la industria mediante una simulación en CoppeliaSim (Vrep).

Las simulaciones se realizaron a base de un punto validado por el modelo matemático con el software de Matlab donde es asequible al manipulador de 7-GdL, con el objetivo de comparar la agilidad articular del manipulador redundante con un brazo robótico de 6-GdL. Al mismo tiempo se realizaron pruebas de rapidez en escenarios iguales en el software de CoppeliaSim, mejor conocido como Vrep.

Palabras clave— robótica, 7 Grados de Libertad, Denavit Hartenberg, industria, 6 Grados de libertad, modelo matemático.

Abstract

Currently, serial manipulators are the boom in the industry. Most companies are looking for solutions that improve production processes and that are human-collaborative. They seek to simulate the skills that humans perform. Nowadays there is a constant question of comparison between a redundant robot of 7 DOF and one that meets the necessary joints to perform complex jobs useful in the industry as is the 6 degrees of freedom. In this paper we will design a mathematical model that describes the forwards kinematics of the 7 degrees of freedom manipulator using the famous D-H convention and determine if the kinematic chain of the manipulators interferes in the performance of their work and thus reach a comparison with its predecessor of 6 degrees of freedom in the industry by means of a simulation in CoppeliaSim (Vrep).

The simulations were performed based on a point validated by the mathematical model with Matlab software where it is reachable to the 7-DOF manipulator, with the objective of comparing the joint agility of the redundant manipulator with a 6 D robotic arm. At the same time, speed tests were performed in equal scenarios in CoppeliaSim software, better known as Vrep.

Keywords— robotics, 7 DOF, Denavit Hartenberg, industry, 6 DOF, mathematical model.

Índice de Contenido

I.	Índice de Ilustraciones.....	XV
II.	Índice de Tablas	XIX
III.	Índice de Ecuaciones	XXI
IV.	Índice de Gráficas.....	XXII
I.	Introducción	1
II.	Planteamiento Del Problema	3
2.1	Precedentes Del Problema	3
2.1.1	Historia de Los Modelos Matemáticos en la Robótica.....	4
2.1.1	Historia de la Robótica.....	5
2.2	Definición del Problema	6
2.3	Justificación	7
2.4	Preguntas de investigación	7
2.5	Objetivos.....	8
2.5.1	Objetivo General.....	8
2.5.2	Objetivos Específicos	8
III.	Marco Teórico	9
3.1	Conceptos Básicos	9
3.1.1	Movimiento de cuerpos rígidos	10
3.1.2	Teoría de Rotación de Euler	13
3.2	Modelos Matemáticos.....	16
3.2.1	Modelos Matemáticos en la Robótica	17
3.2.2	Modelos Matemáticos en otros Campos.....	20
3.3	Automatización	22
3.3.1	Automatización en la industria	23

3.3.2	Automatización en la educación	25
3.3.3	Influencia de la cultura en la automatización.....	26
3.4	Robótica.....	27
3.4.1	Robótica en la Educación.....	28
3.4.2	Robótica en la industria.....	29
3.4.3	Robótica en la Medicina.....	29
3.4.4	Tipos de brazos robóticos	30
3.4.5	Propiedades de los robots.....	31
3.5	Convenio Denavit-Hartenberg	33
3.5.1	Cinemática	34
3.5.2	Parámetros D-H para Manipuladores seriales	35
3.5.3	Solución analítica de la cinemática inversa con D-H.....	40
3.5.4	Comparación de la convención D-H con la teoría del tornillo	49
IV.	Metodología	51
4.1	Enfoque.....	51
4.2	Variables de investigación	51
4.3	Técnicas e instrumentación aplicados.....	52
4.4	Metodología de estudio	52
4.4.1	Iteración I. Diseño del diagrama Cinemático.....	53
4.4.2	Iteración II. Implementación del algoritmo D-H	54
4.4.3	Iteración III. Resolución Matrices.	55
4.4.4	Iteración IV. Simulaciones	56
4.5	Metodología de validación.....	57
4.6	Cronograma de Actividades.....	57
V.	Análisis y Resultados.....	59

5.1	Análisis de teoría de sustento	59
5.2	Resultados.....	60
5.2.1	Iteración I. Diseño del diagrama Cinemático.....	60
5.2.2	Iteración II. Implementación del algoritmo D-H	63
5.2.3	Iteración III. Resolución Matrices.	73
5.2.4	Iteración IV. Simulaciones	78
5.3	Pruebas y Validación del Prototipo	79
5.4	Discusión	117
VI.	Conclusiones.....	120
VII.	Bibliografía	122
VIII.	Anexos.....	129
8.1	Anexos 1. Programación Matlab	129
8.1.1	Modelo Matemático Cinemática Directa KUKA LBR iiwa 7 R800.....	129
8.1.2	Plot del Modelo Matemático.....	130
8.2	Anexos 2. Programación CoppeliaSim	132
8.2.1	Programación KUKA LBR iiwa 7 R800.....	132
8.2.2	Programación ABB IRB1200 5-90 & Omron Viper 650.....	133
8.3	Anexos 3. Tablas de Velocidades Porcentuales	134

I. Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Marco de coordenadas relativas.....	11
Ilustración 2 Marco de coordenadas relativas 2	12
Ilustración 3 Múltiples marcos de coordenadas tridimensionales.....	13
Ilustración 4 Dos marcos de coordenadas tridimensionales	14
Ilustración 5 Rotación del marco de coordenadas	15
Ilustración 6 Explicación de la rotación no conmutativa	15
Ilustración 7 Simulación de modelo matemático de interacción Humano-Robot.....	20
Ilustración 8 Manipulador serial de 6-GDL	36
Ilustración 9 Definición de los parámetros del estándar D-H	39
Ilustración 10 Convención D-H para los eslabones intermedios sucesivos y las articulaciones	39
Ilustración 11 Modelo Matemático Chen.....	46
Ilustración 12 Solución a la cinemática inversa 7-GDL.....	48
Ilustración 13 Variables de Investigación.....	51
Ilustración 14 Cronograma de actividades	58
Ilustración 15 Hoja de datos Kuka LBR iiwa 7 R800	61
Ilustración 16 Diagrama Cinemático	62
Ilustración 17 Diagrama Cinemático Paso 2.....	65
Ilustración 18 Diagrama Cinemático Paso 3.....	66
Ilustración 19 Diagrama Cinemático Paso 4 Caso 1	66
Ilustración 20 Diagrama Cinemático Paso 4 Caso 2	67
Ilustración 21 Diagrama Cinemático Paso 4 Caso 3.....	67
Ilustración 22 Diagrama Cinemático Paso 4.....	68
Ilustración 23 Diagrama Cinemático Paso 5.....	69

Ilustración 24 Diagrama Cinemático Paso 6.....	70
Ilustración 25 Diagrama Cinemático Paso 7.....	70
Ilustración 26 Diagrama Cinemático Paso 8.....	71
Ilustración 27 Matrices de transformación	75
Ilustración 28 Diagrama de Articulaciones en casa	80
Ilustración 29 Diagrama de Articulaciones con movimiento en la segunda articulación.	80
Ilustración 30 Diagrama de Articulaciones con movimiento en la segunda y tercera articulación.....	81
Ilustración 31 Validación Modelo Matemático	82
Ilustración 32 Vista Normal Validación Modelo Matemático 1	83
Ilustración 33 Vista Aumentada Validación Modelo Matemático 1	84
Ilustración 34 Vista Aumentada Validación Modelo Matemático 2	85
Ilustración 35 Vista Normal Validación Modelo Matemático 2	85
Ilustración 36 Vista Aumentada Validación Modelo Matemático 3	86
Ilustración 37 Vista Normal Validación Modelo Matemático 3	86
Ilustración 38 Robot 6-GDL ABB IBR1200 5-90.....	87
Ilustración 39 Robot 7-GDL KuKa LBR iiwa 7 800.....	88
Ilustración 40 Proceso Industrial KuKa	88
Ilustración 41 Proceso Industrial ABB	89
Ilustración 42 Simulación ABB	90
Ilustración 43 Simulación KUKA	90
Ilustración 44 Simulación KUKA, vista superior.....	91
Ilustración 45 Simulación KUKA, vista frontal	91
Ilustración 46 Simulación KUKA, vista lateral derecha.....	92

Ilustración 47 Simulación KUKA, vista lateral izquierda	92
Ilustración 48 Analogía humana parecida.....	93
Ilustración 49 Analogía humana parecida.....	93
Ilustración 50 Analogía humana parecida.....	94
Ilustración 51 Distancia Recorrida.....	95
Ilustración 52 Gráficas m/s KuKa	96
Ilustración 53 Gráficas m/s ABB	97
Ilustración 54 Pruebas de Productividad Misma Velocidad	98
Ilustración 55 Cambio de Orientación releasePos KUKA.....	99
Ilustración 56 Cambio de Orientación releasePos ABB.....	99
Ilustración 57 Velocidad Nominal del 100%	100
Ilustración 58 Velocidad Nominal del 25%.....	102
Ilustración 59 Velocidad Nominal del 45%.....	103
Ilustración 60 Velocidad Nominal del 65%.....	104
Ilustración 61 Velocidad Nominal Máxima	106
Ilustración 62 Gráficas De Productividad m/s.....	106
Ilustración 63 Falla Kuka.....	107
Ilustración 64 Posición Casa	109
Ilustración 65 Primer Objetivo LBR4.....	109
Ilustración 66 Segundo Objetivo LBR4.....	110
Ilustración 67 Tercer Objetivo LBR4.....	110
Ilustración 68 Cuarto Objetivo LBR4	111
Ilustración 69 Espacio de Trabajo Viper 650	112
Ilustración 70 Productividad Velocidades Iguales.....	113
Ilustración 71 Velocidades a un 25% Viper & ABB	114

Ilustración 72 Velocidades a un 45% Viper & ABB	115
Ilustración 73 Velocidades a un 65% Viper & ABB	116

II. Índice de Tablas

Tabla 1 Resumen de los parámetros de la convención D-H.....	38
Tabla 2 Parámetros D-H Robot de 6 grados de Libertad.....	42
Tabla 3 Parámetros D-H Robot de 6 grados de Libertad.....	44
Tabla 4 Resultados computacionales de la cinemática inversa método D-H.....	47
Tabla 5 Resultados computacionales de la cinemática inversa método espacio de vectores.....	48
Tabla 6 Hoja de datos Kuka LBR iiwa 7 R800.....	62
Tabla 7 Tabla de parámetros D-H.....	73
Tabla 8 Tabla de parámetros articulares 1.....	82
Tabla 9 Tabla de parámetros articulares 2.....	84
Tabla 10 Tabla de parámetros articulares 3.....	85
Tabla 11 Tabla de parámetros articulares 4.....	87
Tabla 12 Robot 6-GDL ABB IBR1200 5-90.....	88
Tabla 13 Hoja de datos Kuka LBR iiwa 7 R800.....	88
Tabla 14 Hoja de datos Kuka LBR iiwa 7 R800.....	94
Tabla 15 Robot 6-GDL ABB IBR1200 5-90.....	94
Tabla 16 Tabla de Velocidades Prueba 1.....	97
Tabla 17 Pruebas de Productividad Misma Velocidad.....	98
Tabla 18 Pruebas de Productividad 25% Total.....	101
Tabla 19 Pruebas de Productividad Total 25% 5min.....	102
Tabla 20 Pruebas de Productividad 45% Total.....	102
Tabla 21 Pruebas de Productividad Total 45% 5min.....	103
Tabla 22 Pruebas de Productividad 65% Total.....	104

Tabla 23 Pruebas de Productividad 65% 5min.....	104
Tabla 24 Pruebas de Productividad Máxima Velocidad.....	105
Tabla 25 Pruebas de Productividad Máxima Velocidad 5 min	105
Tabla 26 Precios de Manipuladores.....	108
Tabla 27 Velocidades Viper 650.....	111
Tabla 28 Limitaciones articulares Viper 650	112
Tabla 29 Velocidades iguales.....	113
Tabla 30 Productividad Velocidades Iguales.....	113
Tabla 31 Velocidades a un 25% Viper & ABB	114
Tabla 32 Velocidades a un 45% Viper & ABB	115
Tabla 33 Velocidades a un 65% Viper & ABB	115
Tabla 34 Velocidades Máximas velocidades Viper 650 vs ABB.....	116

III. Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Posiciones relativas	10
Ecuación 2 Posiciones relativas compuestas.....	11
Ecuación 3 Posiciones relativas compuestas 2	11
Ecuación 4 Posiciones relativas compuestas 3	12
Ecuación 5 Ecuación de Cinemática Inversa.....	40
Ecuación 6 Ecuación de Transformación	43
Ecuación 7 Cinemática inversa de robot 6-GDL.....	43
Ecuación 8 Cinemática inversa de robot 6-GDL 2.....	44
Ecuación 9 Ecuación de Transformación D-H.....	72
Ecuación 10 Matriz de transformación generalizada.....	74
Ecuación 11 Matriz de transformación homogénea modelo matemático.	76

IV. Índice de Gráficas

Gráfica 1 Primera iteración con el diseño del diagrama cinemático.....	53
Gráfica 2 Segunda iteración con la implementación del algoritmo D-H	54
Gráfica 3 Tercera iteración con la resolución de matrices.	55
Gráfica 4 Cuarta iteración con simulaciones de comprobación	56

I. Introducción

Hoy en día, los gobiernos, las empresas y los científicos ven la robótica como un componente importante del desarrollo tecnológico, económico y social del siglo XXI. Las empresas buscan mejorar los procesos que produzcan la mayor cantidad de producto en un tiempo mínimo récord, entre más producen, más venden. Otras empresas buscan maquinaria que vuelva un proceso más efectivo y más preciso, un proceso donde la tecnología usada sea humano-colaborativa, un proceso donde la tecnología pueda imitar las aptitudes humanas, movimientos articulares y precisión del humano, o mejor aún, eliminar el factor "error humano". El movimiento articular de los robots puede influir en su desempeño, es por eso que se hacen estudios de cinemática directa e inversa de los manipuladores seriales, existen métodos para resolver soluciones de cinemática, ese el caso de la convención "Denavit-Hartenberg", donde se estudia la cinemática de un manipulador de 7 grados de libertad mediante un modelo matemático de cinemática directa, y así lograr una comparación con uno de 6-GDL en la industria. A continuación, se dará una pequeña introducción a cada capítulo que se abordará en esta investigación.

Capítulo II. En el capítulo de planteamiento del problema se dará un enfoque de descripción del problema abordado en la investigación, donde se muestran las complicaciones de elección de un manipulador serial en la industria, teniendo la duda de cual manipulador es más efectivo para mejorar la producción o determinar en qué escenarios usar uno de 6 grados de libertad o uno de 7. En este capítulo se abordarán temas problemáticos actuales que hicieron surgir esta idea, como también se observará la definición del problema y su justificación de realización, observaran los objetivos planteados a lo largo de la investigaciones como también las preguntas principales de la investigación.

Capítulo III. Este capítulo es compuesto por el marco teórico, donde se expondrá la información usada para obtener los conocimientos requeridos para dar respuesta y solución al problema planteado. En este capítulo se entrará de lleno a comprender la robótica en la industria como también la cinemática del manipulador en estudio de 7

grados de libertad. Se expondrá información científica que ayudará a comprender más a fondo la convención "Denavit-Hartenberg".

Capítulo IV. En este capítulo se planteará la metodología de investigación, Se definirá la forma que se abordará el problema para darle solución, en esta parte se definirán las variables dependientes como las independientes, también se conocerá el enfoque dado a la investigación, se expondrán las herramientas usadas para dar solución al planteamiento del problema de la investigación incluyendo un cronograma de actividades para darle a cabo.

Capítulo V. Esta etapa de la investigación se llama análisis y resultados, donde se pondrán en práctica los aportes de las teorías que le dieron sustento en el marco teórico a esta investigación. En este capítulo se mostrarán los resultados de cada prueba realizada en las iteraciones de la metodología, se discutirá los resultados obtenidos en la investigación con la teoría expuesta en el marco teórico.

Capítulo VI. Como último capítulo se expondrá las conclusiones de los resultados obtenidos con respecto a los objetivos planteados desde un principio en el planteamiento del problema, remarcando las conclusiones relacionadas con análisis de la investigación.

II. Planteamiento Del Problema

El movimiento en el espacio de un robot es importante determinarlo, es decir determinar sus coordenadas necesarias para describir su posición y la orientación de sus partes que se le va a dar en el espacio. Al hacer diseño de modelos matemáticos se puede tener una visualización de la forma que se va a comportar el robot, en este caso, da una cierta idea de las condiciones que se verá en forma física, en este caso un brazo robótico de 7-GDL comparado con uno de 6-GDL en la industria.

En el transcurso de los años se ha venido desarrollando diferentes métodos, modelos matemáticos, soluciones etc. para seguir implementando la robótica de una manera segura, capaz de solucionar aptitudes que el humano no alcanzaría por condiciones externas, siempre con el objetivo del desarrollo de nuevas soluciones de fabricación en la industria que sea apta de realizar una nueva faceta de robots que sean de múltiples funciones y aptos al cambio.

2.1 Precedentes Del Problema

Cada día la demanda en la industria actual ha creado la necesidad de un ambiente o un mercado en donde se puedan usar materiales, piezas, y funciones especializadas para poder llevar a cabo el desarrollo de diferentes configuraciones en donde se vean involucrados los robots, según sea en lo que se necesite o en donde se requiera su aplicación. El mercado de la robótica es muy cerrado, debido al alto costo de implementación, las pequeñas y medianas empresas no pueden clasificar su uso, por lo que es difícil ingresar. A lo largo de la historia se ha venido preguntando qué es lo que inspira para llevar a cabo el proyecto de un robot que sea manipulable con diferentes grados de libertad, en donde se pueda modificar con el tiempo y con el objetivo de un mayor desarrollo en la industria y en la medicina más que todo; que su nivel de respuesta sea alto logrando hazañas que al ser humano se le haga difícil llegar.

Hoy en día existen una gran cantidad de modelos matemáticos, ya sean para robots o para otros usos, en donde se han usado para distintos rubros según Bogomolov et al., (2019) como en el "Cálculo industrial de procesos de membrana basado en un modelo matemático", así también según Zhaojun Meng et al., (2010) en el "modelo matemático simulado de sistema de motor DC sin escobillas"; estos solo son algunos ejemplos en

donde se han utilizado los modelos matemáticos en la industria, al acercarse un poco en ésta investigación el uso de modelos matemáticos en robots se encuentra según Galin et al., (2020) " Modelo Matemático y Simulación de Colaboración Humano-Robot" en donde expresa que los métodos de simular los robots permite reducir el esfuerzo y tiempo de diseño del robot, hace énfasis el ahorro de tiempo en el que se llevaría en el diseño del robot, también ayuda en la representación de las características cinemáticas del robot en donde se lleva acabo gran parte de los parámetros con modelos matemáticos (Galin et al., 2020).

2.1.1 Historia de Los Modelos Matemáticos en la Robótica.

La vida natural de los seres humanos es desarrollar ese olfato de crear explicaciones de la naturaleza mediante la ciencia, se han creado hipótesis, teorías para crear sentido a la forma en que el entorno funciona.

Entonces como definición a lo que se ha venido entendiendo a lo largo de los años y a través de las clases desde la primaria y secundaria consecutivamente en donde muestra a la ciencia como el resultado de la evolución para el entendimiento de la realidad y saber cómo manejarla. En la escuela enseñan diferentes ciencias, así como las matemáticas de forma estadística, las ciencias naturales como del entorno ambiental, pero no enseñan las matemáticas como esa forma lógica o de coherencia requerida para hacer observaciones fundamentales a lo largo de la vida cotidiana, mediante las evoluciones de las ciencias matemáticas y otras ciencias se crea la modelación matemática (Torres, s. f.).

A lo largo que fue creciendo esta duda en el crecimiento de la incertidumbre de diferentes factores como en los cambios climáticos o fenómenos naturales surge la idea de predecir o ver la forma de explicar lo que estaba sucediendo, durante el tiempo de los procesos fue cuando los mismos científicos determinaron acudir a otras opciones en donde surgió la idea de usar otros métodos, en este caso otras ciencias como la matemáticas en donde se comprendiera de forma generalizada estas predicciones.

En resumen, se puede decir que un modelo matemático es algún tipo de representación o conceptualización a un proceso que se quiere llevar de forma física y precisa de la realidad o de lo que podría pasar en la vida real, aquí es donde se mira la utilización de

los modelos matemáticos combinado con otras ciencias para la resolución de problemas diarios, que va desde robots simples de 2 grados de libertad hasta humanoides de 32 grados libertad divididos en todo su cuerpo, a lo largo de la historia se han creado modelos matemáticos para múltiples usos así utilizado según Grachev et al., (2020) en la "optimización de problemas de resistencia a choques en el diseño del sistema de gasolina en los helicópteros"; en donde el uso de la modelización matemática ha sido fundamental para la realización de pruebas con simulaciones, siendo claro que el uso de robots reales es algo de precios elevados y de muy poco acceso para los ingenieros donde de alguna manera estas simulaciones hacen las pruebas de manera rápida y eficaz (Ghozlane & Knani, 2016), y así como los ejemplos expuestos surgen diferentes ideas a lo largo de investigaciones de robots manipuladores o también de ramas de la ciencia completamente diferentes a la robótica, pero en este caso el proyecto se centrará en esto particularmente, en el diseño de un modelo matemático para un robot de 7 grados de libertad basado en la convención de Denavit-Hartenberg.

2.1.1 Historia de la Robótica

A lo largo de la historia se han venido mostrando diferentes propuestas para mejorar la vida del ser humano, tecnologías que los antepasados no tenían idea del nivel de desarrollo que hay en el entorno de hoy en día; como naturaleza al hombre le gusta superarse, le gusta crear ambientes en donde la vida cotidiana sea sencilla, y no solo eso, se ha visto envuelta en sustituir al humano en la industria, en la casa, y hasta como forma de personas sociales. Se han creado artículos de personalidad jurídica en la IA para humanoides, en donde tratan de definir los límites que tienen los derechos humanos y estos mecanismos; a lo largo que va pasando el tiempo se han creado tecnologías de avance exponencial, de donde según va de nanotecnología hasta investigaciones de genoma humano (Lau & Lau, 2019), pero en lo particular hace llamado a preocupación de los humanoides en donde han llamado la atención a resoluciones legales, pero la robótica ha venido a solucionar muchas cosas en donde se evita el riesgo de perder la vida humana, solo con ver el ejemplo de un robot que desactiva bombas, ya no es necesario acudir a un profesional y que arriesgue su vida, en cambio todo a base de control de cámaras y control remoto el ingeniero o el especialista hace el trabajo, los robots están para mejorar la calidad de vida del humano, imitando sus aptitudes en

varios campos, en donde uno de los más usados ha sido la medicina y la industria ensambladora. La robótica involucra diferentes puntos en la historia humana desde que vino empezando la creatividad. No más fue en el siglo XX en donde las ingenierías tuvieron su auge en sus diferentes especialidades, donde concede las puertas para la creación de una nueva generación de robots. Fue entonces donde se dieron los primeros pasos, empezando por la informática en donde los desarrollos de software han sido los principales protagonistas en el desarrollo de la inteligencia robótica que se conoce hoy en día (Sánchez-Martín et al., 2007).

2.2 Definición del Problema

En la actualidad las empresas buscan mejorar el rendimiento de su productividad, al mismo tiempo buscan no gastar mucho en gastos materiales, gastos de herramientas, entre cosas, pero en la mayoría de veces buscan siempre lo mejor en tecnología, es ahí donde entran los robots a solucionar muchos de esos factores; factores en donde el ser humano se tarda más o se le hace difícil realizar dicho trabajo por sus limitaciones; hoy en día existen cientos de propuestas en donde se plantea la realización de un robot que imite al ser humano y realice las mismas tareas con mayor eficiencia y en menor tiempo, son robots que se mueven a veces en espacios reducidos que van desde 1-GDL, 2-GDL, 3-GDL, etc., en donde los que más compiten a imitar la fisiología de un brazo son los de 6 y 7 grados de libertad, que es lo que la industria busca al reemplazar al hombre, pero, ¿Cuál es el más viable que cubra la satisfacción de la industria hoy en día?, ¿Puede un robot de 7 grados de libertad reemplazar a sus predecesores en la industria? Son algunas de las preguntas que necesitan respuesta, lo cual es muy difícil saber sin hacer pruebas de predicción, sin realizar estudios de su desarrollo en el espacio lo cual puede causar algunos errores donde hay constantes problemas con los robots, particularmente en las estructuras seriales que causa movimientos repetitivos pero no precisos, en donde el problema real se ve reflejado en los parámetros del modelo de la cinemática real, en donde estos errores se propagan a lo largo de la cadena cinemática, además se sabe poco o nada de los modelos matemáticos y algoritmos que gobiernan sus movimientos en el espacio, lo cual es donde se genera otro problema para los usuarios que necesitan diseñar estructuras cinemáticas para la robótica en donde los parámetros de modelo son inaccesibles (Faria et al., 2019), ese es el caso de los robots de 7 grados de libertad, en

donde la información de los estudios de su cinemática y estudios de sus sistemas de coordenadas es escaso al ojo público.

2.3 Justificación

A diario las empresas van adquiriendo equipo para mejorar sus procesos, cada vez quieren tener lo mejor para reducir costos, es preferible tener una herramienta que cumpla con 2 tareas y no una que cumpla media tarea, por eso es importante determinar cuál es esa herramienta, en este caso será necesario saber si esa herramienta es un robot de 7 grados de libertad. Con la creciente popularidad de robots en la moderna fabricación inteligente, especialmente en ambientes que se requiere un mecanizado preciso, los robots con altos grados de libertad y una flexibilidad alta son usados cada vez más y más ampliamente (Guicheng et al., 2019). Con esta investigación se busca determinar si un robot de 7 vale la pena usarse en la industria, estudiando su cinemática, sus parámetros en un sistema de coordenadas mediante las predicciones de los modelos matemáticos usando el algoritmo de Denavit-Hartenberg.

2.4 Preguntas de investigación

1. ¿Permite la convención D-H tener un estudio matemático de la cinemática directa de un manipulador de 7- GDL?
2. ¿El resultado del modelo matemático dependerá de la estructura articular del manipulador en estudio?
3. ¿Para la industria, es lo mismo tener un manipulador de 7-GDL que uno de 6-GDL?

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo General

Diseñar un modelo matemático utilizando el algoritmo Denavit-Hartenberg que describa la cinemática directa de un robot de 7 grados de libertad.

2.5.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar un diagrama cinemático que describa la estructura articular del manipulador en estudio para determinar si el movimiento de sus articulaciones afectará el resultado del modelo matemático .
2. Comparar los niveles de productividad de ambos manipuladores realizando pruebas de rapidez y de agilidad articular en el ámbito industrial.

III. Marco Teórico

3.1 Conceptos Básicos

La automatización de hoy en día va en constante evolución en la industria, la mecanización de las cosas no es la misma que en la revolución industrial, se han descubierto materiales, fórmulas, inquietudes sobre los objetos en el entorno, se han creado soluciones alternas para mejorar la productividad. La robótica ha sido un pilar para mejorar estos procesos, lo cual su estudio ha sido fascinante, desde los movimientos de cuerpos rígidos, ángulos, espacio de trabajo, movimientos en el espacio, entre otras cosas, todo esto lleva a preguntarse ¿Cómo es su funcionamiento?, es decir, ¿Cuál es la base de los brazos robóticos?, Para eso se debe comenzar con algunas definiciones de mecanismos, donde se hace saber que son conjuntos de eslabones, lo cual son cuerpos rígidos; esa unión es llamada junta o articulación, donde el movimiento de esos eslabones se llevan a cabo por actuadores (García, s. f.).

Los brazos robóticos tienen que tener un objetivo, necesitan saber dónde están ubicados, necesitan saber hacia dónde dirigirse, es como los humanos cuando van a un lugar que no es conocido, la primera pregunta que pasa por la mente es, ¿cómo llegar a un destino? ahora es más fácil con la tecnología, esa tecnología usa coordenadas, coordenadas angulares que están incluidas latitud y longitud, que están regidas por el sistema de coordenadas geográficas, para un robot es lo mismo, necesita una dirección, un destino y como llegar a él, a diferencia de estas tecnologías los brazos robóticos usan coordenadas cartesianas para saber sus parámetros en el espacio y saber en qué lugar moverse, dirigirse o ubicarse. Los números son una parte importante en las matemáticas. La especie humana usa los números para contar: hay 2 manzanas. Se utilizan los números denominados, un número más una unidad, para especificar la distancia: el objeto está a 2 m. A este número único también se le llama escalar. Utilizan un vector, un número denominado más una dirección, para especificar una ubicación(postura): el objeto está a 2 m hacia el norte. También se puede querer saber la orientación del objeto: el objeto está a 2 m hacia el norte y orientado hacia el oeste. A la combinación de posición y orientación es llamada ubicación (postura) (Corke, 2017).

3.1.1 Movimiento de cuerpos rígidos

Para describir y establecer la ubicación y movimiento de cuerpos rígidos en un mundo tridimensional es necesario establecer 6 dimensiones o parámetros, 3 de ellas describen su posición y las restantes describen su orientación, pareciera que se comportan de la misma manera, pero tienen su fugaz diferencia. En algún caso que se aumente el valor de una de las dimensiones de posición, el objeto se moverá continuamente en línea recta, pero si se incrementa el valor de una de las dimensiones de orientación el objeto rotará y en algún punto del tiempo, volverá a su orientación original lo que da a entender que esta dimensión es curva (Corke, 2017b). Es notable saber que un cuerpo rígido puede ser considerado un sistema de partículas infinitas en donde la distancia entre partículas es constante (Ghosh, 2018).

La ubicación en el marco de coordenadas cartesianas se denota con el símbolo ξ , letra griega xi. En la ilustración 1 se observa dos marcos {A} y {B} y la ubicación relativa ${}^A\xi_B$ que describe {B} con respecto a {A}. El superíndice inicial denota el marco de coordenadas de referencia y el subíndice denota el marco que se describe. También se puede pensar que ${}^A\xi_B$ describe movimiento, hipotéticamente sea agarra {A}, se aplica un desplazamiento y algún tipo de rotación para que se transforme en {B}. Si falta el superíndice inicial, se asume que el cambio de ubicación es relativo al marco de coordenadas mundial, que generalmente se denota como {O} (Corke, 2017b).

El punto P en la ilustración 1 puede ser descrito con respecto a ambos marcos como vectores ${}^A p$ o ${}^B p$ respectivamente, lo cual están relacionadas con:

$${}^A p = \xi_B \cdot {}^B p$$

Ecuación 1 Posiciones relativas

Fuente: Corke, (2017)

donde la ley de mano derecha expresa el movimiento de {A} hacia {B} y después a P, la operación de \cdot convierte al vector, dando como resultado a uno nuevo que describe al

mismo punto, pero con respecto a un marco de coordenadas diferente, cabe resaltar una importante característica de las ubicaciones relativas en donde pueden ser compuestas (Corke, 2017b). Se toma en cuenta otro caso en la ilustración 2. Si un marco de coordenadas puede ser descrito por otro a base de una ubicación relativa, entonces pueden ser aplicados secuencialmente.

$${}^A\xi_C = {}^A\xi_B \oplus {}^B\xi_C$$

Ecuación 2 Posiciones relativas compuestas

Fuente: Corke, (2017)

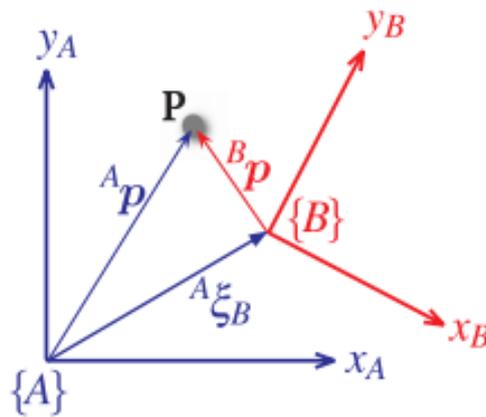


Ilustración 1 Marco de coordenadas relativas

Fuente: Corke, (2017)

En donde explica que la ubicación de {C} respecto a {A} puede ser obtenida mediante la composición de la ubicación relativa de {A} hacia {B} y de {B} hacia {C}, se usa el operador \oplus que indica una composición de ubicaciones relativas, para dar ejemplo del punto P puede ser ubicado por (Corke, 2017b) :

$${}^A p = ({}^A\xi_B \oplus {}^B\xi_C) \cdot {}^C p$$

Ecuación 3 Posiciones relativas compuestas 2

Fuente: Corke, (2017)

Hasta el momento se ha visto escenarios en donde solo se utiliza sistemas de coordenadas cartesianas de 2 dimensiones en donde se estudia particularmente robots móviles planares, en escenarios de 3 dimensiones se va a usar marcos de coordenadas de 3 dimensiones para explicar los objetos en un ámbito tridimensional, como la ubicación de un objeto flotante o bajo el agua o un efector final que es sostenido por un brazo robótico (Corke, 2017b).

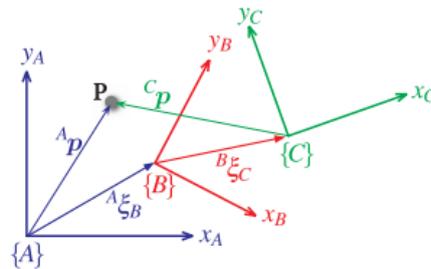


Ilustración 2 Marco de coordenadas relativas 2

Fuente: Corke, (2017)

Se observa el comportamiento de las ubicaciones relativas de un punto respecto a otro punto o encontrar un marco de coordenadas respecto a uno de referencia, todo esto hasta el momento en una visión bidimensional, pero ¿que pasara si se ve de una forma diferente?, es decir agregándole una visión tridimensional (Corke, 2017b). En la ilustración 3 se observa un ejemplo tridimensional un poco más complejo de forma gráfica en donde se ha agregado marcos de coordenadas cartesianas tridimensionales a las diferentes entidades identificando diferentes ubicaciones relativas.

Repasando un poco se sabe que se puede hacer una composición de ubicaciones relativas usando \oplus para poder escribir algunas relaciones espaciales (Corke, 2017b).

$$\xi_F \oplus {}^F\xi_B = \xi_R \oplus {}^R\xi_C \oplus {}^C\xi_B$$

Ecuación 4 Posiciones relativas compuestas 3

Fuente: (Corke, 2017)

Analizando se observa que cada ecuación representa un bucle en el gráfico, en donde cada lado de la ecuación empieza y termina en el mismo nodo. Cada lado de la primera

ecuación muestra un camino a través de $\{O\}$ a $\{B\}$, un camino de aristas (flechas) escritas en orden. Es importante saber que hay ciertas reglas algebraicas de acuerdo a las composiciones en donde existe una ubicación relativa igual a cero, en donde es representada por 0 al igual que existe una ubicación inversa, es decir ${}^X\xi_Y = {}^Y\xi_X$, y reconocer que las reglas del algebra normal no es igual al algebra de las ubicaciones en donde no es conmutativa $\xi_1 \oplus \xi_2 \neq \xi_2 \oplus \xi_1$ (Corke, 2017b).

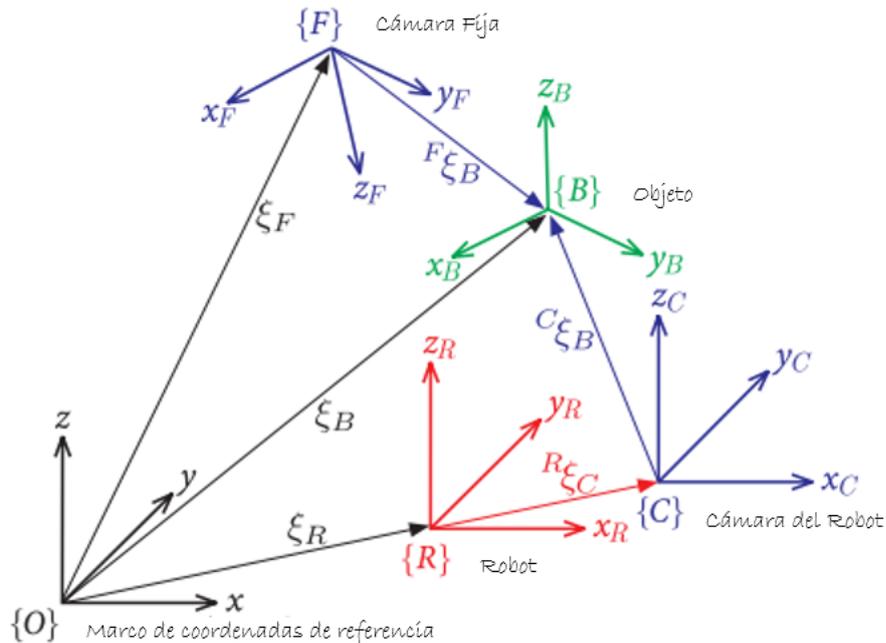


Ilustración 3 Múltiples marcos de coordenadas tridimensionales

Fuente: Corke, (2017)

Lo bonito de las ubicaciones es su forma de usar algebra. Al observar la ecuación 4, donde muestra el bucle que dice que la ubicación del robot es la misma haciendo la composición de dos ubicaciones relativas: desde el marco de coordenadas de referencia hasta la cámara fija y de la cámara fija hacia al robot. Entonces se determina que se pueden hacer operaciones matemáticas con las ubicaciones de los objetos, usando sus ubicaciones relativas en para llegar a un punto en distintas maneras (Corke, 2017a).

3.1.2 Teoría de Rotación de Euler

Anteriormente se enfocaba en la posición de un objeto, sabiendo que el movimiento de cuerpos rígidos tiene 6 parámetros los cuales son divididos entre posición y orientación, en donde esta última está regida por las diferentes teorías de Euler. Al enfocarse en su teoría de rotación en donde va enfocada al parámetro de orientación. En la ilustración 4

se muestra dos marcos de coordenadas cartesianas con diferentes orientaciones, En algún caso hipotético se quisiera describir la orientación de un marco con respecto a otro. Se agarra {A} y rotarlo hasta que quede como el marco {B}. en donde esta teoría establece que cualquier rotación puede ser considerada como secuencia de rotaciones sobre diferentes ejes de coordenadas (Corke, 2017b).

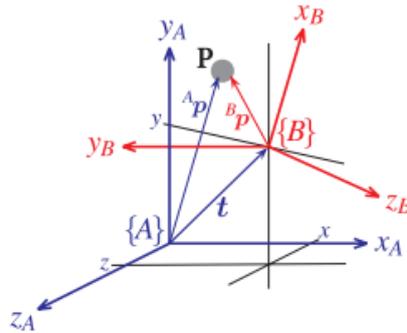


Ilustración 4 Dos marcos de coordenadas tridimensionales

Fuente: Corke, (2017)

Ha habido varios estudios de acuerdo a la rotación de los objetos, en donde resulta que uno puede elegir el eje de traslación para que su dirección coincida con la del eje de rotación, esto fue expuesto por la teoría de Mozzi-Chasles en donde su enfoque ha sido en el estudio de la dinámica cuerpos rígidos, usando la teoría del torillo, lo cual está muy presente en los robots de hoy en día (Joseph, 2020).

Se considera una rotación por un simple eje de coordenadas. La ilustración 5 muestra un marco de coordenadas, y ese mismo marco rotado en diferentes ángulos sobre diferentes ejes de coordenadas. El problema de rotación tiene sus sutilezas que se ven en la ilustración 6 en donde muestra una secuencia de dos rotaciones aplicadas en ordenes diferentes. Se puede observar que la orientación final va a depender del orden en el que las rotaciones son aplicadas. Esta es una característica confusa del mundo tridimensional que ha inquietado a científicos y matemáticos por un muy buen tiempo (Corke, 2017b).

En donde a lo largo se va avanzando se puede decir que la rotación en tercera dimensión no es conmutativa, el orden en el que las rotaciones son aplicadas hace una diferencia en su resultado.

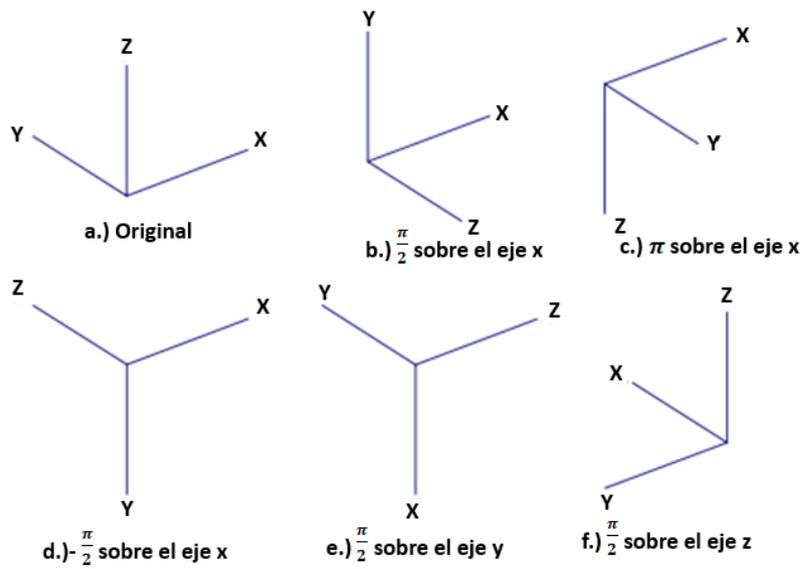


Ilustración 5 Rotación del marco de coordenadas

Fuente: Corke, (2017)

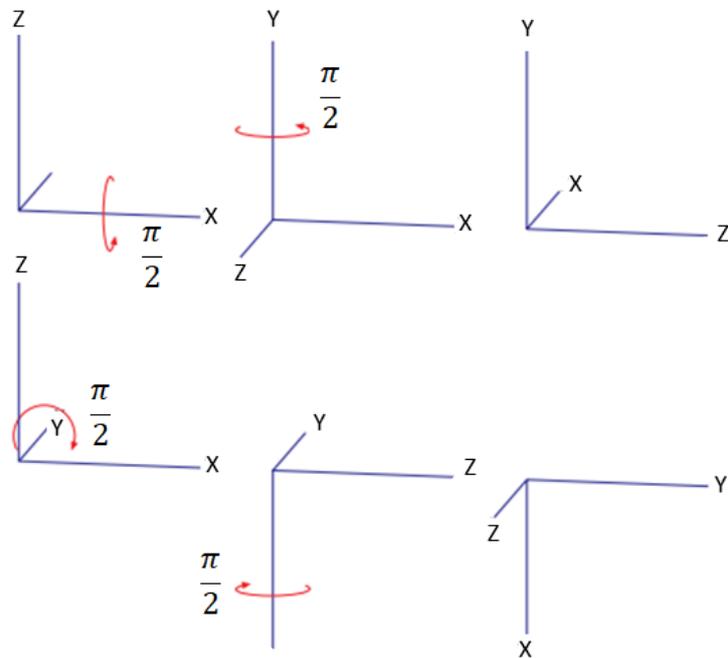


Ilustración 6 Explicación de la rotación no conmutativa

Fuente: Corke, (2017)

Se puede apreciar en la primera línea de la ilustración 6 el orden de un par de rotaciones, en la segunda línea se hace el orden de rotación en reversa y claramente el resultado no es el mismo.

En la representación de los ángulos de Euler especifica en su teoría que requiere rotaciones sucesivas sobre tres ejes tal cual dos de ellas no sean sobre el mismo eje. Hay dos tipos de rotaciones secuenciales: la creación de Leonhard Euler (1707–1783) y la de Gerolamo Cardano (1501–1576). El tipo Euleriano implica la repetición, pero no la sucesión de rotaciones sobre un eje en particular: XYX , XZX , YXY , YZY , ZXZ o ZYZ . El tipo Cardaniano se identifica por rotaciones sobre los tres ejes: XYZ , XZY , YZX , YXZ , ZXY o ZYX (Corke, 2017b).

Estas teorías vienen a dar un énfasis en la importancia de la movilidad de los robots, en sus formas de posición y orientación; estas teorías están involucradas en los movimientos en la robótica, sus movimientos en el espacio tridimensional y en el entorno humano. Se han hecho estudios en donde a base de la linealización de los ángulos de Euler se puede simplificar o eliminar el uso de la cinemática inversa y la matriz Jacobiana para crear un mejor ambiente en la interacción del robot y el humano, en donde el espacio de trabajo sea apto para ambos en donde haya control de las juntas por el operador dependiendo el torque y la fuerza aplicada a los ángulos deseados (Perrusquía & Yu, 2020).

3.2 Modelos Matemáticos

Las ciencias buscan resolver siempre las dudas respecto a un tema, ya sean ciencias formales, ciencias naturales o sociales, siempre buscan responder las cuestiones o analizar estudios de comportamientos humanos, estudios de fenómenos naturales entre otras cosas. Los modelos matemáticos son parte de la ciencia, la ciencia matemática, en donde se usa diferentes lenguajes para la interpretación o la predicción de ciertos comportamientos, los modelos matemáticos ayudan predecir, a testear el cómo sería si... En la modelación matemática intervienen diferentes factores, diferentes variables a tomar en cuenta en donde están relacionadas entre sí. Siempre se puede hacer un modelo matemático mientras haya un problema, se trata generar un análisis y tratar de resolverlo matemáticamente (Kurniadi et al., 2020).

Expertos han tratado de seguir un proceso de modelización matemático en donde se trata de empezar por identificar un problema como el primer paso, seguido de hacer suposiciones y definir variables esenciales en el problema, como tercer paso desarrollar las matemáticas que recurran a una solución en donde se pueda analizar y evaluar el

modelo respecto a sus soluciones, se debe tener en cuenta de hacer las repeticiones necesarias, redefinirlas y extender el modelo para llegar a un final y poder implementar el modelo y reportar sus resultados.

Se determino que para identificar un modelo matemático debe tener 4 características en donde *a.) es un problema del mundo real b.) es un problema abierto c.) vale la pena resolverlo y d.) usar la matemática como herramienta de solución.* Estudios destacan la falta de identificación de las dos primeras características (Kurniadi et al., 2020).

Se sabe que en los problemas matemáticos existen problemas de palabras, problemas de aplicación y problemas de modelización. En donde la modelización requiere interpretación para resolver el problema. Al momento del diseño de modelización, el problema normalmente va relacionado con problemas de aplicación matemática y problemas de aplicación de solución de tal manera que va integrado a la resolución de problemas. La modelización del problema va vinculada a los problemas de aplicación matemática de la realidad u otros temas, la interpretación matemática al termino de modelización. Esta conexión puede examinarse como un problema de análisis, asimilación, interpretación y validación. Para la solución de problemas de modelación matemática es recomendable tomar en cuenta ciertos pasos en el ciclo de modelización referentes a construir, simplificar, estructurar, matematizar, trabajar matemáticamente, interpretar, validar y exponer (Kurniadi et al., 2020). En la robótica se ha utilizado la modelización matemática para predecir los comportamientos de la cinemática de los robots como una alternativa de la realidad (Grachev et al., 2020).

3.2.1 Modelos Matemáticos en la Robótica

Anteriormente se expuso la importancia de la modelización matemático en la robótica en donde se principia en la idealidad de dar solución a problemas de la realidad, en donde a veces llevar a cabo un robot o un diseño podría ser muy costoso y al mismo tiempo, innecesario, se espera tener predicciones de los modelos matemáticos que simulen la realidad en donde varios autores relatan esta experiencia.

Grachev et al., (2020) menciona en su estudio:

“En la etapa de diseño de sistemas de combustible hay una amplia aplicación de softwares de simulaciones matemáticas unidimensionales complejos que

reemplazan los sistemas y estructuras complejas reales con diagramas de bloques como bloques matemáticos que describen enteramente estos sistemas y estructuras reales”.

En la robótica se han presentado diversos proyectos con modelos matemáticos de distintos objetivos, algunos presentan un propósito de simulación de validación de sistemas de un robot, otros tratan la validación de movimientos de un proceso, entre otras muchas cosas para el fin que se convenga. Se discute un modelo matemático de bastante interés en el ámbito de la robótica en donde se estudia la interacción entre el humano y el robot. Es importante y necesario tener conocimientos matemáticos para la construcción y programación de los sistemas robóticos, donde se mira a futuro la colaboración de los robots en la vida humana en donde se soluciona problemas cinemáticos en el cual el hombre y la máquina puedan realizar tareas en un mismo espacio de trabajo, todo esto bajo simulaciones controladas (Galín et al., 2020).

La modelización ahorra tiempo y recursos, empezando por la fase donde se hace el boceto del robot. También se ahorra las iteraciones de prueba al momento de la creación de prototipos. Al momento del diseño de una modelización se toman en cuenta factores que afectan al robot y sus componentes en donde se evalúa su estabilidad, rendimiento y la precisión del mismo. Por así decirlo brevemente, el diseño de la modelización permite perfeccionar procesos tecnológicos como también el sistema completo del robot en donde se estudia los parámetros de su dinámica y cinemática, se hacen estudios de prueba con sus respectivas juntas del robot entre otras cosas (Galín et al., 2020).

Para la creación de este modelo matemático antes mencionado se usaron diferentes parámetros, se utilizó un robot de 6 grados de libertad para la comprensión de sus características cinemáticas y dinámicas. Matemáticamente se usó los parámetros del algoritmo de Denavit-Hartenberg para el estudio de sus movimientos en el espacio, para hacer una breve introducción a Denavit-Hartenberg se pueden definir sus condiciones como (Galín et al., 2020):

- El eje Z está en la dirección del eje de la junta
- El eje X esta perpendicular a ambos Z_n y Z_{n-1}
- El eje Y sigue la regla de la mano derecha

- El eje X_n debe cruzar el eje Z_{n-1}

(Galin et al., 2020).

Mas adelante se observarán más detalles a profundidad de este algoritmo representado en un robot de 7 grados de libertad en el modelo matemático. De toda esta información se hace una construcción de matrices homogéneas, calculaciones de ángulos de rotación en base a matrices calculadas. Estas especificaciones se simulan en diferentes softwares, así como lo han hecho en otras investigaciones, en donde usan softwares como SolidWorks y SimMechanics para simulación de estos diagramas de bloque a un diseño tridimensional a base de diseños asistidos por computadora (Ghozlane & Knani, 2016).

Con estas reglas se soluciona los problemas de cinemática directa e inversa del robot. La principal tarea de la cinemática consiste en calcular las coordenadas de posición y orientación del sistema de coordenadas enlazadas con el efector final siendo dadas coordenadas generalizadas del robot. La solución a la cinemática inversa es calcular coordenadas generalizadas para coordenadas lineales y angulares del robot. Cabe destacar que no vale de nada que la solución dependa de las características de diseño del robot (Galin et al., 2020).

Se usan procesos matemáticos para encontrar trayectorias en su dinámica inversa, y así saber la continuidad de su posición en donde su dinámica requiere saber velocidad y aceleración que le da la posibilidad al robot de continuar su camino con comandos alcanzables. Se aplican estudios matemáticos para encontrar vectores de torque y fuerza aplicados en las diferentes juntas de los robots en donde son excitados por actuadores respondiendo a trayectorias de diferentes variables. Para encontrar la energía cinemática, energía potencial se toman en consideración diferentes datos mecánicos y geométricos del robot como sus dimensiones, en este caso las dimensiones del brazo robótico, su masa, su inercia, fricción etc. Cada cosa que permita determinar la energía cinética lo cual depende su configuración y la velocidad de sus juntas (Ghozlane & Knani, 2016).

Después de haber analizado la cinemática del robot y haber calculado los cruces del área de trabajo del operador se hizo el análisis de la trayectoria a sus puntos de destino. El propósito de la modelización era ver el trabajo de distribución de tareas entre robot y humano y realizar el trabajo de clasificar objetos y moverlos de un punto a otro. En la

ilustración 7 se puede ver la simulación realizada en donde se ve la realización de tareas de organización de objetos dependiendo de su forma y colores en donde el robot está equipado con herramientas técnicas para identificar dichos objetos (Galín et al., 2020). La modelación matemática permite predecir los movimientos de un robot sin llevarlos a cabo en estructuras costosas con diversas iteraciones de prueba, a través de datos se puede analizar trayectorias, estudios de dinámica y cinemática siendo visualizado su comportamiento con ayuda asistida de softwares ya antes mencionados.



Ilustración 7 Simulación de modelo matemático de interacción Humano-Robot

Fuente Galín et al., (2020)

3.2.2 Modelos Matemáticos en otros Campos

De tal manera que se realizan estudios en la robótica, también existen modelos matemáticos en la medicina, en finanzas y en muchas otras áreas con el propósito de hacer pruebas y predecir que podría pasar con el comportamiento de su estudio. Para el desarrollo y solución del problema a través de un modelo matemático se tiene que entender la situación del problema a simplificar, estructurar y de hacer más precisa la construcción de la situación del modelo real. La transformación de un modelo real a un modelo matemático puede consistir de ciertas ecuaciones. En donde resolver estas ecuaciones generan resultados matemáticos que pueden ser interpretados en el mundo real como resultados reales (Kurniadi et al., 2020).

Se observa este ejemplo en la medicina en donde se busca verificación a un modelo matemático existente que busca validar su fiabilidad y así crear una base para futuros trabajos en la modelación de datos para la espasticidad del miembro superior, basado

en la escala de Ashworth modificada. Para introducir un poco el tema se debe saber algunos términos como que la espasticidad es una contracción refleja-dependiente de la velocidad del músculo, que provocará la incapacidad en el control muscular del cuerpo humano. La espasticidad en los miembros superiores es un término más específico para la manifestación de espasticidad en la extremidad superior o el brazo (Yee et al., 2020). Otro termino que se debe familiarizar es la escala de Ashworth donde es son utilizados por los médicos terapeutas ocupacionales y fisioterapeutas para evaluar la gravedad de la espasticidad (Zakaria et al., 2015).

La escala de Ashworth modificada mide la resistencia muscular al movimiento pasivo con términos ambiguos, como "ligero aumento", "más marcado", entre otras cosas (Zakaria et al., 2015). El modelo matemático en estudio se enfocó en emular los valores de los torques obtenidos en los conjuntos de datos clínicos hechos en Malaysia. Estos datos incluyen medidas de torques hechas de cada ángulo del codo, a medida que el codo se extiende desde una posición de flexión completa hasta una posición de extensión completa durante el estiramiento lento y rápido del antebrazo. La mayor razón del problema a solucionar es evitar que los nuevos integrantes en el campo tengan un contacto directo con los pacientes por el bajo margen de tolerancia hacia errores médicos, entonces se busca tener una simulación bastante idónea para poder comprender la espasticidad de miembros superiores en la que no se comprometa la salud de los pacientes. Por eso equipos de investigaciones se han dedicado a crear ecuaciones matemáticas para describir la relación entre el movimiento del ángulo del codo y la resistencia producida por el brazo espástico. El modelo en discusión se enfocó en tres variables, fase de previa a la captura, fase de captura y la fase posterior a la captura. El modelo matemático fue programado en MATLAB con propósitos de simulación con el ángulo del codo como entrada y el valor del torque producido como salida. Con los resultados obtenidos se concluyó que la tendencia para los estiramientos lentos y rápidos es capaz de reproducirse con éxito a pesar de la tolerancia en la diferencia del torque máximo y el ángulo del codo en el que se produce el torque máximo. En futuros estudios se necesitarían más resultados de prueba con datos de la escala de Ashworth modificada para una simulación y verificación más exhaustiva (Yee et al., 2020).

Así como explicado anteriormente, el modelaje matemático estará presente en donde hay un problema real en donde pueda aplicarse la matemática, en la industria, por ejemplo, existe el problema de los efectos no deseados de la vibración en las bandas transportadoras. Sin embargo, las vibraciones han sido ampliamente parte del trabajo en la industria. Las máquinas que utilizan superficies vibratorias son muy diversas: transportadores vibratorios, transportadores oscilantes de inercia y de vibración, mesas de concentración y otras. El uso de transportadores de inercia y vibratorios permite resolver de forma eficaz y económica el problema del movimiento de sólidos. Debido al uso de las tecnologías vibratorias es importante estudiar el movimiento de un punto material en un plano inclinado vibrante con la acción de un campo de fuerza adicional. Para diseñar la máquina más eficiente y rentable, es necesario encontrar los parámetros óptimos del proceso de oscilación de esas vibraciones. En donde se usan operaciones diferenciales enfocados en las fuerzas aerodinámicas del flujo de aire en movimiento sobre la naturaleza del movimiento de las partículas poniendo a prueba con conocimientos matemáticos para llegar a una solución donde se pueda simular y determinar los parámetros óptimos del sistema (Boriskina & Baryshnikova, 2020).

3.3 Automatización

Como se ha venido exponiendo desde el principio de este informe, la tecnología ha dado un drástico cambio a la vida cotidiana, la vida ya no es la misma que hace 70 años, más que todo para la industria en donde se mira el cambio laboral para una productividad mayor. La presión sobre las empresas sigue aumentando, y muchas buscan nuevas oportunidades para impulsar la productividad, usando tecnologías disruptivas como es el internet de las cosas (IoT), comunicación maquina con maquina (M2M), computación cuántica, inteligencia artificial entre muchas otras cosas, todo esto busca llegar a un sistema autónomo que pueda tomar y ejecutar decisiones con poca intervención humana e ir más lejos de solo ensamblar en la industria, donde pueda interactuar con los proveedores, cliente y otras fábricas en la industria (Fiaidhi, 2018).

Es un hecho innegable que la automatización y la robótica, junto a sus diversas manifestaciones se ha anticipado a tener un impacto en la vida y trabajo de cada individuo. Por otra parte es un impacto que va más allá de solo ensamblar, tejer o adaptarse a nuevas prácticas afectando el ludismo (Matthews & Greenspan, 2020). El

miedo a la automatización ha crecido a través de los años, en donde los medios de comunicación han jugado un gran rol para difundir el miedo donde muestran una amenaza por la creciente demanda de máquinas superiores; películas, revistas, noticias han generado una forma negativa de ver la automatización. Hacen ver la automatización como el trago amargo de vidas publicando noticias donde los robots reemplazaran los trabajos humanos, publicando noticias de cómo se verá el mundo lleno de robots entre otras cosas. La ciencia ficción por otra parte ha alimentado este miedo donde muestra la robótica apoderada del mundo con el objetivo de extinguir la humanidad. Este tema de destrucción ha contaminado y difundido un mal mensaje en donde es captado por cantidades masivas de espectadores (Matthews & Greenspan, 2020).

Los desarrollos en tecnología han logrado mejoras de forma masiva en hardware y software en la automatización y robótica. La inteligencia artificial puede ser considerada una de las tecnologías que permiten la automatización y la toma de decisiones. El desarrollo de hardware con procesadores más rápidos y unidades de gráficos excepcionales, estas tecnologías con mejor consumo de energía son las que están acelerando los avances en robótica y automatización. Esto está llevando a un creciente impacto en las tareas y prácticas de trabajo actuales. El software y los robots de trabajo físico son los que podrían afectar la forma en la que las personas son renumeradas en el futuro disminuyendo el número de trabajadores con conocimiento. La preocupación es expresada desde el momento que los trabajos fueron reemplazados con robots industriales en las líneas de producción de ensambladoras de carros, esa preocupación ha estado en aumento a medida que la tecnología avanza con el crecimiento de machine learning e inteligencia artificial, donde la habilidad de los robots ha crecido para desarrollar tareas más complejas (Matthews & Greenspan, 2020).

3.3.1 Automatización en la industria

La automatización industrial ha progresado por más de un siglo. Una fábrica o una planta industrial es tradicionalmente una ubicación donde las cosas son creadas, en donde la materia prima evoluciona y se le agrega valor, pero la digitalización de la industria la está transformando en algo mucho más, como en un conjunto de habilidades, destrezas y sistemas que se vuelven más inteligentes a medida que la tecnología avanza,

permitiendo así a las empresas innovar que, como, quien, cuando y donde se fabrica (Tavallaey & Ganz, 2019).

El trabajo se vuelve más fácil con la automatización, al mismo tiempo la productividad para la empresa sube, el tiempo de ensamblaje bajan, costos laborales y energéticos también bajan. Para los dueños de industrias estas son excelentes noticias, no solo en la industria, si no, en todos los ámbitos que se pueda imaginar, con la inteligencia artificial se ha podido minimizar las decisiones humanas y poder influir en política, medicina y hasta en la psicología, creando robots de acompañamiento social (Rojas & Barbieri, 2019).

Los sistemas de automatización moderna consisten de ensamblar componentes mecánicos y eléctricos comandados por controles digitales. La automatización es el uso de diversos sistemas de controles para operar equipos con la mínima o reducida intervención humana. La automatización industrial trata con la automatización de los procesos de fabricación, control de calidad y manipulación de procesos. Actualmente los sistemas de automatización industrial se caracterizan por los siguientes elementos (Rojas & Barbieri, 2019):

- *Control de supervisión y adquisición de datos (SCADA) por sus siglas en inglés:* Permite a los operarios de las máquinas interactuar con la maquinaria para activar dispositivos o procesos y obtener retroalimentación sobre el estado de la máquina.
- *Control informático:* realiza tanto el control de secuencia como el de retroalimentación, se encarga de la parte de gestión de E/S del sistema de automatización. Sistemas operativos en tiempo real (RTOSs) como también de los controladores lógicos programable (PLCs) son los más utilizados.
- *Interfaz:* Interfaz entre el control del computador, y los sensores y actuadores. Los convertidores se utilizan para transformar las señales eléctricas de los sensores a digitales mientras que los drivers controlan los actuadores.
- *Planta de Automatización:* Consiste en:
 - *Sensores y Actuadores:* respectivamente convierten cantidades físicas a señales eléctricas y desplazan elementos de la planta física.
 - *Planta Física:* La planta a controlar generalmente consiste en mecanismos que transfieren o transforman fuerzas de una forma o dirección a otras.
 - *Alimentación:* Proporciona al sistema la energía necesaria para su funcionamiento. Los bloques de distribución, transformadores, disyuntores, fusibles y relés son ejemplos utilizados.

(Rojas & Barbieri, 2019)

Se puede establecer que los sistemas de automatización industrial han pasado de ser sistemas basados principalmente en la mecánica a agregarle sistemas mecatrónicos. Los sistemas mecatrónicos son definidos como sistemas de elementos computacionales que colaboran controlando entidades físicas. Mecánica, eléctrica y ciencia computacional son integradas en la de automatización industrial.

Una parte fundamental de los cursos de la parte de automatización industrial es que está enfocada en control computacional ya que es el mayor responsable para la operación del sistema. Particularmente, en conceptos de control secuencial como el manejo del comportamiento nominal y excepcional deben ser tratados junto con el software: diseño y verificación, sintaxis y arquitectura y computación en sistemas operativos en tiempo real (Rojas & Barbieri, 2019).

La tendencia general del desarrollo de la industria consiste en el desplazamiento de los humanos de la línea de producción en donde sean reemplazados por un robot (Chadeev & Aristova, 2017).

3.3.2 Automatización en la educación

La implementación física de automatización en la educación se ha visto un poco difícil debido a sus altos costos en estructura. Esto lleva a limitar los cursos de automatización a que solo sean actividades teóricas o virtuales (Rojas & Barbieri, 2019).

Rojas & Barbieri, (2019) mencionan en su investigación

“La implementación de un sistema de automatización a escala con una mezcla de hardware industrial y de prototipos con una bien definida arquitectura de bajo coste permite a los estudiantes experimentar de forma práctica conceptos fundamentales de la automatización industrial”.

En donde la mayor dificultad de repartir conocimiento es el costo de las estructuras presentadas en la automatización industrial debido a su complejidad. En la teoría hacen muchas referencias hacia conceptos de control de mando computacional y una gran cantidad de herramientas que pueden ser simuladas para describir el comportamiento de la automatización, sin embargo, el enfoque de estudios físicos es necesario en la enseñanza para ejemplificar e ilustrar todas las posibilidades de diseño y verificación de softwares y hardware. El alto costo de hardware de automatización hace difícil su

implementación en las universidades y en institutos profesionales. Por otra mano, los precios de algunos prototipos como el de los motores, sensores y controladores han bajado en los últimos años y así llevando nuevas oportunidades educativas a las instituciones (Rojas & Barbieri, 2019).

Por eso en su estudio propuesto según Rojas & Barbieri, (2019) en "A Low-Cost and Scaled Automation System for Education in Industrial Automation" traducido a "Un sistema de automatización de bajo coste a escala para la educación en la automatización industrial ", proponen la implementación de un sistema de automatización a escala en donde los estudiantes puedan llevar un conocimiento práctico básico fundamental en el diseño de desarrollo "SCADA", "PLC", y sistemas de control remoto (Rojas & Barbieri, 2019).

En conclusión, en este proyecto se determinó que la arquitectura funcionó y el sistema propuesto permitía el diseño y verificación de un código PLC permitiendo tener un alcance de implementación física, en donde podrían ser utilizados en cursos de sistemas de automatización industrial como desarrollo de sistemas SCADA y poder controlar remotamente una planta de automatización (Rojas & Barbieri, 2019). Poco a poco se acercará una era en donde el pan diario de los estudiantes en sus cursos será el estudio de la automatización o las tecnologías disruptivas en sí. Las instituciones tendrán que reinventarse para no quedar obsoletas, crear soluciones dependientes de los avances tecnológicos y poder crear un ambiente en donde el estudiante pueda sobresalir con las herramientas adecuadas.

3.3.3 Influencia de la cultura en la automatización

Para algunos, el cambio da miedo, para otros, es excitante, depende de la perspectiva de quien lo vea. Alrededor del mundo existen grandes cantidades de culturas, sociedades, civilizaciones, cada una de ellas tiene una perspectiva de ver las cosas, cada una tiene una diferente reacción al cambio. La tecnología y lo que conlleva a la automatización es un cambio revolucionario en donde en las diferentes partes del mundo son tomadas de alguna u otra manera.

A manera que la innovación tecnológica incrementa a nivel global es necesario estudiar factores que determinan la manera en el que los usuarios de diferentes culturas adoptan

y usan la tecnología. Particularmente es importante que los productos como los de automatización avanzada diseñados por y para un país y cultura sean también de agrado en otros países y culturas (Chien et al., 2020).

El término que ha sido definido para cultura es naturaleza única de un grupo social con respecto a los valores, creencias, normas y prácticas. Las culturas tienen un tema central, que es una recopilación de creencias y prácticas compartidas. Con la construcción de estas presunciones es útil predecir y explicar algunas actitudes y organizaciones sociales, pero no sirven de mucho al tratar de predecir ciertos comportamientos. Se llevó a cabo un estudio el cual tomaron 120 participantes divididos entre Estados Unidos, Taiwán y Turquía en donde se enfocó en las normas de estas culturas lo cual dio un marco más directo y predictivo de como interactúan las personas, forman relaciones y manejan los conflictos. Para un estudio de los efectos transculturales hacia la confianza de la automatización, se hicieron diversos estudios con estos participantes en donde se determinó que la automatización es aceptada, sin embargo tienen que ser readecuadas para el uso en otras zonas, en donde algunas culturas requieren de mecanismos adicionales para poder confiar y ser parte de la transición de las tecnologías de la automatización, es decir la reacción a la confianza a la automatización puede variar de acuerdo a sus mecanismos, es poco imprudente establecer un mecanismo usado en los estados unidos en otras culturas, por así decir la introducción de vehículos autómatas en el país occidental está bien visto, en cambio a una cultura como la de Taiwán, en donde la confianza a los mecanismos autómatas, es un poco reducida, podría causar efectos contraproducentes. (Chien et al., 2020).

3.4 Robótica

Desde los años 60 que George Devol y Joe Engelberger pusieron el primer robot en la fábrica de General Motors en 1961, los robots se han abierto camino en los quirófanos, los laboratorios científicos, los campos de batalla, las situaciones de búsqueda y rescate, en Marte e incluso en los hogares como aspiradoras, juguetes y guardias de seguridad. Hoy en día, los gobiernos, las empresas y los científicos ven la robótica como un componente importante del desarrollo tecnológico, económico y social del siglo XXI. Rodney Brooks, fundador y CTO de "Rethink Robotics, sugiere que una "revolución robótica" es inminente, mientras que Bill Gates, fundador de Microsoft, predice que

pronto se tendrán "robots en cada hogar". El gobierno japonés, por su parte, apoya el desarrollo de "robots asociados" como industria clave de crecimiento (*Robotics History Project - IEEE Robotics and Automation Society*, s. f.)

En si el término robot es un poco generalizado, este término es muy diverso ya que hay robots que caminan en dos, cuatro, seis o más piernas, mientras otros pueden volar en los cielos. Algunos robots ayudan a cirujanos hacer cirugías; otros se afanan en fábricas sucias. Hay robots del tamaño de una moneda y robots más grandes que un carro. Algunos robots pueden limpiar la casa. Otros pueden aterrizar en Marte. Debido a esta diversidad en diseño, capacidades y tamaño hace difícil definir lo que un robot es. Para Rodney Brooks un robot es cualquier tipo de dispositivo que tiene sensores con los cuales monitorean el mundo, hacen algún tipo de computación, decide dependiendo de una acción, y dependiendo de esa acción y de lo que entre por el sensor hace un cambio en el mundo, fuera de su estructura, es decir un robot que está diseñado para limpiar, hace un cambio en el mundo limpiando una alfombra o el piso de las casas. Entonces una definición más concreta de un robot podría ser *"Un robot es una máquina autónoma capaz de detectar su entorno, realizar cálculos para tomar decisiones y realizar acciones en el mundo real"*. Pero muchos expertos relatan que aún no hay una definición perfecta de lo que es un robot (*What Is a Robot?*, s. f.).

En la actualidad que se vive en pandemia, han surgido nuevas ideas y nuevas discusiones acerca de la robótica, han surgido nuevas estrategias para lograr combatir la contaminación del coronavirus, se han dado diferentes aplicaciones de los sistemas robóticos, se han cubierto varios aspectos de las tecnologías modernas, incluyendo la imagen médica, la telemedicina y las cadenas de suministro, con respecto a la pandemia de COVID-19. Además, también se han discutido las preocupaciones sobre la privacidad de los datos de los usuarios, la pérdida de puestos de trabajo y los aspectos legales de la implementación de la robótica (Gupta et al., 2021).

3.4.1 Robótica en la Educación

Esta amplia categoría está dirigida a la próxima generación de robóticos, para su uso en casa o en las aulas. Incluye conjuntos programables de Lego, impresoras 3D con planes de estudio e incluso robots para profesores como *"EMYS"* que es una cabeza robótica

diseñada para enseñar a los niños idiomas extranjeros de forma divertida e interactiva. Puede moverse, hablar y utilizar su expresiva cara para mostrar diferentes emociones y conectar con los usuarios. Otro ejemplo es *"Replicator+"*, una impresora 3D de sobremesa que transforma los diseños digitales en objetos sólidos colocando finas capas de plástico fundido. La utilizan educadores, diseñadores, ingenieros y fabricantes (*Types of Robots - ROBOTS*, s. f.). También se han creado artículos en donde se motiva al estudiante a desarrollar sus habilidades en tecnología, ingeniería y matemáticas en donde ofrecen competencias para representar a Tailandia en concursos asiático (Jitjumnong et al., 2020).

3.4.2 Robótica en la industria

El robot industrial tradicional consiste en un brazo manipulador diseñado para realizar tareas repetitivas. Un ejemplo es el *"Unimate"* fue el primer robot industrial construido. Era un brazo manipulador hidráulico que podía realizar tareas repetitivas. Fue utilizado por los fabricantes de automóviles para automatizar los procesos de metalización y soldadura, el abuelo de todos los robots de fábrica. Esta categoría incluye también sistemas como los robots de almacén de Amazon y los robots de fábrica colaborativos que pueden operar junto a los trabajadores humanos (*Types of Robots - ROBOTS*, s. f.). Cabe destacar que un robot de tamaño medio utilizado en un campo industrial tiene varios errores de parámetros debido a errores en el proceso de fabricación, el envejecimiento, etc., lo que resulta en una disminución de la precisión del trabajo. Existen métodos para calibrar los robots y prolongar su vida útil, hay métodos que usan los parámetros de D-H para este tipo de calibraciones (Lee et al., 2017).

3.4.3 Robótica en la Medicina

Los robots médicos y sanitarios incluyen sistemas como el robot quirúrgico *"da Vinci"* que es un robot quirúrgico diseñado para procedimientos mínimamente invasivos. Tiene cuatro brazos equipados con instrumentos quirúrgicos y cámaras que un médico controla a distancia desde una consola y las prótesis biónicas como *"HAL"* (Hybrid Assistive Limb) por sus siglas en inglés es un exoesqueleto motorizado que puede ayudar en las actividades cotidianas con fines de rehabilitación o multiplicar por 10 la fuerza del usuario. Un sistema que puede encajar en esta categoría, pero que no es un robot, es

Watson, el superordenador de IBM para responder preguntas, que se ha utilizado en aplicaciones sanitarias (*Types of Robots - ROBOTS*, s. f.).

Se han creado diferentes tipos de exoesqueletos, así como se denota anteriormente, para piernas, para brazo etcétera. Un exoesqueleto dentro del significado biomecánico es un dispositivo diseñado para apoyar el esfuerzo humano, asistir la rehabilitación y controlar objetos virtuales o reales, incluyendo la retroalimentación de fuerza según (Herbin & Pajor, 2017). Debido a los resultados obtenidos por la robótica, los médicos han recibido muy bien esta tecnología en donde expresan que la cirugía asistida por robot es la última evolución de las técnicas mínimamente invasivas que han aportado importantes beneficios a los pacientes pediátricos. Supera realmente los límites de la laparoscopia tradicional, ya que permite la disección y sutura en espacios anatómicos estrechos gracias a la visión tridimensional, los instrumentos articulados, la coordinación ojo-mano y la posición ergonómica (Pio et al., 2020).

Es curioso pensar que un médico solo es asistido en cirugías generales básicas, en cambio el avance ha sido progresivo en donde los sistemas quirúrgicos robóticos son relativamente nuevos en el campo de la neurocirugía, y sólo recientemente se han implementado para procedimientos neuroquirúrgicos estereotácticos. Pero no se irá tan a fondo, lo que se trata de resaltar es el avance que ha tenido la robótica lo cual ha llegado a la implantación de cables subtalámicos en pacientes con enfermedad de Parkinson con robots de 6-GDL por su alta precisión (Paff et al., 2020).

3.4.4 Tipos de brazos robóticos

Uno de los tipos de robots que más se está familiarizado son los brazos robóticos, se ha visto mucho de ellos en los canales de investigación industrial en donde se ve cómo trabajan en las fábricas, lo cual millones de ellos están distribuidos a nivel mundial. Se han creado muchos tipos diferentes de brazos robóticos, de los cuales el brazo robótico *en serie* de 6-GDL es de los más comunes, compuesto por una serie de eslabones rígidos y articulaciones accionadas. El brazo robótico *SCARA* (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) por sus siglas en inglés, es rígido en la dirección vertical y obediente en el plano horizontal, lo que supone una ventaja para tareas planas, como el montaje de placas de circuitos electrónicos. Un robot de *pórtico* tiene uno o dos grados de libertad

de movimiento a lo largo de raíles aéreos, lo que le proporciona un volumen de trabajo muy grande. también están los brazos de *eslabones paralelos*, donde tiene sus eslabones conectados en paralelo a la herramienta, lo que aporta una serie de ventajas, como tener todos los motores en la base y proporcionar una estructura muy rígida (Corke, 2017b).

Los manipuladores en serie ofrecen un gran espacio de trabajo con destreza y una fácil solución de la cinemática directa, mientras que los paralelos tienen alta precisión, velocidad, rigidez estructural y capacidad de carga. Tanto los robots en serie como los paralelos tienen ventajas y desventajas. La selección de un robot paralelo o en serie depende de la aplicación. Los brazos en serie funcionan mejor en aplicaciones relacionadas con un gran espacio de trabajo y una manipulación diestra, mientras que los robots en paralelo funcionan mejor en aplicaciones relacionadas con una baja inercia y una alta carga útil (Iqbal et al., 2020). Existe la modificación de sus articulaciones con respecto a un robot paralelo, con el objetivo de darle mayor movimiento al robot, en donde se busca dar una configuración más amplia, donde su trabajo de espacio sea de seis dimensiones, es decir, que se comporte de forma similar a un robot de plena movilidad a costa de introducir nuevas maniobras (Grosch & Thomas, 2019).

Los robots en paralelo han ganado protagonismo debido a limitaciones de otros brazos robóticos en aplicaciones de "pick and place" como en la industria de la comida, electrónica y la industria farmacéutica, en donde robots pórticos o SCARA son usados generalmente. Además, debido a la limitación de minimizar la inercia en movimiento de los robots cinemáticos en serie, los robots paralelos, han recibido una creciente atención debido a sus buenas características dinámicas, tales como una pequeña inercia en movimiento, alta velocidad/aceleración, alta rigidez y alta precisión, en comparación con sus similares convencionales en serie (Kim, 2018).

3.4.5 Propiedades de los robots

Para poder tener una idea más clara de lo que es un robot hay que identificar algunas características. Haciendo comparaciones un robot debe tener "*versatilidad*" donde El potencial estructural/mecánico para realizar tareas variadas y/o realizar la misma tarea de diferentes maneras. Esto implica una estructura mecánica de geometría variable. Todos los robots existentes tienen esta cualidad, debe tener "*autoadaptabilidad*" donde

significa simplemente que un robot debe estar diseñado para lograr su objetivo (la realización de una tarea) por sí mismo, a pesar de los cambios imprevistos, pero limitados del entorno durante la realización de la tarea. Esta capacidad de algunos robots industriales requiere que el robot sea consciente de su entorno, es decir, que tenga sentidos artificiales (Coiffet & Chirouze, 1983).

También se debe tener en cuenta otras propiedades del robot como la posición y orientación, también tener en cuenta sus grados de libertad para determinar su cinemática.

3.4.5.1 Grados de Libertad

Los movimientos en donde el robot pueda desplazarse hay que tomarlos en cuenta. Toda articulación o cada una de ellas tienen sus parámetros. Es importante determinar el número de grados de libertad de cada robot para poder determinar la posición y orientación del robot. Los grados de libertad es la cantidad de parámetros que establecen el escenario del efector final o de la última parte del robot. Normalmente los grados de libertad concuerdan con el número de enlaces o eslabones, pero, pueden haber casos que no sigan esta regla, de tal manera que en general, el número de grados de libertad será de cantidad menor o la misma que el número de eslabones del robot (Baturone, 2005). Aunque en investigaciones recientes se determina que los grados de libertad suelen tener una mejor coincidencia con el número de juntas, es decir, sus articulaciones (Zambrano, 2011).

3.4.5.2 Velocidad

Todo depende de los parámetros obtenidos por la parte final del robot, de su efector final, o de sus juntas. Generalmente entre más velocidad haya, el rendimiento del robot será mejor, lo que se determina que el modelo más rápido, es el más efectivo (Zambrano, 2011).

3.4.5.3 Espacio de Trabajo

Esto se refiere al área en donde la muñeca del robot pueda desplazarse, normalmente son efectores finales, pinzas, manos, entre otras cosas de diferentes dimensiones (Zambrano, 2011).

3.4.5.4 Posición y orientación

Así como se usan los números para el conteo, las unidades para especificar distancia y los escalares para representar vectores. se necesita representar la posición y orientación del robot, en donde en el transcurso de este informe se especifica la combinación de estas dos como ubicación (pose o postura) para determinar los objetos en el espacio, donde en robótica estos objetos son los eslabones. Estas propiedades van ayudar a entender la cinemática de los robots, ya sea cinemática directa como la inversa (Corke, 2017b).

3.5 Convenio Denavit-Hartenberg

El estudio de los robots y sus movimientos va más allá de coordenadas en el espacio, se centra en las dimensiones en su orientación, posición como forma de construcción, es más compleja que solo recibir comandos para sus movimientos. Anteriormente en el tema de cuerpos rígidos se habla de la forma de construcción de un robot, su forma de unirse con juntas o verlo como la analogía de un brazo humano como articulaciones, codo, hombro, muñeca, etcétera lo cual está conformada por cuerpos rígidos llamados eslabones, esos eslabones necesitan relación de movimientos de acuerdo a sus juntas que deben ser analizadas para cumplir ciertos parámetros de movimiento (Corke, 2017b).

Como es habitual en la bibliografía al respecto, las relaciones cinemáticas relativas a los eslabones y a las articulaciones se formulan según el convenio de Denavit–Hartenberg (D–H) (Ozgoren, 2020). Jacques Denavit y Richard Hartenberg introdujeron muchos de los conceptos esenciales para los manipuladores de eslabones (Robots) en serie en su artículo de 1955 (Denavit y Hartenberg 1955) y en su libro clásico “Kinematic Synthesis of Linkages (Hartenberg y Denavit 1964)” en donde se estudia la síntesis cinemática de los enlaces (Corke, 2017a).

Jacques Denavit (1930–2012) nacido en París en donde estudió la licenciatura antes de cursar el máster y el doctorado en ingeniería mecánica en la “Universidad Northwestern de Illinois”. En 1958 se incorporó al Departamento de Ingeniería Mecánica y Ciencias Astronáuticas de la Northwestern, donde se estableció la colaboración con Hartenberg. Además de su interés por la dinámica y la cinemática, Denavit también se interesó por la física y la cinética del plasma. Tras la publicación del libro se trasladó al laboratorio

nacional "Lawrence Livermore", en Livermore, California, en estados unidos, donde se dedicó a investigar el análisis informático de los problemas de la física del plasma. Se jubiló en 1982 (Corke, 2017a).

Richard Hartenberg (1907–1997) nacido en Chicago, estudió en la Universidad de Wisconsin, Madison, estados unidos. Sirvió en la marina mercante y estudió aeronáutica durante dos años en la "Universidad de Göttingen" con el pionero de los vuelos espaciales Theodore von Kármán. Sus investigaciones sobre cinemática hicieron resurgir el interés por este campo en la década de 1960, y sus esfuerzos contribuyeron a dotar a la cinemática de una base científica para su uso en aplicaciones informáticas de análisis y diseño de mecanismos complejos. También escribió mucho sobre la historia de la ingeniería mecánica (Corke, 2017a).

Además, en construcción se puede ver la aplicación D-H, se hizo un estudio en donde presentan un flujo de trabajo completo para la extracción automática de modelos geométricos de estaciones totales robóticas utilizando la convención Denavit-Hartenberg. Proporcionan un conjunto completo de parámetros Denavit-Hartenberg para una estación total robótica ejemplar. Estos parámetros pueden utilizarse en los simuladores robóticos existentes sin necesidad de realizar modificaciones. En adición, se analiza la diferencia entre el modelo geométrico extraído, el modelo calibrado, que es utilizado por los controladores del dispositivo, y la representación esférica estándar para las mediciones de puntos 3D del dispositivo. Para poder tener una idea las estaciones totales robóticas (RTS) por sus siglas en inglés, se utilizan habitualmente para medir puntos en 3D con gran precisión y exactitud. Las aplicaciones varían desde la medición del terreno en la construcción de edificios y carreteras hasta la verificación de la construcción y el control de las deformaciones. Los dispositivos modernos permiten medir distancias y ángulos, proporcionan datos de imagen y compensan automáticamente diversos efectos del sistema, como imprecisiones en la producción, derivas del sensor e influencias ambientales (Klug et al., 2019).

3.5.1 Cinemática

La cinemática es la rama de la mecánica que estudia el movimiento de un cuerpo o de un sistema de cuerpos, sin considerar su masa o las fuerzas que actúan sobre ella. Así

como lo explicado anteriormente un brazo robótico, más formalmente un manipulador de eslabones en serie, comprende una cadena de eslabones rígidos y articulaciones. Cada articulación tiene un grado de libertad, ya sea de traslación (una junta deslizante prismática) o rotacional (una junta revoluta). El movimiento de la junta o articulación cambia la ubicación (postura) relativa de los eslabones que la conectan. Un extremo de la cadena de, la base, suele estar fijada y el otro extremo es libre de moverse en el espacio y sostiene una herramienta o el efector final que realiza algún tipo de trabajo (Corke, 2017a).

La identificación de la cinemática ha sido un punto importante para la determinación de un número mínimo de parámetros que describan completamente la posición y orientación de la estructura de un manipulador como función de la posición de sus articulaciones. Se han creado diversos modelos para caracterizar una estructura cinemática: convención Denavit Hartenberg (D-H) versión estándar y la modificada, EL modelo de Hayati, el modelo de Stone y Sanderson y los modelos reciente de productos exponenciales (POE) por sus siglas en inglés. Aun así, el modelo de la convención (D-H) sigue siendo el más usado para representar la estructura cinemática de un robot. Proporciona una representación mínima garantizada, un método intuitivo para determinar sus parámetros y, lo que es más importante, funciona con álgebra lineal directa cuyas matrices son computacionalmente rápidas de resolver (Faria et al., 2019).

Al describir la postura de las articulaciones identificando sus estructuras cinemáticas podrían evitar problemas de movimientos inciertos e imprecisos, aun así, a veces los problemas de imprecisión derivan de escenarios externos, ya sean factores de ensamblaje en la estructura o problemas de fatiga permanente, entre otras cosas (Faria et al., 2019).

3.5.2 Parámetros D-H para Manipuladores seriales

Un manipulador serial es un sistema mecánico que consiste de n cuerpos movibles con respecto a una base, en este proyecto, se asume que los cuerpos son rígidos, así como explicado anteriormente con los eslabones. Estos cuerpos son ordenados de forma de cadenas cinemática abierta y están conectados a sus eslabones vecinos ya sean por juntas prismáticas o revolutas. Por lo tanto, el número de articulaciones también es n . En

un manipulador serial, todas las juntas son accionadas. Los cuerpos intermedios entre las articulaciones naturalmente se llaman eslabones. Sin embargo, por tener uniformidad terminológica, se establece que la base y el ultimo cuerpo son también llamados enlaces o eslabones (Ozgoren, 2020).

En algún caso la base este fijada a la tierra, podría usarse el término tierra. Para poder tener una mayor comprensión se propuso hacer una analogía con el brazo humano, la parte del robot más allá de la penúltima articulación giratoria se llama mano, el centro de la penúltima articulación giratoria se llama punto de la muñeca, y la parte del manipulador entre la primera articulación y la penúltima articulación giratoria se llama brazo. En donde se comprende que el efector final es parte de la mano. Con un robot de propósito especial, el efector final podría ser uno de los dispositivos como un bolígrafo, un destornillador, una herramienta de perforación, una herramienta de soldadura, una pistola de pintura, una pinza de varios dedos, etc. Considerando un eslabón o una articulación con su posición en la cadena cinemática, se llama *proximal* si está más cerca de la base y *distal* si está más lejos de la base (Ozgoren, 2020). En la ilustración 8 se observa un robot típico de 6 grados de libertad con los ejes de las articulaciones representados como vectores.

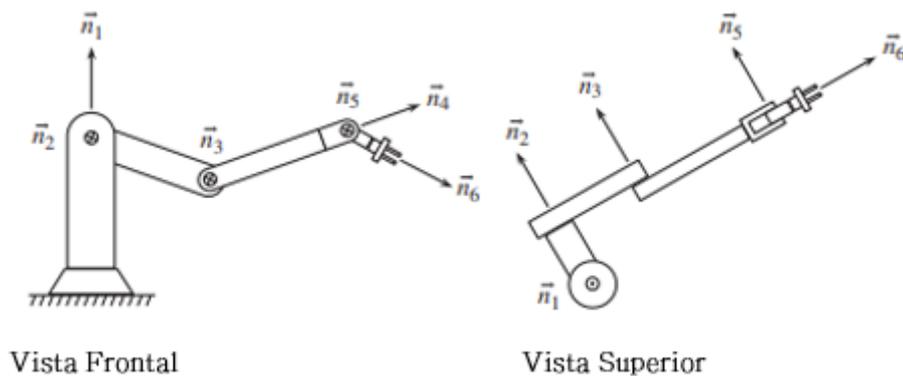


Ilustración 8 Manipulador serial de 6-GDL.

Fuente Galin et al., (2020)

Las características cinemáticas pueden ser descritas convenientemente según la convención de Denavit-Hartenberg (D-H). La convención D-H está basada en los ejes de las articulaciones y las normales comunes (líneas perpendiculares entre ejes) entre ellos. Sin embargo, ha habido diferentes formulaciones propuestas para la convención de D-

H. Aparte de las diferencias de notación, estas formulaciones difieren entre sí básicamente por las reglas de catalogación, que asignan un número de índice a cada una de las entidades relevantes, como las articulaciones variables, los parámetros geométricos constantes, los puntos característicos y los vectores unitarios a lo largo de las articulaciones de los ejes y las normales comunes. La convención D-H fue introducida originalmente en 1955 por Denavit y Hartenberg para describir las características cinemáticas de los mecanismos espaciales que comprenden las articulaciones de un solo eje, como las cilíndricas, revolutas, prismáticas y de tornillo (Ozgoren, 2020).

Basándose en esta convención, Denavit y Hartenberg construyeron matrices de transformación homogéneas de 4×4 para expresar las relaciones cinemáticas entre los eslabones adyacentes de un mecanismo espacial y luego las utilizaron para fines de análisis y síntesis. Aunque también la convención D-H fue introducida para mecanismos espaciales con articulaciones de un solo eje, puede también ser ampliada a otros sistemas mecánicos espaciales que contienen articulaciones de varios ejes, pero no cualquier tipo de juntas de contacto rodante, como las juntas de leva y de engranaje. Por supuesto, esta ampliación requiere una descomposición virtual de todas las juntas de varios ejes del sistema en juntas de un solo eje. Por ejemplo, una articulación esférica puede descomponerse virtualmente en tres articulaciones revolutas con ejes no coincidentes que se cruzan en un único punto (Ozgoren, 2020).

En resumen, la convención D-H es una forma sistemática de describir la geometría y la relación cinemática de una cadena de eslabones seriales y articulaciones (Corke, 2017a).

Para un manipulador de N articulaciones numeradas de 1 a N , hay un número de eslabones $N+1$, numerados de 0 a N . articulación j se conecta con articulación $j-1$ y se mueven relativamente uno respecto a otro. De ellos se deduce que el eslabón l conecta articulación l a la articulación $l+1$. Articulación 0 es la base del robot, típicamente fijada y articulación N , la última articulación del robot, sostiene el efector final o herramienta (Corke, 2017a).

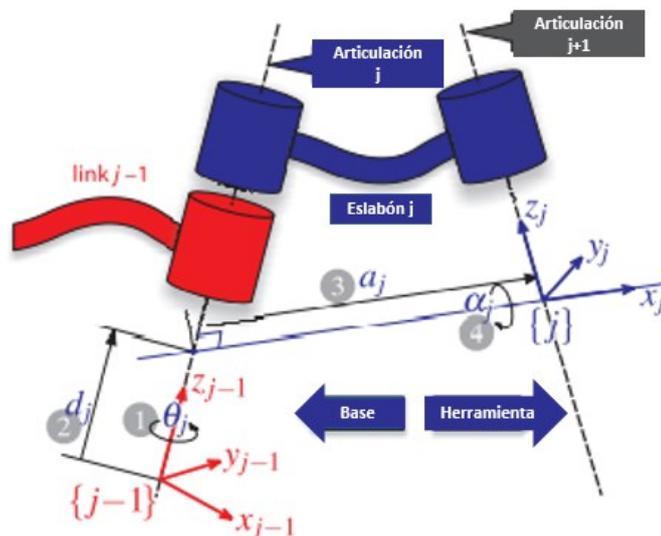
Los cuatro parámetros asociados con la convención D-H son definidos como:

Ángulo de la articulación	θ_j	El ángulo entre los ejes x_{j-1} y x_j sobre el eje z_{j-1}	Articulación revoluta variable
Eslabón de Compensación	d_j	La distancia desde el origen del marco de coordenadas $j-1$ al eje x_j a lo largo del eje z_{j-1}	Articulación Prismática Variable
Longitud del eslabón	a_j	La distancia entre los ejes z_{j-1} y z_j a lo largo del eje x_j ; para los ejes de intersección es paralela a $\hat{z}_{j-1} \times \hat{z}_j$	Constante
Eslabón(enlace) de giro	α_j	El ángulo desde el eje z_{j-1} al eje z_j sobre el eje x_j .	Constante

Tabla 1 Resumen de los parámetros de la convención D-H

Fuente (Corke, 2017a)

En esta notación D-H se puede observar que un eslabón(enlace) define la relación espacial entre dos ejes vecinos, como se mostró en la ilustración 9. Un enlace es especificado por cuatro parámetros. Así como se explicó en el movimiento de los cuerpos rígidos, la relación entre dos marcos de coordenadas implicaría normalmente seis parámetros, tres para traslación y tres para rotación(orientación). Para la notación D-H solo hay 4 parámetros, pero también hay dos restricciones: el eje x_j interseca a z_{j-1} y el eje x_j es perpendicular a z_{j-1} . Una de las consecuencias de estas restricciones es que a veces los marcos de coordenadas de los enlaces no se encuentran realmente en los enlaces físicos del robot. Otra consecuencia es el robot de ser puesto en una configuración en particular (la configuración del ángulo cero) (Corke, 2017a).



Fuente: (Corke, 2017a)

Explicado anteriormente existen algunas diferencias más que todo en las formulaciones propuestas de la convención de D-H, en donde más que todo difieren las reglas de catalogación de los ángulos y de sus juntas donde cambian un número de índice a cada una de las entidades relevantes, como las articulaciones variables, los parámetros geométricos constantes entre otras cosas (Ozgoren, 2020). A continuación, en la ilustración 10 muestra una diferente formulación de la convención D-H, pero siempre dando la misma idea:

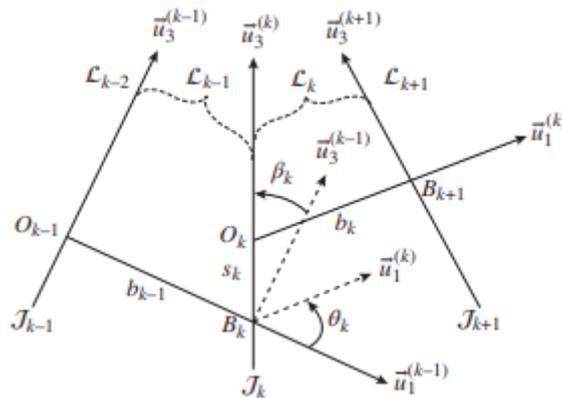


Ilustración 10 Convención D-H para los eslabones intermedios sucesivos y las articulaciones

Fuente (Ozgoren, 2020)

- El ángulo de torsión (β_k) entre los ejes de las articulaciones J_{k-1} y J_k :

$$\beta_k = \angle[\vec{u}_3^{(k-1)} \rightarrow \vec{u}_3^{(k)} \text{ sobre } \vec{u}_1^{(k-1)}]$$

- El ángulo de rotación (θ_k) entre las normales comunes N_{k-1} y N_k :

$$\theta_k = \angle[\vec{u}_1^{(k-1)} \rightarrow \vec{u}_1^{(k)} \text{ sobre } \vec{u}_3^{(k)}]$$

- El eslabón de compensación (s_k) entre las normales comunes N_{k-1} y N_k :

$$s_k = B_k O_k \text{ sobre } \vec{u}_3^{(k)}$$

- La longitud efectiva (b_k) del eslabón L_k entre las articulaciones J_{k+1} y J_k :

$$b_k = O_k B_{k+1} \text{ a lo largo de } \vec{u}_1^{(k)}$$

(Ozgoren, 2020)

En donde se explica lo mismo que β_k y b_k son siempre constantes. El parámetro b_k puede ser llamada la distancia de articulación a articulación de J_k a J_{k+1} . Si se desea especialmente que se denote así b'_{k+1} de modo que $b'_{k+1} = b'_k$. Si J_k es una *articulación revoluta*, entonces θ_k es una articulación variable y s_k es constante. En ese caso s_k es reemplazado por el símbolo d_k en orden de hacer énfasis que el eslabón de compensación es constante. Si J_k es una *articulación prismática*, entonces s_k es la *articulación variable* y θ_k es constante. En ese caso, la variable de compensación s_k puede ser llamada la *distancia deslizante*. Por otra mano, θ_k es reemplazada por el símbolo δ_k en orden de hacer énfasis el hecho de que es constante. El parámetro constante δ_k puede ser llamado *ángulo de desviación* o *ángulo de balanceo*. Un manipulador serial práctico es diseñado de tal manera que sus ángulos de giro sean $\beta_k = 0$ ó $\beta_k = \pm \frac{\pi}{2}$ para todas las $k=1,2,\dots, m$. Además, si la articulación J_k de un robot práctico es prismática, entonces el ángulo de desviación asociado resulta ser $\delta_k = 0$ ó $\delta_k = \pm \frac{\pi}{2}$ (Ozgoren, 2020).

3.5.3 Solución analítica de la cinemática inversa con D-H

Hasta el momento se ha hablado de como determinar la ubicación (Postura) del efector final dadas las coordenadas de articulación, lo cual se conoce como cinemática directa. Pero hay un problema que se debe afrontar con los brazos robóticos y eso es la cinemática inversa, lo contrario de la cinemática directa. En algún caso que se dá la ubicación(postura) deseada del efector final ξ_E ¿Cuáles son las coordenadas articulares necesarias de ese efector final? Por ejemplo, si conocemos la ubicación cartesiana del objeto, ¿qué coordenadas de las articulaciones necesita el robot para alcanzarlo? Este es el problema de la cinemática inversa que se escribe en forma funcional como (Corke, 2017a):

$$q = K^{-1}(\xi)$$

Ecuación 5 Ecuación de Cinemática Inversa

Fuente Corke, (2017a)

Normalmente esta función no es única, es decir, varios vectores de coordenadas articulares q darán como resultado la misma ubicación(postura) del efector final. Se pueden utilizar dos enfoques para determinar la cinemática inversa. En primer lugar,

puede determinarse una solución analítica o de forma cerrada mediante enfoques geométricos o algebraicos. Sin embargo, esto resulta cada vez más difícil a medida que aumenta el número de articulaciones del robot, y para algunos manipuladores de eslabones en serie no existe ninguna solución de forma cerrada. En segundo lugar, puede utilizarse una solución numérica iterativa (Corke, 2017b). Así como lo explicado, la solución de la cinemática inversa de los robots va a ser diferente dependiendo de sus grados de libertad, a continuación, se estarán observando los estudios realizados por diferentes artículos hacia los robots de 6 y 7 grados de libertad.

Agregando que puede haber otros métodos efectivos para la solución del movimiento de los eslabones y la ubicación de las articulaciones en espacios tridimensionales. Hay estudios que establecen que si se introducen posiciones clave y se definen como posiciones cartesianas de las articulaciones del codo y la muñeca del manipulador. Las posiciones clave se utilizan como restricciones en la cinemática inversa, además de las restricciones de orientación en el efector final, de manera que la cinemática inversa puede calcularse mediante un esquema analítico eficiente y realiza configuraciones similares a las humanas. Para obtener las posiciones clave adecuadas, se deriva un método de correspondencia denominado muñeca-codo en línea para mapear las posiciones clave de las demostraciones humanas al robot real para obtener una solución cinemática inversa analítica válida (Liu et al., 2017). Mas adelante se estará viendo el método D-H comparado con algunos otros métodos.

3.5.3.1 Estudio de la cinemática inversa a 6 Grados de libertad.

La tecnología robótica ha sido aplicada a una gran escala a nivel mundial. Apuntando al movimiento de los robots de 6 grados de libertad, su estructura y los parámetros de sus enlaces deben ser analizados, así como también los modelos de cinemática directa e inversa deben ser deducidos por la convención D-H. Las investigaciones sobre el análisis de la cinemática de los robots y la planificación de las trayectorias es el punto crítico de la investigación actual (Zheng et al., 2019).

Muchos investigadores han usado el método D-H para hacer un análisis de la cinemática de un robot y se asisten de herramientas extras para poder simularlas, logrando ver imágenes tridimensionales para verificar la precisión en tiempo real de la cinemática. Las

investigaciones cinemáticas se centran en dos categorías: cinemática directa y cinemática inversa de un robot. Para un brazo robótico, se entiende que son cadenas de eslabones y articulaciones. Cada articulación accionada de forma independiente determina un grado de libertad del robot. Como se ha venido observando para describir la relación entre los eslabones, se establece un sistema de coordenadas en cada articulación del eslabón, y la posición entre los sistemas de coordenadas puede describirse convenientemente mediante la transformación homogénea (Zheng et al., 2019).

Para resolver la cinemática inversa se debe de saber que, el movimiento del efector final del robot en el espacio se realiza controlando el movimiento de cada articulación. Para garantizar que la posición y la postura del efector final del robot alcancen un objetivo determinado o se muevan a lo largo de una trayectoria continua para completar una tarea específica. Para poder hacer el estudio matemático de la cinemática inversa de un robot de 6 grados de libertad es necesario sacar todas las variables, en este caso se determinó que el brazo robótico a estudiar está compuesto por 5 eslabones L1, L2, L3, L4, L5 y 6 articulaciones J1, J2, J3, J4, J5, J6. Se obtuvo los parámetros D-H mostrados en la tabla 2. Al hacer la matriz de transformación de todas sus articulaciones con sus respectivos eslabones respecto a la tabla 2 sobre los parámetros D-H se establece la siguiente ecuación 6 debido a la matriz realizada (Zheng et al., 2019). Las variables de notación están sujetas al investigador (Zheng et al., 2019).

Articulación	Variable	<i>d</i>	<i>a</i>	α	cos α	sen α
1	θ_1	<i>d1</i>	0	90°	0	1
2	θ_2	<i>d2</i>	<i>a2</i>	0	1	0
3	θ_3	<i>d3</i>	<i>a3</i>	90°	0	1
4	θ_4	<i>d4</i>	0	90°	0	1
5	θ_5	<i>d5</i>	<i>a5</i>	90°	0	1
6	θ_6	<i>d6</i>	0	0	1	0

Tabla 2 Parámetros D-H Robot de 6 grados de Libertad

Fuente: (Zheng et al., 2019)

$${}^0T_6 = A_0 {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6$$

Ecuación 6 Ecuación de Transformación

Fuente: (Zheng et al., 2019)

Logrando hacer la matemática se logró una configuración en específico para este robot correspondiente a cada ángulo donde se resuelven sus variables (Zheng et al., 2019):

$$\theta_1 = \arctan \frac{p_y - a_y d_6}{p_x - a_x d_6}$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{d_4 c_3}{d_4 s_3 - a_2} - \arctan \frac{k}{\pm \sqrt{(d_4 c_3)^2 + (d_4 s_3 - a_2)^2 - k^2}}$$

$$\theta_3 = \arcsin \frac{a_2^2 + d_4^2 - [(p_x - a_x d_6)^2 + (p_y - a_y d_6)^2 - (p_z - d_1 - a_z d_6)^2]}{2a_2 d_4}$$

$$\theta_4 = \arcsin \frac{s_1 a_x - c_1 a_y}{s_5}$$

$$\theta_5 = \arcsin \left[-(c_1 a_x + s_1 a_y) s_{23} + c_{23} a_z \right]$$

$$\theta_6 = -\arctan \frac{(c_1 o_x + s_1 o_y) s_{23} + c_{23} o_z}{(c_1 n_x + s_1 n_y) s_{23} + c_{23} n_z}$$

Ecuación 7 Cinemática inversa de robot 6-GDL

Fuente: (Zheng et al., 2019)

Debido a su gran cantidad de ángulos que las articulaciones pueden tomar, es difícil lograr obtener un número determinado de formas de posición para el robot. Así como lo discutido anteriormente, se puede decir que no exista una solución para poder determinar la configuración exacta donde el robot se posicione y oriente según a una configuración donde se quiera llegar, más que todo en posturas lejanas al alcance (Corke, 2017a).

Para ejemplificar este caso en donde no hay una sola solución para la configuración de la cinemática inversa, se tomó la investigación de Jun-Di Sun en donde hace un análisis parecido al anterior, también con robot de 6 grados de libertad, en donde muestra unos parámetros diferentes con cada junta (Sun et al., 2017).

Articulación	Variable	d	a	α	$\cos \alpha$	$\sen \alpha$
1	θ_1	$d1$	0	90°	0	1
2	θ_2	$d2$	$a2$	0	1	0
3	θ_3	$d3$	$a3$	0	1	0
4	θ_4	$d4$	0	90°	0	1
5	θ_5	$d5$	0	-90°	0	-1
6	θ_6	$d6$	0	0	1	0

Tabla 3 Parámetros D-H Robot de 6 grados de Libertad

Fuente: (Sun et al., 2017)

Sun logró obtener su matriz homogénea, para después resolver sus variables. dando diferentes resultados a los realizados por la investigación anterior:

$$\theta_1 = \text{Atan2} \left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{d_4}{\rho} \right)^2}, -\frac{d_4}{\rho} \right) - \text{Atan2} \left(\frac{b}{\rho}, \frac{a}{\rho} \right)$$

$$\theta_2 = \text{A tan 2} \left(\frac{y}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}, \frac{x}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \right) - \text{A tan 2} (a_3 S_3, a_2 + a_3 C_3)$$

$$\theta_3 = \text{A tan 2} (S_3, C_3)$$

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3$$

$$\theta_5 = \text{Atan2} (S_3, C_3)$$

$$\theta_6 = \text{Atan2} \left(\frac{o_x S_1 - o_y C_1}{-S_5}, \frac{n_x S_1 - n_y C_1}{S_5} \right)$$

Ecuación 8 Cinemática inversa de robot 6-GDL 2

Fuente: (Sun et al., 2017)

3.5.3.2 Estudio de la cinemática inversa a 7 Grados de libertad.

Para el estudio de estos robots es necesario también tomar en cuenta que se va agregar una articulación más, lo que implica que hay factores que cambian con respecto a los estudios anteriores, el procedimiento es bastante parecido ya que hay que establecer variables similares, pero aun así el estudio y los resultados, serán diferentes. Según Chen relata en su estudio que un robot de 7 grados de libertad es un robot que tiene la habilidad de evadir los obstáculos o la singularidad de más de una manera, y así mejorar el rendimiento de la producción. Sin embargo, expresa que resolver su cinemática inversa es un poco más complicado ya que tiene un grado de libertad más de lo que es necesario para cubrir toda un área de trabajo. En su estudio el opto por usar un método geométrico para solucionar la cinemática inversa del robot. Siempre la convención D-H fue usada en su experimento (Chen et al., 2018).

Como se había mencionado anteriormente, es el método más adecuado para relacionar la cinemática de sus eslabones en donde recurren como la mejor opción para solucionar la cinemática de robots, en estos casos, robots de 7 grados de libertad (Chen et al., 2018; Lu et al., 2016; Zaplana et al., 2018) . Varios estudios concuerdan que un robot de 7 grados de libertad puede evitar la singularidad optimizando la producción.

Zaplana et al., (2018) expone en su estudio la singularidad como:

- a. "Corresponden a configuraciones desde/hacia las que el elemento terminal no puede trasladarse o rotar en alguna o algunas direcciones del espacio.
- b. Representan configuraciones en las que se requieren velocidades articulares no acotadas para obtener velocidades finitas del elemento terminal".

Debido a su peculiaridad de tener un grado de libertad de más, un robot de 7 grados puede tener sus ventajas para mejorar los rendimientos operacionales, como evitar obstáculos que uno de 6 no pueda, prevenir limitaciones de sus articulaciones, aumentar el torque. Debido a las diversas ventajas es que muchas empresas han optado por esta tecnología (Chen et al., 2018). En comparación con un robot de 6-GDL, un robot de 7-GDL tiene sus características de una mejor cinemática, flexibilidad y precisión de movimiento. Puede evitar eficazmente el problema de los puntos singulares existentes en los robots de 6-GDL. Puede aplicar para trabajos con requisitos de alta precisión y entornos complejos de procesamiento completo (Guicheng et al., 2019). Pero al mismo

tiempo, la solución de su cinemática inversa es mucho más difícil de solucionar por su grado de libertad extra lo que ocasiona infinitas soluciones, por lo cual, en el control real, hay que elegir una solución singular entre las infinitas que hay (Chen et al., 2018). Diferentes métodos se han aplicado para solucionar la cinemática inversa de un robot de 7-GDL, por ejemplo, Chen, recurre a un método basado en la geometría en donde todos los eslabones(enlaces) son simplificados como vectores para que los ángulos de sus articulaciones sean de fácil cálculo. Usando el algoritmo D-H y logrando la configuración de sus articulaciones y la de sus eslabones se establecen los parámetros D-H para obtener la matriz de transformación de acuerdo a $i-1$ e i (Chen et al., 2018). Al hacer los cálculos numéricos y resolviendo las matrices homogéneas se obtiene la solución de la cinemática para los ángulos de los grados de libertad con respecto a la siguiente ecuación 9:

$$\theta_1 = \text{atan2}(\overline{SE}_y, \overline{SE}_x)$$

$$\theta_2 = \pm \cos^{-1} \frac{\overline{OS} \cdot \overline{SE}}{\|\overline{OS} \cdot \overline{SE}\|}$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(\overline{EW}_y, \overline{EW}_x)$$

$$\theta_4 = \pm \cos^{-1} \frac{\overline{SE} \cdot \overline{EW}}{\|\overline{SE} \cdot \overline{EW}\|}$$

$$\theta_6 = \pm \cos^{-1} \frac{\overline{EW} \cdot \overline{WT}}{\|\overline{EW} \cdot \overline{WT}\|}$$

$$\theta_7 = \text{atan2}({}^6R_{7(2,1)}, {}^6R_{7(2,2)})$$

Ilustración 11 Modelo Matemático Chen

Fuente: (Chen et al., 2018)

De acuerdo a las ecuaciones 9 se obtienen los valores numéricos de la tabla 4.

Grupo	$\theta_1 \text{rad}$	$\theta_2 \text{rad}$	$\theta_3 \text{rad}$	$\theta_4 \text{rad}$	$\theta_5 \text{rad}$	$\theta_6 \text{rad}$	$\theta_7 \text{rad}$
1	0.0794	0.8307	0.9175	2.1682	2.2225	1.3834	-24872
2	0.0794	0.8307	0.9175	2.1682	-0.9191	-1.3834	0.6544

3	0.0794	0.8307	-2.2241	-2.1682	-0.9191	1.3834	-24872
4	0.0794	0.8307	-2.2241	-2.1682	2.2225	-1.3834	0.6544
5	-3.0622	-0.8307	-2.2241	2.1682	2.2225	1.3834	-24872
6	-3.0622	-0.8307	-2.2241	2.1682	-0.9191	-1.3834	0.6544
7	-3.0622	-0.8307	0.9175	-2.1682	-0.9191	1.3834	-24872
8	-3.0622	-0.8307	0.9175	-2.1682	2.2225	-1.3834	0.6544

Tabla 4 Resultados computacionales de la cinemática inversa método D-H.

Fuente (Chen et al., 2018)

En cambio, Li, se sustenta hacia un nuevo método para la solución de la cinemática inversa. Este método consta de separar los grados de libertad en secciones, en donde desacopla la estructura espacial del brazo del robot para obtener los ángulos de rotación de las articulaciones 4, 5 y 6 en función de la distancia del extremo del brazo al origen, la relación entre los valores de los tres primeros ángulos y la posición espacial del punto objetivo se obtiene a través de la rotación de coordenadas. Al final los resultados se validan con cálculos numéricos. En concreto, se centra en cómo derivar ecuaciones para el espacio factible del punto final de cada articulación y, correspondientemente, el ángulo factible de cada articulación dado el punto final del brazo robótico (Li et al., 2018).

Para la validación numérica de este método se usó Matlab. Se determinó que no vale de nada que la rotación del ángulo de la séptima articulación no fue considerada en la simulación, debido a que la rotación de esta articulación no cambia la posición de la parte final del brazo. Se dedujo que para cada punto fijado se obtendrán dos series de los ángulos ($\theta_4\theta_5\theta_6$) de acuerdo a los estudios matemáticos. Se seleccionaron dos series de esos ángulos para verificación. La primera serie con coordenadas (59.84, 30.36, 15.60). También se determinó con las ecuaciones que para las series ($\theta_4\theta_5\theta_6$) se tendrían demasiadas series de ($\theta_1\theta_2\theta_3$) para mover el punto final del brazo a un punto objetivo, en donde se eligieron otros valores para estos tres últimos ángulos. Basados en estos ángulos se podría calcular el espacio vectorial de cada articulación de acuerdo a la tabla 5. Para esta primera serie de ángulos

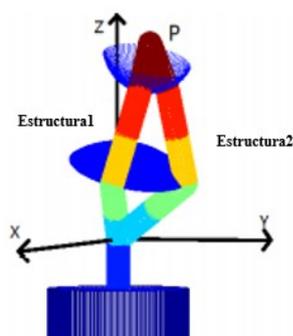
$(\theta_1\theta_2\theta_3\theta_4\theta_5\theta_6)$, se puede calcular las coordenadas del punto final del brazo robótico a manipular (Li et al., 2018).

Coordenada	θ_1rad	θ_2rad	θ_3rad	θ_4rad	θ_5rad	θ_6rad
x	0.00	0.34	0.67	1.21	1.75	2
y	0.00	1.59	3.19	2.94	2.70	2
z	0.00	1.16	2.32	4.23	6.14	8
Ángulos de rotación	168.09	54.51	160.20	59.84	30.36	15.60

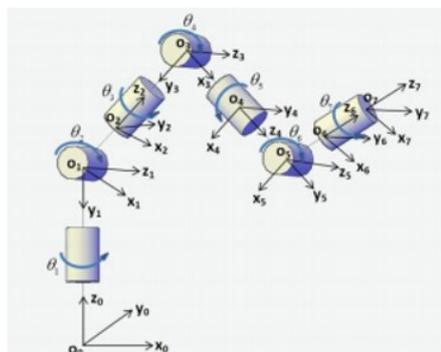
Tabla 5 Resultados computacionales de la cinemática inversa método espacio de vectores

Fuente: (Li et al., 2018)

Aquí se observan dos soluciones para la cinemática inversa de los robots 7-GDL, cabe destacar que cada uno con un brazo robótico de diferentes estructuras, en donde se reflejó que los métodos usados requieren cálculos de matrices, cálculos de ecuaciones entre otras cosas. Los estudios hechos por el método D-H se denotan más precisos de acuerdo que describen cada articulación por si sola (Chen et al., 2018; Gong et al., 2019; Lu et al., 2016; Yang & Zhang, 2018; Zaplana et al., 2018). Aunque existen métodos alternos para la solución de la cinemática inversa que pueden ser efectivos a la solución (Guicheng et al., 2019; Li et al., 2018). En la ilustración 12 se observa el modelaje hecho por cada una de las soluciones expuestas anteriormente .



Método de espacio de vectores Fuente: (Li et al., 2018)



Método geométrico Fuente: (Chen et al., 2018)

Ilustración 12 Solución a la cinemática inversa 7-GDL

Fuentes: Chen et al., (2018); Li et al., (2018)

3.5.4 Comparación de la convención D-H con la teoría del tornillo

A medida que la industria crece, también el uso de los robots se incrementa, donde ha llevado a crear diferentes formas de estudio de estos robots, donde las acciones y movimientos de las articulaciones. Con sus eslabones son analizados a detalle para que ejecuten los movimientos deseados. La orientación y posición en conjunto con los algoritmos de su cinemática inversa pueden determinar el desplazamiento de rotación y traslación de cada una de sus articulaciones. La cinemática inversa es uno de los problemas más importantes y ampliamente estudiados en robótica. Existen múltiples métodos matemáticos para resolver el problema de la cinemática inversa, así como lo se ha observado. Se estudiaron tres métodos, el método de desacoplamiento cinemático basado en el algoritmo D-H, el método basado en el tornillo y un método iterativo. Con el método involucrado el algoritmo D-H es una solución de forma cerrada que divide el problema de la cinemática inversa en dos problemas: posición y orientación. Este método es apropiado para los robots que tienen un brazo y una muñeca, donde los ejes de la articulación de la muñeca están alineados en un punto. Definiendo la posición y orientación deseadas, así como el punto de la muñeca, es posible calcular las 3 primeras articulaciones que definen la posición del robot ($\theta_1\theta_2\theta_3$). Una vez conocidas las tres primeras articulaciones y la matriz de orientación del efector final, se obtienen las siguientes variables de articulación (Becerra et al., 2019).

El método basado en el tornillo se utiliza en el estudio cinemático de los mecanismos, esta teoría se utiliza principalmente para analizar la posición de una cadena cinemática. Mediante entidades geométricas, se define un eje para representar la rotación y la traslación en un robot. Este método permite expresar las velocidades angulares del cuerpo y las velocidades lineales en un punto que coincide con el origen. El movimiento instantáneo de un cuerpo rígido se analiza en relación con un sistema de referencia.

Los métodos iterativos permiten realizar cálculos a partir de aproximaciones progresivas de una semilla. Los métodos indirectos dan lugar a una sucesión de vectores que convergen a la solución; el cálculo se concluye cuando se encuentra la solución más aproximada después de algunas iteraciones. Para facilitar la interpretación de los movimientos y posiciones del robot, es necesario utilizar las coordenadas cartesianas x , y , z . La disposición de la articulación de desplazamiento se determina para lograr la

posición deseada del efector final. Después de hacer un análisis matemático exhaustivo con diferentes robots se determinó que el modelado de los tornillos permite una solución analítica directa y cerrada, incluyendo los manipuladores de base flotante. Sólo hay que utilizar dos marcos: La base y el efector final, y vectores libres. El método donde fue usado el algoritmo D-H de desacoplamiento y el método del tornillo permiten la misma solución con dos enfoques diferentes, uno con el desacoplamiento con matrices de transformación homogéneas, es decir con relación de tramas entre cada articulación del robot, y dos tramas adicionales, base y efector final. Otro del tornillo en donde se enfoca en torsión relacionada con cada articulación del robot, es decir, con dirección vectorial libre en cada articulación del robot, y dos marcos: base y efector final. Al final el método de desacoplamiento(D-H) es mucho más rápido que el método basado en tornillos y el método iterativo; sin embargo, el método de desacoplamiento no evita las singularidades mientras que el método basado en tornillos sí lo hace. El método iterativo no es adecuado para este brazo robot, porque a veces no es posible la convergencia, por lo que no hay solución, para alcanzar algunas configuraciones de la mano en el espacio 3D (Becerra et al., 2019).

IV. Metodología

En este capítulo se observará el enfoque que se le dará al proyecto, así mismo detallar la metodología de investigación a trabajar, interpretando las etapas y fases del avance, junto con el análisis de esta investigación. Se expondrán tanto las variables dependientes como las independientes, técnicas aplicadas, instrumentación utilizada en el análisis y un cronograma que describa las actividades realizadas para la elaboración del modelo matemático para un robot de 7-GDL con el convenio "Denavit-Hartenberg".

4.1 Enfoque

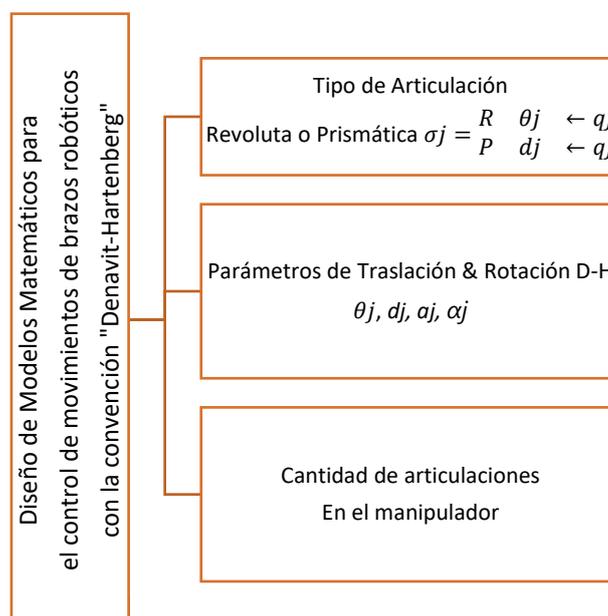
Se determinó que en esta investigación se dará un enfoque cuantitativo, en donde se analizará la información matemática dada por los datos obtenidos en las diferentes etapas, dando como objetivo la obtención de los modelos matemáticos que definan los parámetros de la posición del efector final con respecto de las coordenadas de sus articulaciones, siguiendo el algoritmo "Denavit-Hartenberg".

4.2 Variables de investigación

Ya una vez determinado el enfoque, se ha decidido fijar las variables protagonistas en esta investigación. Las variables a tomar en cuenta serán las variables dependientes e independientes, donde de esta última puede haber varias. Las variables independientes tienen la influencia al cambio sobre la variable dependiente, en donde al haber un cambio en valores de las variables independiente afectan directamente al cambio en las dependientes.

Ilustración 13 Variables de Investigación

Fuente: propia (2021)



El diseño de los modelos matemáticos será la variable dependiente, se refleja que su cambio dependerá del tipo de articulación σ_j , en donde los resultados variarán si es una articulación prismática o revoluta, también siendo variable independiente los parámetros que determinaran las transformaciones para poder llegar al diseño de los modelos. La cantidad de articulaciones va influir en las variables a tomar en cuenta para el diseño del modelo.

4.3 Técnicas e instrumentación aplicados

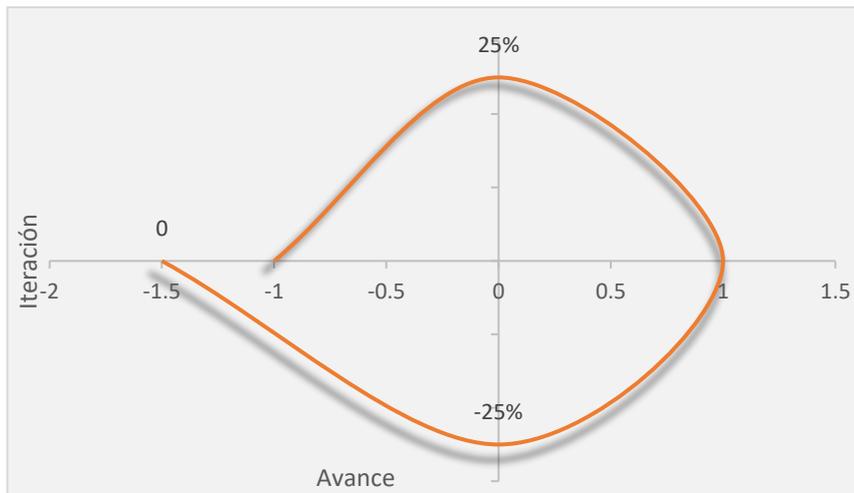
Diseñar un modelo matemático conlleva una serie de herramientas para llevar a cabo su simulación y comprobación de funcionamiento. Se utilizará el simulador MATLAB® para la comprobación del modelo matemático, así también el simulador de CoppeliaSim versión educativa para la simulación de los robots modelos. Se utilizará la ayuda del Toolbox Robotics de Peter Corke, como también el Toolbox de Simple Robotics de César Chávez para poder llevar a cabo la simulación de los modelos matemáticos.

4.4 Metodología de estudio

En este capítulo de la investigación se estará introduciendo el método de estudio aplicado para el desarrollo de la problemática planteada. La metodología que se utilizara es la espiral en donde originalmente fue propuesta por el analista Barry Boehm, donde especifica que es un modelo evolutivo de constante crecimiento en cada iteración obtenida, este modelo está dividido en regiones de trabajo o de tareas que dentro de ellas habrán conjuntos de tareas que son adaptadas al proyecto a realizar (Php, 2009).

Este conjunto de tareas según Boehm se divide en 4 sectores, *planeación*, donde se da el inicio, determinando los objetivos, restricciones y alternativas. Según Boehm con cada vuelta de la espiral, o llamada iteración, el tamaño del entregable y su funcionalidad se incrementará, como segunda región está el *análisis de riesgos* donde es revisado y evaluado todo de lo que pueda fallar en el proyecto. La región de *implementación* sugiere el desarrollo de lo planeado y así verificar y validar lo condicionado anteriormente en los riesgos. Por último, se llega a la región de *evaluación*, donde en sí, se enfoca en determinar si es recomendable el avance del proyecto hacia la próxima vuelta o iteración y dar ideas de planificación para la siguiente iteración (G, 2020).

4.4.1 Iteración I. Diseño del diagrama Cinemático



Gráfica 1 Primera iteración con el diseño del diagrama cinemático

Fuente Propia (2021)

Etapa I. Planeación.

Dibujar el diagrama de robot dependiendo de sus movimientos realizados, haciendo uso de la hoja de datos del robot, como dimensiones de sus eslabones principales, número de articulaciones, tipos de articulación etcétera.

Etapa II. Análisis de Riesgos.

Los riesgos a tomar en cuenta en la etapa inicial es que al momento que los datos obtenidos no sean los correctos, las transformaciones homogéneas no darán datos precisos en donde afectara las matrices resultantes de estas transformaciones.

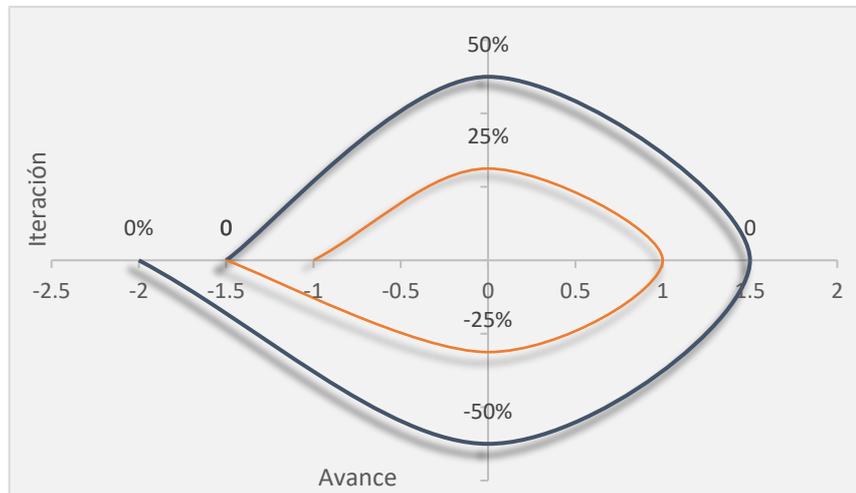
Etapa III. Implementación.

Al haber tomado en cuenta los riesgos en la etapa anterior se puede empezar a desarrollar el esquema cinemático del robot, para eso se dibujará el diagrama, se detallará con simbología estándar el tipo de juntas utilizadas, como también nombrar las variables a tomar en cuenta en el algoritmo D-H.

Etapa IV. Evaluación.

En esta etapa se evalúa la implementación del objetivo, considerándolo un éxito, se comenzará a preparar la siguiente iteración, en donde se tendrá como objetivo implementar el algoritmo D-H en el diagrama realizado.

4.4.2 Iteración II. Implementación del algoritmo D-H



Gráfica 2 Segunda iteración con la implementación del algoritmo D-H

Fuente Propia (2021)

Etapa I. Planeación.

Una vez teniendo el diagrama se planea implementar el algoritmo D-H con sus cuatro parámetros en el espacio, de rotación y traslación en los ejes z y x, para proseguir con el llenado de la tabla D-H.

Etapa II. Análisis de Riesgos.

Hay diferentes riesgos que tomar en cuenta en esta iteración, hay que ser preciso en seguir los pasos del algoritmo, como tener en cuenta sus restricciones acerca del eje y, en caso que el llenado de la tabla no sea preciso siguiendo las reglas estipuladas, se llega al riesgo de no tener los resultados correctos, lo cual afectaría el resultado matemático de las matrices.

Etapa III. Implementación.

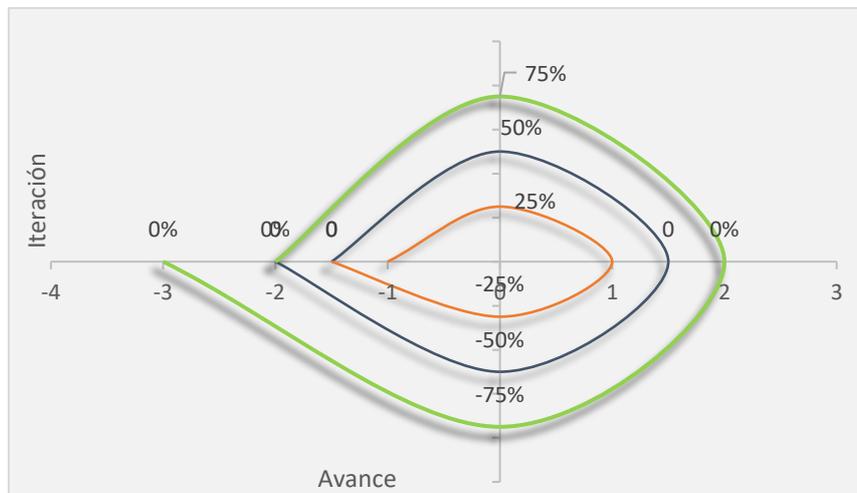
Al tener conocimiento de los riesgos se procede al desarrollo planeado en esta iteración. Se establecen una serie de pasos para aplicar el algoritmo D-H, en donde se toman en cuenta sus restricciones, así como también su configuración en el eje z.

- Localizar y asignar los ejes de las articulaciones z.
- Establecer el marco de referencia del origen.
- Localizar los orígenes de todos los sistemas de coordenadas $x_i y_i z_i$.
- Establecer todas las x_i a través del origen de los sistemas.
- Establecer todas las y_i a través del origen de los sistemas
- Establecer el sistema de coordenadas en el efector final
- Definir y llenar la tabla D-H con los parámetros $\theta_j, d_j, a_j, \alpha_j$ siguiendo el algoritmo.

Etapa IV. Evaluación.

Al haber implementado la planeación y comprobar que fue exitosa, se inicia a planificar la siguiente etapa en donde se busca obtener una matriz simplificada conforme a la tabla D-H.

4.4.3 Iteración III. Resolución Matrices.



Gráfica 3 Tercera iteración con la resolución de matrices.

Fuente Propia (2021)

Etapa I. Planeación.

Como objetivo de esta etapa se tendrá la resolución de las matrices y así obtener su simplificación, todo esto con la ayuda de Matlab, en donde también se simulará el modelo matemático de la cinemática de los brazos robóticos.

Etapa II. Análisis de Riesgos.

Los riesgos a tomar en cuenta en esta etapa van de la mano con los resultados obtenidos anteriormente, en donde si la matemática no es precisa, las coordenadas obtenidas al final no serán de un resultado conveniente.

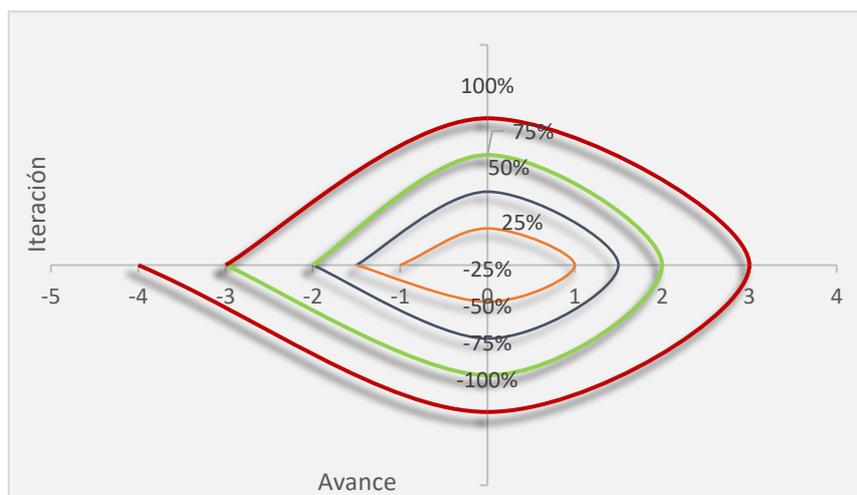
Etapa III. Implementación.

Una vez analizado los riesgos, se decide resolver las ecuaciones y matrices en el simulador Matlab donde se plantea la forma simplificada de la matriz final.

Etapa IV. Evaluación.

En este punto se realizan las correspondientes ecuaciones y determinar el modelo matemático final del robot, en donde da la oportunidad de planificar la siguiente iteración de simulaciones.

4.4.4 Iteración IV. Simulaciones



Gráfica 4 Cuarta iteración con simulaciones de comprobación .

Fuente Propia (2021)

Etapa I. Planeación.

Una vez resueltos los objetivos anteriores se plantea la visión de simular el modelo matemático en Matlab como así en el simulador de CoppeliaSim comprobando los resultados de coordenadas en ambos simuladores, resaltando la comparación de ambos robots de 6 y 7-GDL.

Etapa II. Análisis de Riesgos.

Los riesgos a tomar en cuenta son que los simuladores no cuenten con las funciones necesarias para poder hacer la comparación, como por ejemplo el simulador CoppeliaSim no cuente con los robots necesarios a simular o que Matlab no pueda sincronizarse con SolidWorks.

Etapa III. Implementación.

En esta etapa se pretende implementar la planeación de esta iteración, en donde los riesgos fueron analizados. Se simulará el modelo matemático en Matlab y comprobar las coordenadas resultantes en el simulador CoppeliaSim, validando su similitud en ambos simuladores, también se simularán los robots de 6 y 7-GDL logrando su comparación.

Etapa IV. Evaluación.

En este punto se considera comparar ambos brazos robóticos y comprobar el diseño del modelo matemático del robot.

4.5 Metodología de validación

Esta dependerá en los resultados que se obtengan en las simulaciones. En donde a base de los resultados obtenidos en Matlab se comprobarán en el simulador del robot, dando así la validación y efectividad de los modelos matemáticos.

4.6 Cronograma de Actividades

A continuación, se observa el cronograma de actividades necesarias de estas 10 semanas que se llevó acabo la investigación de este proyecto, delineando los entregables con fechas a su derecha.

▾ Fase 1	63 días	lun 18/1/21	mié 31/3/21
▾ Semana 1	6 días	lun 18/1/21	lun 25/1/21
Propuesta del Proyecto Investigación	6 días	lun 18/1/21	lun 25/1/21
▾ Semana 2	6 días	lun 25/1/21	lun 1/2/21
Planteamiento del Problema	6 días	lun 25/1/21	lun 1/2/21
▾ Semana 3	6 días	lun 1/2/21	lun 8/2/21
Marco Teorico	6 días	lun 1/2/21	lun 8/2/21
▾ Semana 4	6 días	lun 8/2/21	lun 15/2/21
Realizar Metodología de La investigación	6 días	lun 8/2/21	lun 15/2/21
▾ Semana 5	6 días	lun 15/2/21	lun 22/2/21
Diseño de modelos Matemáticos	6 días	lun 15/2/21	lun 22/2/21
▾ Semana 6	6 días	lun 22/2/21	lun 1/3/21
Simulaciones de modelos matemáticos	6 días	lun 22/2/21	lun 1/3/21
▾ Semana 7	6 días	lun 1/3/21	lun 8/3/21
Paper Científico	3 días	lun 1/3/21	jue 4/3/21
Análisis de Resultado.	3 días	jue 4/3/21	lun 8/3/21
▾ Semana 8	6 días	lun 8/3/21	lun 15/3/21
Conclusiones	6 días	lun 8/3/21	lun 15/3/21
▾ Semana 9	6 días	lun 15/3/21	lun 22/3/21
Avance Final	3 días	lun 15/3/21	jue 18/3/21
Preparación de la Presentación	3 días	jue 18/3/21	lun 22/3/21
▾ Semana 10	8 días	lun 22/3/21	mié 31/3/21
Práctica de la presentación final.	8 días	lun 22/3/21	mié 31/3/21

Ilustración 14 Cronograma de actividades

Fuente: propia (2021)

V. Análisis y Resultados

A través del marco teórico se analizó la literatura de diferentes fuentes para poder llegar a un objetivo en esta investigación, se empezó por comprender el movimiento de cuerpos rígidos hasta llegar a una teoría que comprendiera el algoritmo "Denavit-Hartenberg" y ejemplificar un modelo matemático en un robot de 7-GDL. Este capítulo tiene como objetivo resaltar los resultados obtenidos en la investigación, implementando la metodología en espiral, propuesta anteriormente, logrando una comparación de la literatura con los resultados obtenidos.

5.1 Análisis de teoría de sustento

A través de la investigación, lo cual está reflejada en el marco teórico se observaba como la robótica es importante en la actualidad, a medida que se avanza como sociedad, se ve que la tecnología está más involucrada de lo que se pensaba, la industria va a llegar a un punto en donde las compañías que no estén a la vanguardia se volverán obsoletas, por ello las grandes industrias buscan lo mejor en tecnología que satisfaga las necesidades operarias, es ahí donde los brazos robóticos son protagonistas en la industria de manufactura, en donde ha estado en constante cuestionamiento su eficacia para poder ser el reemplazo del obrero en procesos repetitivos. Por eso, es necesario saber los movimientos que lo gobiernan para alcanzar su objetivo en los espacios de trabajo, todo dependiendo de la estructura de sus articulaciones para cumplir el objetivo deseado. Los modelos matemáticos son una herramienta para explicar los movimientos de las articulaciones que se basan en parámetros de coordenadas en el espacio; en la investigación se reflejan los diferentes métodos que existen para explicar esta cinemática de los brazos robóticos, como lo es la teoría de productos exponenciales, la teoría de tornillo sin fin, entre otras. Se comparó la teoría de parametrización del algoritmo Denavit-Hartenberg, que es la más usada con respecto a las anteriores, donde varios investigadores definen la más conveniente a usar, debido a la alta precisión de sus calculaciones.

En el marco teórico se reflejó que para el cálculo de su cinemática se ven envueltos diferentes factores y parámetros de orientación y posición en el espacio, en donde el algoritmo ayudará a definir las coordenadas tridimensionales de un punto en el espacio,

en este caso el efector final del robot, por así decirlo el marco de coordenadas número 7 en el robot KUKA. Constantemente se comparan robots de 6 y 7 grados de libertad por su semejanza, aunque en las investigaciones que se han observado se plantea que el robot redundante podría eliminar algunas limitaciones del robot de 6 grados libertad; en cuestión de orientación, también se destaca la reducción de singularidades en el espacio de trabajo, como también el sobreponerse a ciertos obstáculos, esa articulación de más podría ser beneficiosa. Es por eso que se estudia los movimientos de las articulaciones en el espacio; con el algoritmo D-H se obtienen parámetros con respecto a marcos de coordenadas de sus eslabones de forma relativa de uno con el otro, siguiendo la cadena cinemática del robot serial hasta llegar al último eslabón, es decir, hasta el último sistema de coordenadas de origen O_i . Con estudios matemáticos, se pueden obtener valores numéricos, consiguiendo el resultado de coordenadas en X, Y, y Z del último sistema de coordenadas mediante un modelo matemático de su cinemática directa. y así poder llegar a una comparación entre los robots de 6 y 7-GDL. Cabe destacar que la industria busca mejorar más que todo la precisión operacional en procesos repetitivos y por eso la inversión cada vez es mayor, definiendo si es factible invertir en un robot redundante o no.

5.2 Resultados

En el transcurso de la investigación se eligió la metodología en espiral debido a la estructura del proyecto. Se analizó y documentó los resultados y riesgos a tomar en cuenta en el transcurso de la realización del proyecto, esta metodología consistió en espirales de forma progresiva en cada iteración hecha, cada iteración consistía en cuatro etapas de Planeación, Análisis de Riesgos, Implementación, y Evaluación en donde cada espiral depende del análisis de la iteración anterior para poder continuar con el proyecto.

5.2.1 Iteración I. Diseño del diagrama Cinemático

Etapas I. Planeación.

Para el diseño del diagrama se tomó en cuenta diferentes factores, dimensiones del robot, estructura del robot, grados de libertad incluidas, determinación si la estructura de la articulación es prismática o revoluta, se hizo este estudio con la información dada en la hoja de datos del fabricante alemán KuKa.

Etapa II. Análisis de Riesgos.

En esta etapa se tomaron cuenta los riesgos que al momento de hacer el diagrama se dificultó establecer las articulaciones que compartían un mismo eslabón, lo cual afectaría el diseño, este problema se solucionó haciendo un bosquejo de la estructura del robot ya que no había un simulador compatible con el modelo hasta el momento.

Etapa III. Implementación.

En esta etapa ya se tienen los datos y la información requerida acerca del robot en estudio. Se hizo el diagrama cinemático con la ayuda de un simulador tridimensional para poder llevar a cabo una mejor comprensión de la cinemática del robot de 7 grados de libertad. Como resultado se obtuvo el diseño del diagrama para poder así tener una mejor comprensión de la estructura cinemática del robot en estudio, todo esto de forma tridimensional para comprender su comportamiento.

Etapa IV. Evaluación.

A lo largo de la iteración se observan los riesgos a tomar en cuenta en las diferentes etapas, en esta etapa se cumplió el objetivo de diseñar un diagrama efectivo para la comprensión, definiendo las variables revolutas en cada articulación. Se dibujó de forma cilíndrica para mostrar que es una articulación revoluta, en algún caso fuese prismática, sería de forma cúbica.

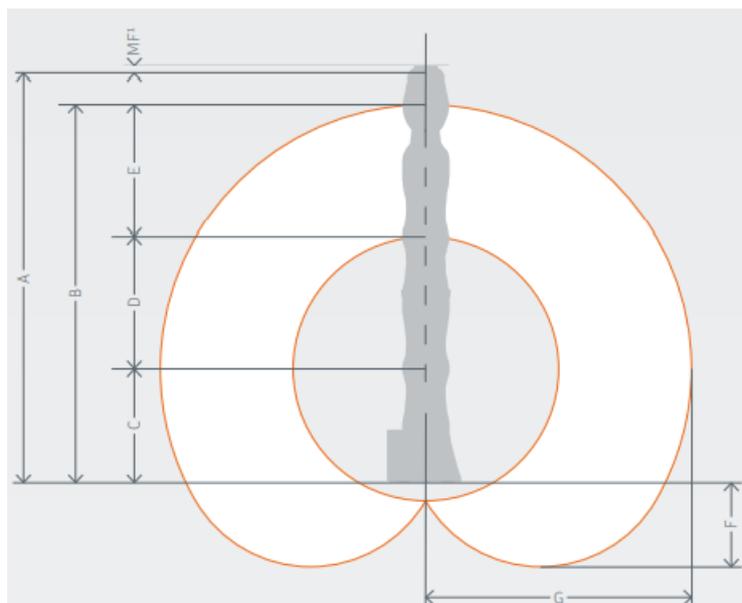


Ilustración 15 Hoja de datos Kuka LBR iiwa 7 R800

Fuente: Kuka (2017)

<i>Dimensión</i> A	<i>Dimensión</i> B	<i>Dimensión</i> C	<i>Dimensión</i> D	<i>Dimensión</i> E	<i>Dimensión</i> F	<i>Dimensión</i> G
1,266 mm	1,140mm	340mm	400mm	400mm	260mm	800mm

Tabla 6 Hoja de datos Kuka LBR iiwa 7 R800

Fuente: Kuka (2017)

Se observan las diferentes limitaciones de los eslabones a tomar en cuenta en el diagrama en la ilustración 16, lo cual hará su efecto en el modelo matemático al igual que las limitaciones en sus articulaciones.

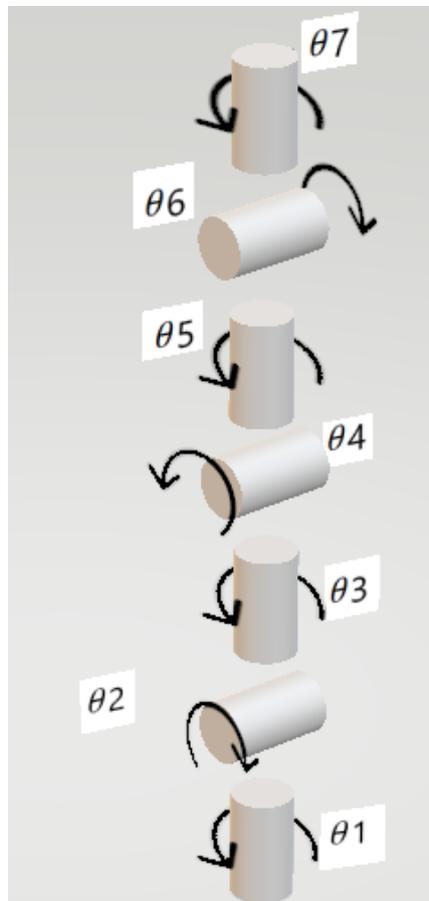


Ilustración 16 Diagrama Cinemático

Fuente: Propia (2021)

Se logra observar las diferentes articulaciones en revoluta presente en la estructura del manipulador serial, las variables de junta se nombran como theta (θ_i) en donde i sería i-

enésima articulación en estudio del diagrama. Una vez realizado el diagrama se puede continuar con la realización del algoritmo interpuesto en la siguiente iteración

5.2.2 Iteración II. Implementación del algoritmo D-H

Etapa I. Planeación.

Una vez obtenido el diagrama y comprobar su veracidad se puede empezar con el siguiente objetivo en el cual se implementará el algoritmo D-H siguiendo los pasos de forma detallada siguiendo la matriz de transformación generalizada para obtener un modelo matemático sobre la cinemática directa del manipulador serial.

Etapa II. Análisis de Riesgos.

En esta etapa se tiene el riesgo de al no seguir los pasos correctamente y aplicar los sistemas coordenados de forma aleatoria y no seguir las transformaciones de rotación y traslación como lo es indicado, afectaría la precisión del modelo matemático para detallar la posición en coordenadas cartesianas del efector final.

Etapa III. Implementación.

En esta etapa se utilizó un programa de dibujo tridimensional para poder hacer los diagramas de la cinemática directa de los diferentes sistemas coordenados, se siguieron los pasos de asignación de ejes en cada articulación, para así sucesivamente hacer el llenado de la tabla D-H, a continuación, se mostrarán los pasos D-H para el robot LBR:

1. Realizar un diagrama de las articulaciones del robot
2. Localizar y asignar los ejes de las articulaciones z.
3. Establecer el marco de referencia del origen.
4. Localizar los orígenes de todos los sistemas de coordenadas $x_i y_i z_i$.
5. Establecer todas las X_i a través del origen de los sistemas.
6. Establecer todas las Y_i a través del origen de los sistemas
7. Establecer el sistema de coordenadas en el efector final
8. Establecer la distancia de los eslabones.

9. Definir y llenar la tabla D-H con los parámetros θ_i , d_i , a_i , α_i siguiendo el algoritmo.
10. Formar las matrices de transformación homogénea ${}^{i-1}\mathbf{T}_i$
11. Formar la transformación homogénea ${}^0\mathbf{T}_7$

En donde los últimos 2 pasos se realizarán en Matlab en la siguiente iteración por la complejidad de su estructura. Se nota también que el primer paso ya fue realizado en la iteración anterior. Como resultado se realizaron los pasos para poder obtener un diagrama completo en donde ayudó a culminar la tabla de parámetros siguiendo los pasos y parámetros del algoritmo.

Etapa IV. Evaluación.

Como evaluación de la iteración se estará revisando paso por paso para observar si los riesgos analizados fueron resueltos.

Paso 1 Realizar un diagrama de las articulaciones del robot.

En la iteración anterior se desarrolló el diagrama de articulaciones, en donde será de ayuda para la realización del modelo matemático. Se observa que las articulaciones están nombradas propiamente de acuerdo a su articulación variable, para referencia del diagrama, observar ilustración 16.

Paso 2 Localizar y asignar los ejes de las articulaciones Z.

Como segundo paso se tiene que localizar y asignar los ejes de las articulaciones z con las siguiente regla:

“Localice y asigne los ejes de las juntas z_0, \dots, z_{n-1} . El eje z_i es el eje de revolución de la junta $i+1$ si esta es de revoluta, o es el eje de traslación de la junta $i+1$ si esta es prismática”.

Esta regla indica asignar los ejes de movimiento, en este caso como es de revoluta, el movimiento de revolución será sobre los ejes Z, así mostrado en la ilustración 17.

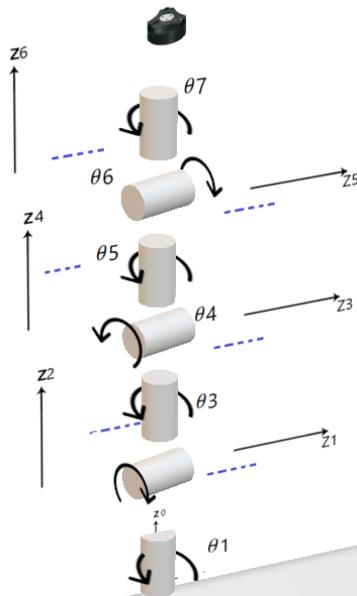


Ilustración 17 Diagrama Cinemático Paso 2

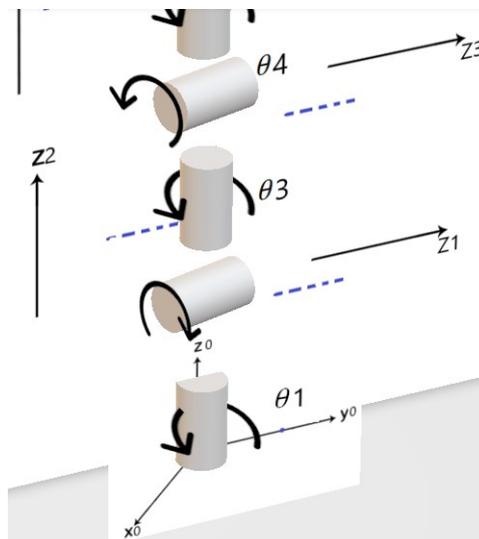
Fuente: Propia (2021)

Paso 3 Establecer el marco de referencia del origen.

Como tercer paso se debe establecer el marco de referencia del origen. Siguiendo la siguiente regla.

“Colocar el origen en cualquier punto a lo largo del eje Z_0 . Los ejes X_0 y Y_0 se seleccionan de tal manera que forme un sistema de mano derecha.”

Cabe destacar que el origen se puede colocar en cualquier punto del eje Z_0 .



Fuente: Propia (2021)

Paso 4 Localizar los orígenes de todos los sistemas de coordenadas $X_i Y_i Z_i$.

Siguiendo el procedimiento se destaca la realización de localizar los orígenes de los diferentes sistemas cartesianos siguiendo la regla de:

“Localizar el origen del sistema coordenado de $X_i Y_i Z_i$ en el punto donde la normal común a Z_{i-1} y Z_i intercepte a Z_i ”.

En este paso cabe destacar una peculiaridad con respecto donde se localizarán los orígenes dependiendo los siguientes 3 casos:

Caso 1

Donde se tien el sistema inmediato anterior y el sistema i-enésimo están en paralelo, en este caso el origen se colocará sobre el eje Z_i . El origen O_i se colocará en la normal común en Z_{i-1} tanto como a Z_i , por la tanto cualquier punto sobre Z_i seria válido.

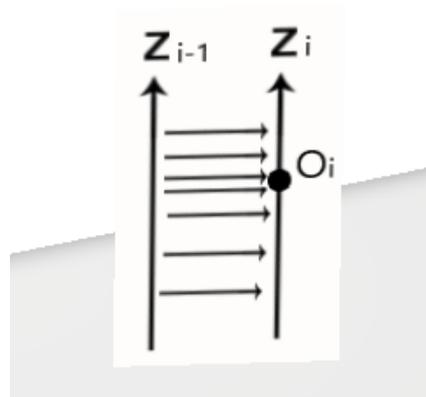


Ilustración 19 Diagrama Cinemático Paso 4 Caso 1

Fuente: Propia (2021)

Caso 2

El segundo caso es donde el sistema inmediato anterior y el sistema i-enésimo se interceptan en un punto, es evidente que donde está la intersección, es ahí donde se colocará el origen O_i .

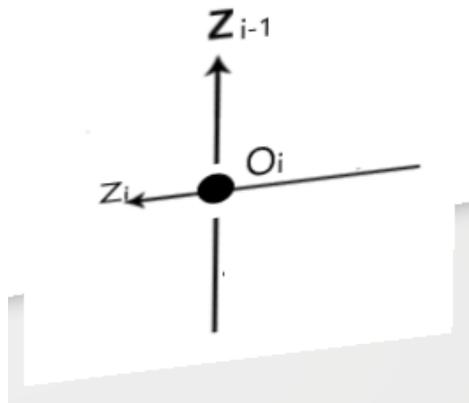


Ilustración 20 Diagrama Cinemático Paso 4 Caso 2

Fuente: Propia (2021)

Caso 3

En el tercer caso se observa el sistema inmediato anterior y el sistema i-enésimo. No se interceptan, es decir, existe una distancia entre ellos. En este caso el origen se localizará en la normal común entre ambos ejes, a lo largo de Z_i , por así decirlo una combinación de los casos anteriores, y así se asignan los orígenes de los diferentes sistemas cartesianos.

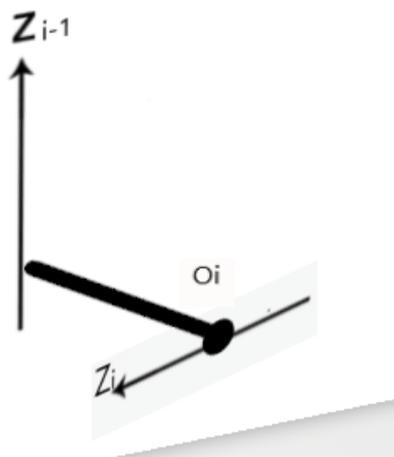


Ilustración 21 Diagrama Cinemático Paso 4 Caso 3

Fuente: Propia (2021)

Se verifica como se siguió la regla del paso 4, también de ello dependiendo los tres casos para ubicar los orígenes, para más referencia observar ilustración 22, donde los orígenes están señalizados de color azul.

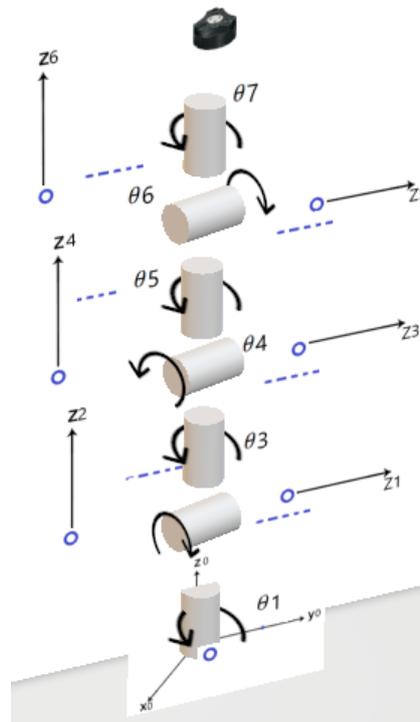


Ilustración 22 Diagrama Cinemático Paso 4

Fuente: Propia (2021)

Paso 5 Establecer todas las X_i a través del origen de los sistemas.

En este paso se enfocará en localizar la dirección de los ejes X_i basado en la siguiente regla:

Establecer X_i a lo largo de la normal común entre los ejes Z_{i-1} y Z_i , a través del origen del sistema $X_i Y_i Z_i$ localizados en el paso anterior. En caso que los ejes Z_{i-1} y Z_i , se intercepten, se establecerá X_i en una dirección normal al plano formado por los ejes Z_{i-1} y Z_i .

Da lo mismo poner la dirección hacia dentro o fuera de la normal común, lo único que cambiaría son datos en la tabla que se observará en pasos más adelante. En este caso lo pondré en la misma dirección de X_0 para más facilidad en el llenado

de la tabla. Se observa en la ilustración 23 como las X_i están localizadas desde el punto origen O_i , respetando la regla establecida.

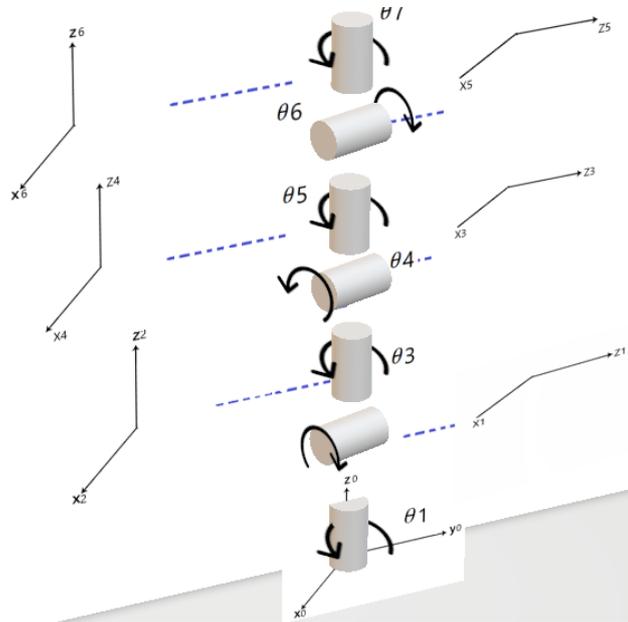


Ilustración 23 Diagrama Cinemático Paso 5

Fuente: Propia (2021)

Paso 6 Establecer todas las Y_i a través del origen de los sistemas coordenados.

Para el siguiente paso se debe establecer Y_i , en donde se establece la siguiente regla de acuerdo al algoritmo D-H:

“Establecer Y_i para completar un sistema coordenado respetando la regla de la mano derecha”.

Para esto se tiene que observar los pasos anteriores y observar cómo quedaron los ejes X_i y Z_i para saber dónde localizar el eje Y_i de acuerdo a la regla de la mano derecha. Se observa como paso a paso se han llenado los diferentes sistemas coordenados de cada articulación, la regla de la mano derecha está haciendo la rotación sobre el eje Z_i . De ahí se puede establecer Y_i .

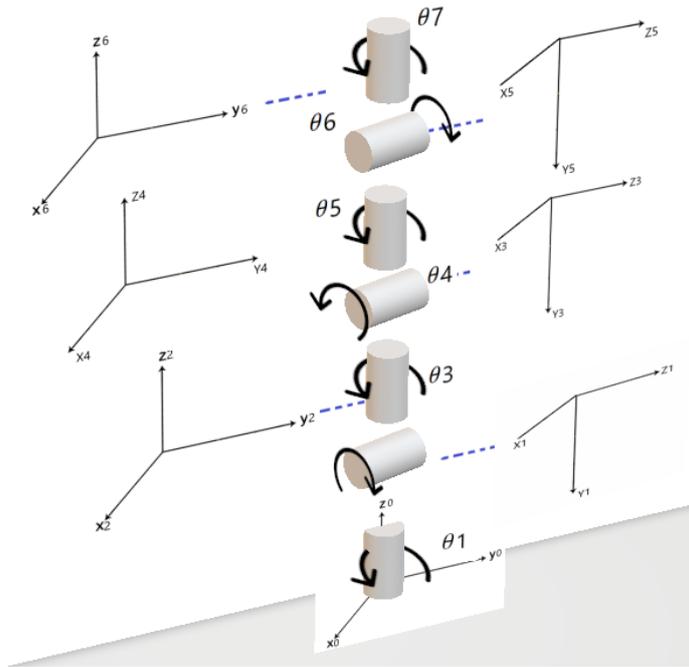


Ilustración 24 Diagrama Cinemático Paso 6

Fuente: Propia (2021)

Paso 7 Establecer el sistema de coordenadas en el efector final

El paso número 7 se enfoca en establecer el sistema coordenado del efector final.

“Establecer un sistema coordenado en el extremo del manipulador o en la herramienta colocada”.

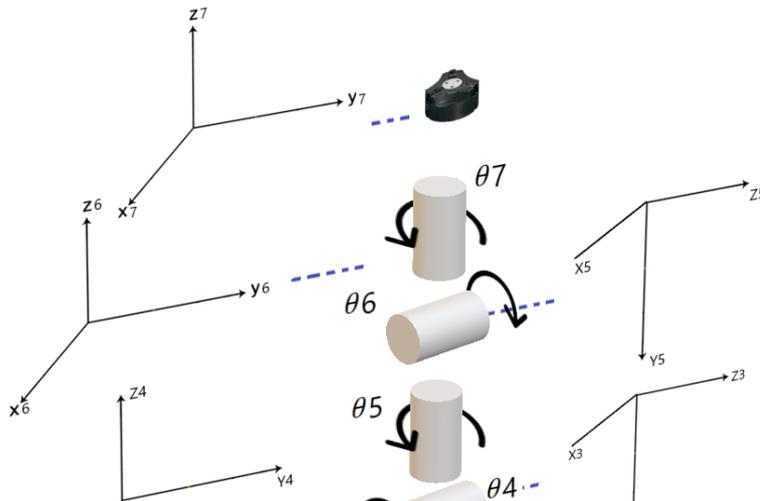


Ilustración 25 Diagrama Cinemático Paso 7

Fuente: Propia (2021)

Se sigue los pasos anteriores de colocar el sistema coordinado en una dirección no muy complicada, el ultimo sistema se colocará igual que al último sistema de coordenadas establecido, en este caso el sistema de coordenadas 6. En donde sería el sistema de coordenadas unido de la herramienta, el cual se establecería su posición en el espacio mediante un modelo matemático y siguiendo los pasos D-H.

Paso 8 Establecer la distancia de los eslabones

Como siguiente paso se tiene que establecer la distancia de los eslabones. En donde de acuerdo a este modelo, algunas articulaciones comparten un mismo eslabón, por ejemplo, el eslabón $d2$ empieza en la articulación 2 y termina al comenzar la articulación 4, de ahí se determina que la articulación 2 y 3 comparten un mismo eslabón $d2$. Y así es igual con 4 y 5, y de la misma manera 6 y 7, para una mejor comprensión se puede observar el diagrama.

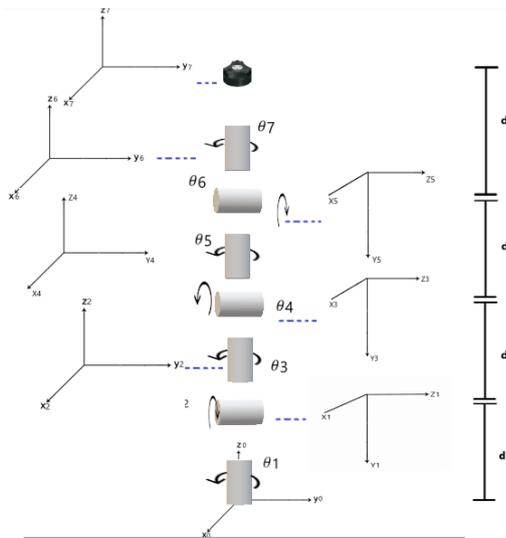


Ilustración 26 Diagrama Cinemático Paso 8

Fuente: Propia (2021)

Paso 9 Definir y llenar la tabla D-H con los parámetros θ_i , d_i , a_i , α_i siguiendo el algoritmo.

Como siguiente paso se tiene el llenado de la tabla D-H, en donde se definen los parámetros para el modelo matemático.

$${}^{i-1}\xi_i(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i) = R_z(\theta_i) \oplus T_z(d_i) \oplus T_x(a_i) \oplus R_x(\alpha_i)$$

Ecuación 9 Ecuación de Transformación D-H

Fuente: (Corke, 2017b)

Para esto se tiene que tener en cuenta la ecuación de transformación mencionadas anteriormente, en donde se relaciona la posición y orientación de la articulación i con la articulación $i-1$, así como se explicó en el movimiento de cuerpos rígidos en el marco teórico. El convenio dice que para relacionar los sistemas de coordenadas con las articulaciones en asunto se debe tener en cuenta los 4 parámetros, los cuales son rotación en Z , más la traslación en Z , más la traslación en X y de ultimo agregarle una rotación en X , así como está definida la ecuación.

Siguiendo la ecuación de forma respectiva se nombran los diferentes parámetros en la tabla. Los dos primeros sistemas a transformar, es el sistema 0 al sistema 1.

Se determina que θ es la rotación necesaria en Z_i para alinear X_0 con X_1 , en este caso sería 0, pero como es una articulación variable entonces se convierte en θ_1 , se le coloca un asterisco determinando que es la articulación variable debido que es revoluta. Es por ello que anteriormente se explicaba que por facilidad se colocaba X_1 de la misma manera que X_0 , en caso que hubiese una cantidad de grados de diferencia entre X_{i-1} y X_i se sumaría o restaría esa cantidad de grados. Se continua con d_i , donde d_i es la distancia a lo largo de Z_{i-1} para llegar al origen del sistema Z_i , en este caso el sistema 1, lo cual se observa en el diagrama sería d_1 . Se sigue con a_i , en la imagen se nota que a_i es la traslación sobre el eje X_i para llegar al origen del sistema coordenado X_{i-1} , debido a que no se llega al origen anterior con esta traslación, se determina que a_1 es 0. Culminando con α se denota que α es la rotación sobre el eje X_i para alinear el eje Z_{i-1} , en este caso Z_0 y el eje de Z_i , donde sería Z_1 , para eso se hace un giro de -90 grados. Y así se siguge con los demás sistemas coordenados del 1 al 2, del 2 al 3, del 3 al 4, del 4 al 5, del 5 al 6 haciendo las transformaciones relativas hasta tener la tabla llena correspondiente.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	d1	0	-90
2	θ_2^*	0	0	90
3	θ_3^*	d2	0	-90
4	θ_4^*	0	0	90
5	θ_5^*	d3	0	-90
6	θ_6^*	0	0	90
7	θ_7^*	d4	0	0

Tabla 7 Tabla de parámetros D-H

Fuente: Propia (2021)

Este proceso fue realizado más de una vez para limitar los errores ya que afectarían los resultados de las matrices. Una vez realizada la iteración y resolviendo los riesgos presentados en la iteración se puede estar listos para la siguiente iteración comenzando por el décimo paso y resolver las matrices de las transformaciones.

5.2.3 Iteración III. Resolución Matrices.

Etapa I. Planeación

Una vez resueltos los riesgos de la iteración anterior se puede continuar con el siguiente objetivo en donde se busca resolver las transformaciones de la tabla y resolver las matrices de acuerdo a lo obtenido en la tabla con los parámetros D-H, para ello se utilizará el software de Matlab debido a su facilidad de resolución de problemas de álgebra lineal.

Etapa II. Análisis de Riesgos.

En esta etapa se analizan los riesgos presentes, en donde en caso que las transformaciones hechas no hayan sido calculadas correctamente, los resultados en las

matrices afectaran la solución final del modelo matemático, en donde se recalca que no será tan preciso como lo especulado.

Etapa III. Implementación.

Al momento que la tabla de los parámetros fue revisada detenidamente y verificar sus resultados, se implementó la sustitución de los valores parametrizados en la matriz generalizada, esto se implementó en cada línea de la tabla, es decir en cada transformación del 1 al 7, también se incluyó la multiplicación de todas las matrices de transformación para obtener una última matriz que definirá el modelo matemático, por consiguiente, se reemplazaron las dimensiones de los eslabones estipulados en iteraciones anteriores para lograr un resultado más preciso con las coordenadas X,Y y Z del efector final del manipulador serial.

Como resultado se obtuvieron las diferentes matrices de cada línea, también se obtuvo un modelo tridimensional (plot), ejemplificando las articulaciones con la ayuda de Matlab, usando el Toolbox de Peter Corke. Se hicieron pruebas de acuerdo al uso del plot, en donde cada cilindro representa una articulación, se hicieron cambios en diferentes articulaciones para definir su grado de precisión.

Etapa IV. Evaluación.

En esta etapa de la metodología se puede determinar que se ha diseñado un modelo matemático de la cinemática directa del robot KuKa. El proceso de la multiplicación de matrices ha sido complicado por la programación hecha, pero resultó efectiva. Las matrices realizadas del 10mo paso del algoritmo D-H línea por línea de las transformaciones se mostrarán en la ilustración 27 a base de la matriz generalizada nombrada A. La programación sobre las matrices y el plot se adjuntarán en Anexos 1.

$$A = \begin{matrix} \cos(th_i) & -\cos(\alpha_i) * \text{sen}(th_i) & \text{sen}(\alpha_i) * \text{sen}(th_i) & a * \cos(th_i) \\ \text{sen}(th_i) & \cos(\alpha_i) * \cos(th_i) & -\text{sen}(\alpha_i) * \cos(th_i) & a * \text{sen}(th_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

Ecuación 10 Matriz de transformación generalizada

Fuente: (Corke, 2017b)

$$\begin{aligned}
T_{01} &= \begin{pmatrix} \cos\left(\theta_1 - \frac{\pi}{4}\right) & 0 & -\sin\left(\theta_1 - \frac{\pi}{4}\right) & 0 \\ \sin\left(\theta_1 - \frac{\pi}{4}\right) & 0 & \cos\left(\theta_1 - \frac{\pi}{4}\right) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & T_{34} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & -\sin(\theta_4) & 0 \\ -\sin(\theta_4) & 0 & -\cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
T_{12} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_2) & 0 & -\cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & T_{45} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & -\sin(\theta_5) & 0 \\ \sin(\theta_5) & 0 & \cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
T_{23} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & -\sin(\theta_3) & 0 \\ \sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & T_{56} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_6) & 0 & \sin(\theta_6) & 0 \\ \sin(\theta_6) & 0 & -\cos(\theta_6) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
T_{56} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_6) & 0 & \sin(\theta_6) & 0 \\ \sin(\theta_6) & 0 & -\cos(\theta_6) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & T_t &= \begin{pmatrix} \sin(\theta_7) \sigma_5 - \cos(\theta_7) \sigma_4 & \sin(\theta_7) \sigma_4 + \cos(\theta_7) \sigma_5 & \sigma_3 & L_4 \sigma_3 + L_3 \sigma_{12} + L_2 \sigma_{24} \sin(\theta_2) \\ \cos(\theta_7) \sigma_2 - \sin(\theta_7) \sigma_6 & -\sin(\theta_7) \sigma_2 - \cos(\theta_7) \sigma_6 & \sigma_1 & L_4 \sigma_1 - L_3 \sigma_{10} + L_2 \sin(\theta_2) \sigma_{23} \\ \cos(\theta_7) \sigma_7 - \sin(\theta_7) \sigma_9 & -\cos(\theta_7) \sigma_9 - \sin(\theta_7) \sigma_7 & \sigma_8 & L_1 + L_3 \sigma_{14} + L_4 \sigma_8 + L_2 \cos(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
T_{67} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_7) & -\sin(\theta_7) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_7) & \cos(\theta_7) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Ilustración 27 Matrices de transformación

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 27 se muestra cada matriz de transformación por cada línea de la tabla D-H, la matriz nombrada como T_t , es la multiplicación de todas las matrices juntas para obtener el modelo matemático de la cinemática directa de 0T_7 para encontrar la posición en X, Y, Z del sistema coordenado 7, por así decirlo de la herramienta de trabajo en el espacio de trabajo del manipulador serial KuKa. Para comprender de una forma más explícita de lo que se espera obtener con el modelo matemático, se observará la ecuación 11 que representa una matriz de transformación homogénea en donde se muestra explícitamente la parte de orientación, ejemplificada con R, donde es su orientación en gamma, beta, y alpha, y la de posición, ejemplificada con X, Y, y Z, las siguientes ecuaciones muestran el modelo matemático con respecto a la cinemática

directa del robot KuKa, cabe mencionar que el L1, L2, L3 y L4 son los mismos eslabones d mencionados en la tabla D-H.

$$\begin{array}{cccc} R_{11} & R_{12} & R_{13} & X \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & Y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Ecuación 11 Matriz de transformación homogénea modelo matemático.

Fuente: Propia (2021)

Modelo Matemático de cinemática directa

$$\begin{aligned} \mathbf{R11} = & \sin(\text{th7}) * (\sin(\text{th5}) * (\cos(\text{th4}) * (\sin(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4) - \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th3}) * \cos(\text{th1} - \\ & \text{pi}/4)) - \cos(\text{th1} - \text{pi}/4) * \sin(\text{th2}) * \sin(\text{th4})) - \cos(\text{th5}) * (\cos(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4) + \\ & \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4) * \sin(\text{th3}))) - \cos(\text{th7}) * (\sin(\text{th6}) * (\sin(\text{th4}) * (\sin(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4) - \\ & \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th3}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4)) + \cos(\text{th4}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4) * \sin(\text{th2})) + \\ & \cos(\text{th6}) * (\cos(\text{th5}) * (\cos(\text{th4}) * (\sin(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4) - \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th3}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4)) - \\ & \cos(\text{th1} - \text{pi}/4) * \sin(\text{th2}) * \sin(\text{th4})) + \sin(\text{th5}) * (\cos(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4) + \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th1} - \\ & \text{pi}/4) * \sin(\text{th3})))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R21} = & \cos(\text{th7}) * (\sin(\text{th6}) * (\sin(\text{th4}) * (\cos(\text{th1} - \text{pi}/4) * \sin(\text{th3}) + \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \\ & \text{pi}/4)) - \cos(\text{th4}) * \sin(\text{th2}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4)) + \cos(\text{th6}) * (\cos(\text{th5}) * (\cos(\text{th4}) * (\cos(\text{th1} - \\ & \text{pi}/4) * \sin(\text{th3}) + \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4)) + \sin(\text{th2}) * \sin(\text{th4}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4)) + \\ & \sin(\text{th5}) * (\cos(\text{th3}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4) - \cos(\text{th2}) * \sin(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4)))) - \\ & \sin(\text{th7}) * (\sin(\text{th5}) * (\cos(\text{th4}) * (\cos(\text{th1} - \text{pi}/4) * \sin(\text{th3}) + \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4)) + \\ & \sin(\text{th2}) * \sin(\text{th4}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4)) - \cos(\text{th5}) * (\cos(\text{th3}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4) - \\ & \cos(\text{th2}) * \sin(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R31} = & \cos(\text{th7}) * (\cos(\text{th6}) * (\cos(\text{th5}) * (\cos(\text{th2}) * \sin(\text{th4}) - \cos(\text{th3}) * \cos(\text{th4}) * \sin(\text{th2})) + \\ & \sin(\text{th2}) * \sin(\text{th3}) * \sin(\text{th5})) - \sin(\text{th6}) * (\cos(\text{th2}) * \cos(\text{th4}) + \cos(\text{th3}) * \sin(\text{th2}) * \sin(\text{th4}))) - \\ & \sin(\text{th7}) * (\sin(\text{th5}) * (\cos(\text{th2}) * \sin(\text{th4}) - \cos(\text{th3}) * \cos(\text{th4}) * \sin(\text{th2})) - \\ & \cos(\text{th5}) * \sin(\text{th2}) * \sin(\text{th3})) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R12} = & \sin(\text{th7}) * (\sin(\text{th6}) * (\sin(\text{th4}) * (\sin(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4) - \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th3}) * \cos(\text{th1} - \\ & \text{pi}/4)) + \cos(\text{th4}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4) * \sin(\text{th2})) + \cos(\text{th6}) * (\cos(\text{th5}) * (\cos(\text{th4}) * (\sin(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \\ & \text{pi}/4) - \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th3}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4)) + \cos(\text{th4}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4) * \sin(\text{th2})) + \\ & \sin(\text{th5}) * (\cos(\text{th3}) * \sin(\text{th1} - \text{pi}/4) + \cos(\text{th2}) * \cos(\text{th1} - \text{pi}/4) * \sin(\text{th3}))) \end{aligned}$$

$$L3*(\sin(\text{th4})*(\sin(\text{th3})*\sin(\text{th1} - \pi/4) - \cos(\text{th2})*\cos(\text{th3})*\cos(\text{th1} - \pi/4)) + \cos(\text{th4})*\cos(\text{th1} - \pi/4)*\sin(\text{th2})) + L2*\cos(\text{th1} - \pi/4)*\sin(\text{th2})$$

$$\mathbf{Y}=L4*(\sin(\text{th6})*(\cos(\text{th5})*(\cos(\text{th4})*(\cos(\text{th1} - \pi/4)*\sin(\text{th3}) + \cos(\text{th2})*\cos(\text{th3})*\sin(\text{th1} - \pi/4)) + \sin(\text{th2})*\sin(\text{th4})*\sin(\text{th1} - \pi/4)) + \sin(\text{th5})*(\cos(\text{th3})*\cos(\text{th1} - \pi/4) - \cos(\text{th2})*\sin(\text{th3})*\sin(\text{th1} - \pi/4))) - \cos(\text{th6})*(\sin(\text{th4})*(\cos(\text{th1} - \pi/4)*\sin(\text{th3}) + \cos(\text{th2})*\cos(\text{th3})*\sin(\text{th1} - \pi/4)) - \cos(\text{th4})*\sin(\text{th2})*\sin(\text{th1} - \pi/4))) - L3*(\sin(\text{th4})*(\cos(\text{th1} - \pi/4)*\sin(\text{th3}) + \cos(\text{th2})*\cos(\text{th3})*\sin(\text{th1} - \pi/4)) - \cos(\text{th4})*\sin(\text{th2})*\sin(\text{th1} - \pi/4)) + L2*\sin(\text{th2})*\sin(\text{th1} - \pi/4)$$

$$\mathbf{Z}=L1 + L3*(\cos(\text{th2})*\cos(\text{th4}) + \cos(\text{th3})*\sin(\text{th2})*\sin(\text{th4})) + L4*(\sin(\text{th6})*(\cos(\text{th5})*(\cos(\text{th2})*\sin(\text{th4}) - \cos(\text{th3})*\cos(\text{th4})*\sin(\text{th2})) + \sin(\text{th2})*\sin(\text{th3})*\sin(\text{th5})) + \cos(\text{th6})*(\cos(\text{th2})*\cos(\text{th4}) + \cos(\text{th3})*\sin(\text{th2})*\sin(\text{th4}))) + L2*\cos(\text{th2})$$

5.2.4 Iteración IV. Simulaciones

Etapa I. Planeación.

Una vez resuelta la iteración anterior se puede seguir con el siguiente objetivo en donde se simulará el modelo matemático en Matlab, el cual dará las coordenadas del efector final a base de las articulaciones del KuKa en algún punto del espacio de trabajo. Como objetivo de la simulación se comparó en el ámbito industrial a ambos manipuladores en donde se observa sus diferencias de acuerdo a precisión y como evitar obstáculos en su espacio de trabajo.

Etapa II. Análisis de Riesgos.

En esta etapa existe el riesgo de que el espacio de trabajo del KUKA sea de mayor alcance que el del ABB, lo cual implicaría que las articulaciones no afectarían en la determinación de comparación en la forma de esquivar obstáculos de cada manipulador, también existe el riesgo que la diferencia en las limitaciones de acuerdo al rango de movimiento de sus articulaciones sea abismal, lo cual implicaría que el manipulador de 6 grados de libertad no pueda llegar a ciertas áreas que el KuKa pueda alcanzar o viceversa.

Etapa III. Implementación.

En esta etapa se escoge un punto en el espacio de trabajo en el proceso industrial de pick and place, en este caso se llamará "releasePos" en donde será el punto que ambos robots soltarán la pieza, se escogió un cubo como pieza por su visibilidad en el cambio de orientación y posición en el simulador. Se simulará la forma en la cual ambos robots esquivan obstáculos, en este caso sería un humano, en donde se comparará la forma en la que ambos robots están aptos para reducir la singularidad y la forma de esquivar los obstáculos presentes. Primero se implementará una orientación y posición específica en el punto releasePos y se observará si ambos robots alcanzan este objetivo. En caso que ambos robots alcancen de forma exitosa el objetivo, se agregó el obstáculo de un humano virtual que simulará el obstáculo, es ahí donde se observará si es posible por ambos robots evitar el obstáculo. En caso que el obstáculo no sea esquivado por alguno de los dos manipuladores, se cambió la orientación del releasePos sin afectar la posición del objetivo a llegar.

Etapa IV. Evaluación.

En este punto de la etapa se comparan ambos manipuladores, en donde el manipulador de 7 grados de libertad supero en las pruebas al de 6 grados de libertad, se hizo una evaluación en cada prueba tomando en cuenta los riesgos planteados para poder obtener una solución. Se logro determinar que el robot de 7 grados de libertad tiene ventaja de acuerdo a esquivar obstáculos en espacios de trabajo reducido, así como también la reducción de tiempo de producción de acuerdo a cada iteración hecha en el proceso industrial.

5.3 Pruebas y Validación del Prototipo

En esta parte del capítulo se pondrán a prueba las aptitudes de los manipuladores como también del modelo matemático. Para simular el modelo matemático se utilizará el software de MATLAB® debido a su alta capacidad para resolver el algebra lineal presentada en esta investigación. Se utilizará herramientas como ser el Toolbox de Peter Corke, como también el Toolbox de Cesar Chávez para simular el plot del manipulador en Matlab. En conjunto con Matlab se utilizará el software de CoppeliaSim, más conocido como Vrep para validar la cinemática directa del manipulador de 7 grados de libertad. También se utilizará CoppeliaSim para simular el comportamiento de los manipuladores

en el ámbito industrial poniéndolos a prueba en diferentes escenarios para validar los objetivos de esta investigación. En la ilustración 28 se muestra el PLOT del robot validando el modelo matemático con orientación en sus articulaciones en 0, es decir en posición en casa.

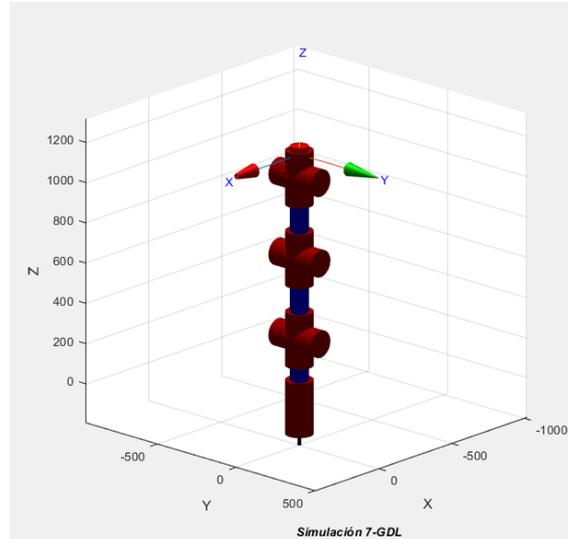


Ilustración 28 Diagrama de Articulaciones en casa

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 29 muestra el PLOT con el único cambio de 45 grados en su articulación número 2.

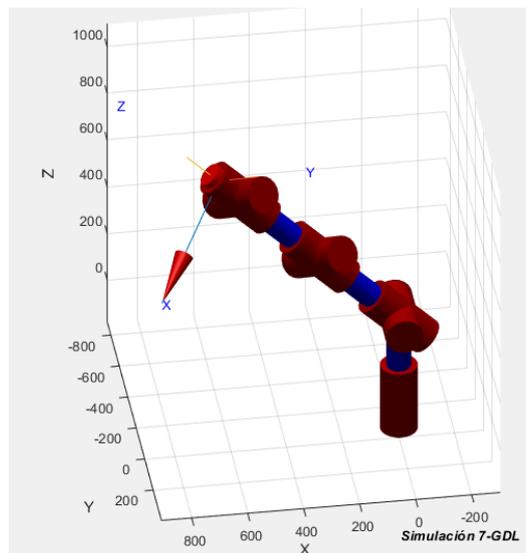


Ilustración 29 Diagrama de Articulaciones con movimiento en la segunda articulación.

Fuente: Propia (2021)

Ya en la ilustración 30 muestra un cambio de 45 grados en su articulación 2 y 3, se determina que el modelo es preciso debido a la orientación detallada de sus articulaciones donde muestra cambios en sus articulaciones de 45 grados para validar su precisión al cambio en orientación en el espacio.

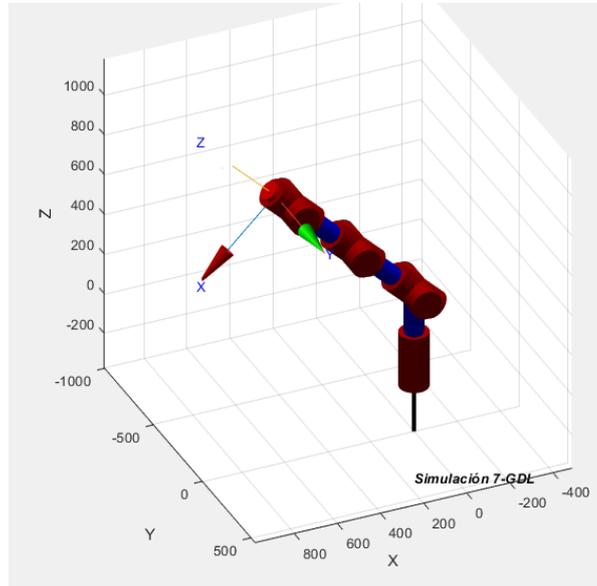


Ilustración 30 Diagrama de Articulaciones con movimiento en la segunda y tercera articulación.

Fuente: Propia (2021)

Una vez evaluado y resueltos los riesgos de la iteración, se procede hacer las respectivas simulaciones del modelo matemático en Matlab y CoppeliaSim, en donde se simulará el comportamiento en diferentes posiciones en el espacio trabajo en un proceso industrial de pick and place del robot KuKa de 7 grados de libertad y el robot ABB IRB1200-5-90 de 6 grados de libertad.

Las pruebas de validación del modelo matemático también se hicieron en el simulador CoppeliaSim en conjunto con Matlab, se logró determinar cómo válido el modelo matemático al verificar su precisión en establecer las coordenadas del marco del efector final. Se estableció un punto llamado "Guía" en CoppeliaSim en donde mostrará la posición del efector final, se correrá el programa en Matlab en donde dará los valores X, Y, y Z de donde se supone que el efector final irá. Matlab dará la última matriz de transformación con valores numéricos donde la última columna determinará las coordenadas tridimensionales.

En la ilustración 31 se muestra el manipulador en posiciones articulares aleatorias mostradas en la tabla 8, estos parámetros de las articulaciones se usarán en el modelo matemático y así encontrar la posición del efector final correspondiente a las articulaciones arbitrarias en el primer intento, las posiciones articulares arbitrarias dieron como resultado las siguientes:



Ilustración 31 Validación Modelo Matemático

Fuente: Propia (2021)

Articulación 1	$+8.951e+01*\pi/180$
Articulación 2	$+8.971e+01*\pi/180$
Articulación 3	$+1.697e+02*\pi/180$
Articulación 4	$8.969e+01*\pi/180$
Articulación 5	$+8.951e+01*\pi/180$
Articulación 6	$+8.951e+01*\pi/180$
Articulación 7	$+0.000e+00*\pi/180$

Tabla 8 Tabla de parámetros articulares 1

Fuente: Propia (2021)

Cada articulación es tomada en cuenta como q_i y multiplicada por $\pi/180$ ya que Matlab trabaja en radianes. Una vez teniendo los parámetros de las articulaciones se ingresan a

Matlab y reemplazar los valores de las articulaciones en el modelo matemático y así dé el resultado de las coordenadas cartesianas y dará el resultado de la matriz homogénea, resultando la última columna como:

$$\begin{aligned} X &= 0.3109 \\ Y &= 0.2530 \\ Z &= 0.7564 \\ &0 \end{aligned}$$

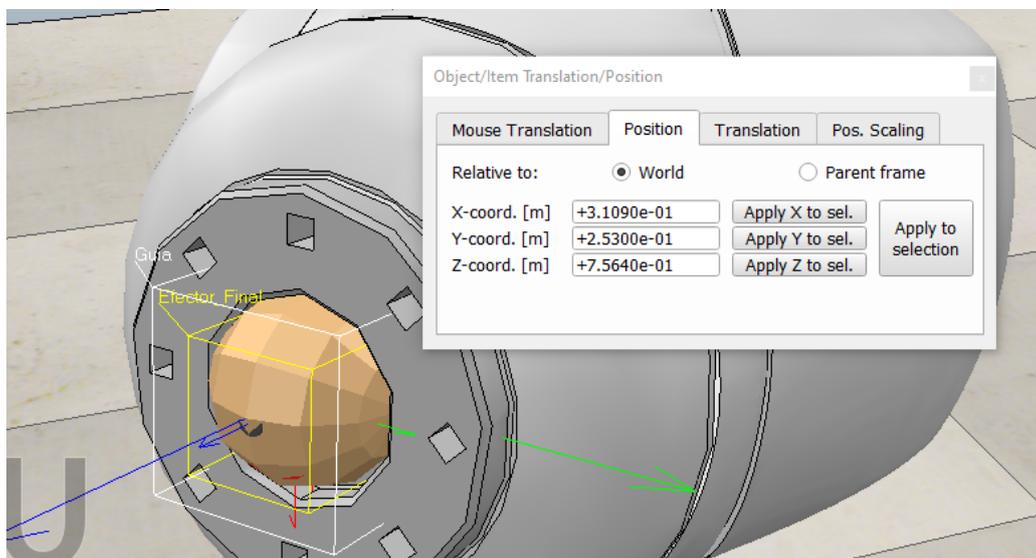
Una vez obtenido los valores cartesianos se pasan a CoppeliaSim, se validó el modelo en el momento que la posición del punto "Guía" y la posición del efector final son la misma en el simulador, mostrando en la ilustración 32 una vista panorámica del escenario.



Ilustración 32 Vista Normal Validación Modelo Matemático 1

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 33 se destaca un vista aumentad del escenario y se denota que el plano de coordenadas amarillo corresponde al efector final y el marco de coordenadas blanco corresponde al punto llamado "Guía".



Fuente: Propia (2021)

De la misma manera se realizaron 2 repeticiones para comprobar su precisión mostrada en las ilustraciones 34-37. En la segunda repetición se muestra otra posición aleatoria en donde se comprueba el modelo matemático con parámetros articulares mostrados en la tabla 9 dados por la cinemática inversa del programa CoppeliaSim.

Articulación 1	$-2.784e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 2	$+2.716e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 3	$+3.773e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 4	$-2.717e+01 \cdot \pi / 180;$
Articulación 5	$+2.787e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 6	$+2.786e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 7	$+1.366e-05 \cdot \pi / 180$

Tabla 9 Tabla de parámetros articulares 2

Fuente: Propia (2021)

Con estos parámetros se logra comparar los resultados del efector final en CoppeliaSim con el punto llamado "Guía", en donde se comprueba la precisión del modelo matemático para encontrar la posición del sistema de coordenadas final mostrado en la ilustración 34, a continuación, se muestran los datos obtenidos por el modelo matemático para la segunda validación con datos numéricos para X, Y, y Z:

$$\begin{aligned} X &= 0.3377 \\ Y &= -0.4723 \\ Z &= 0.9815 \\ &0 \end{aligned}$$

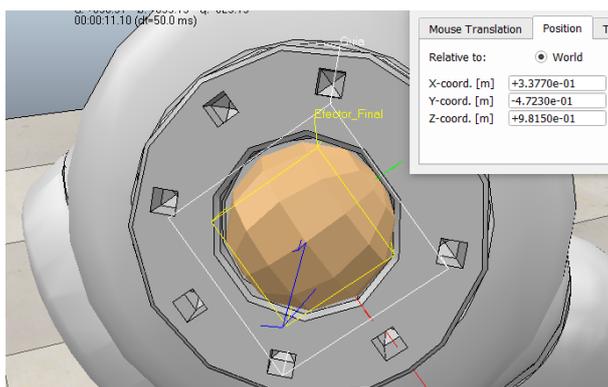


Ilustración 34 Vista Aumentada Validación Modelo Matemático 2

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 35 se denota una vista panorámica del escenario de la segunda prueba.



Ilustración 35 Vista Normal Validación Modelo Matemático 2

Fuente: Propia (2021)

En las ilustraciones 36 y 37 se muestra la tercera validación de precisión del modelo matemático con parámetros articulares dados por el simulador mostrados en la tabla 10.

Articulación 1	$+6.084e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 2	$+6.153e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 3	$+1.295e+02 \cdot \pi / 180$
Articulación 4	$-6.153e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 5	$+6.084e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 6	$+6.084e+01 \cdot \pi / 180$
Articulación 7	$+1.366e-05 \cdot \pi / 180$

Tabla 10 Tabla de parámetros articulares 3

Fuente: Propia (2021)

Dando como resultado las siguientes coordenadas del modelo matemático a base de los parámetros articulares de la tabla 10.

$$X = 0.2591$$

$$Y = 0.3558$$

$$Z = 0.9073$$

$$0$$

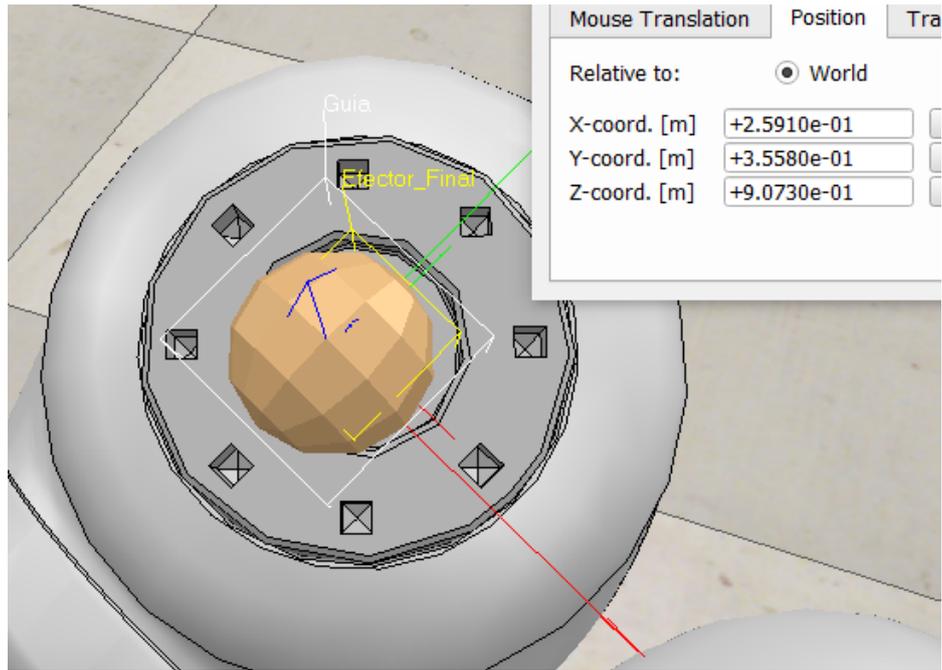


Ilustración 36 Vista Aumentada Validación Modelo Matemático 3

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 36 se denota una vista panorámica del escenario de la tercera prueba. Se comprueban las pruebas hechas y se puede decir que son resultados positivos.

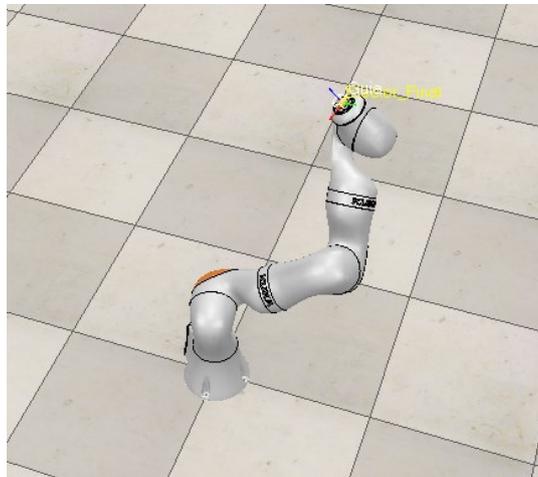


Ilustración 37 Vista Normal Validación Modelo Matemático 3

Fuente: Propia (2021)

A continuación, se estableció las coordenadas $X=+5.0000e-01$, $Y=-2.9800e-01$ y $Z=+4.0000e-01$ y con orientación alrededor de los ejes X, Y, y Z nombrados como Alpha, Beta, y Gamma respectivamente con valores de $\text{Alpha} = -1.8000e+02^\circ$, $\text{Beta} = +0.0000e+00^\circ$ y $\text{Gamma} = +9.0000e+01^\circ$ para el releasePos en el proceso

industrial, en donde se validaron con el modelo matemático de las articulaciones del KuKa a base de sus resultados en Coppelia Sim:

Articulación 1	$-7.315e+00*\pi/180$
Articulación 2	$+5.054e+01*\pi/180$
Articulación 3	$+2.202e+01*\pi/180$
Articulación 4	$-7.209e+01*\pi/180$
Articulación 5	$+5.608e+01*\pi/180$
Articulación 6	$+1.145e+02*\pi/180$
Articulación 7	$+1.478e+02*\pi/180$

Tabla 11 Tabla de parámetros articulares 4

Fuente: Propia (2021)

q es representada por theta en las variables de junta en cada articulación. Los resultados obtenidos con el modelo matemático son para $X= +4.9680e-01$, $Y= -2.9880e-01$, $Z=+4.0010e-01$, validados correctamente y siendo más precisos de acuerdo a las coordenadas de su efector final.

Se tomó en cuenta las limitaciones de rango de movimiento de ambos robots siendo las de ABB mostradas en la tabla 12 y las limitaciones de KuKa en la tabla 13.



Ilustración 38 Robot 6-GDL ABB IBR1200 5-90

Fuente: IRB 1200, data sheet, PDF, s. f. (2019)

Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
$\pm 170^\circ$	$+135^\circ$ a -100°	$+70^\circ$ a -200°	$+270^\circ$ a -270°	$+130^\circ$ a -130°	$+400^\circ$ a -400°

Tabla 12 Robot 6-GDL ABB IRB1200 5-90

Fuente: (IRB 1200, data sheet, PDF, s. f. 2019)

Con la ilustración 39 y la tabla 13 se logra observar los detalles de la hoja de datos del manipulador KuKa.



Ilustración 39 Robot 7-GDL KuKa LBR iiwa 7 800

Fuente: Kuka (2017)

| Articulación |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| $\pm 170^\circ$ | $\pm 120^\circ$ | $\pm 170^\circ$ | $\pm 120^\circ$ | $\pm 170^\circ$ | $\pm 120^\circ$ | $\pm 175^\circ$ |

Tabla 13 Hoja de datos Kuka LBR iiwa 7 R800

Fuente: (KUKA en la fábrica KUKA, s. f.) (2017)

En la ilustración 40 se muestra al robot KuKa en el proceso industrial pick and place programado en CoppeliaSim.

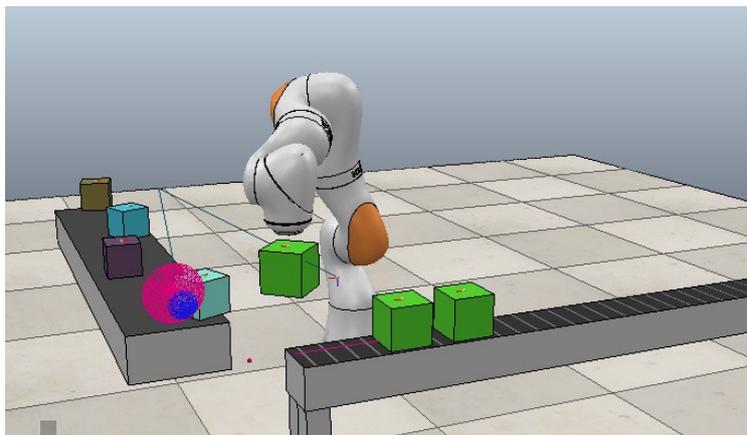


Ilustración 40 Proceso Industrial KuKa

Fuente: Propia (2021)

Así mismo en la ilustración 41 se muestra al robot ABB en el mismo escenario para poder llevar a cabo una comparación.

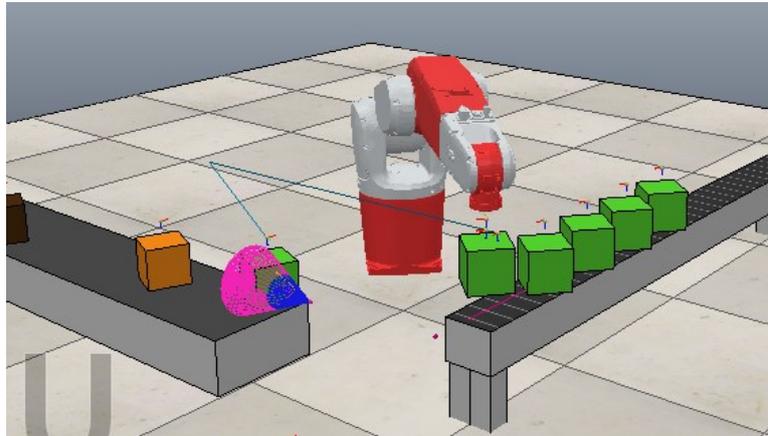


Ilustración 41 Proceso Industrial ABB

Fuente: Propia (2021)

El proceso consiste en escoger objetos entre malos y buenos, el objeto en este caso, serían cubos de diferentes colores. A través de la cinta 1, se estarán produciendo cubos de colores aleatorios en donde un sensor de proximidad determinará un objeto como bueno, si lo recibido por el sensor coincide con el tono de color verde adecuado, así como estipulado en la programación, lo cual estará en Anexos 2; si el cubo esta bueno, el brazo robótico entrará en acción y lo trasladará a la segunda cinta, en donde está ubicado un sensor de proximidad 2, al momento del sensor recibir información, la segunda cinta empezará a correr hasta donde el sensor 2 tenga alcance, y así poco a poco, cada objeto estará corriendo hasta llegar a un sensor 3 que recibirá los datos en una tabla del simulador en donde va acumulando las cajas obtenidas. En caso que el color este malo o la forma no esté como la deseada del original, la cinta seguirá corriendo y estará produciendo más cubos con colores aleatorios.

Una vez comprobado que ambos manipuladores seriales son funcionales con su espacio de trabajo en la tarea industrial, se puede continuar agregándole el obstáculo del humano, para poder así determinar si un grado del libertad de más trae algún tipo de beneficio en la reducción de singularidad y de una forma u otra, logra esquivar obstáculos.

En la ilustración 42 se observa al robot ABB con un obstáculo con posición en $X=+3.0000e-01$, $Y= -1.0000e-03$, $Z= +0.0000e+00$, cabe destacar que las coordenadas son con referencia al marco de coordenadas mundial.

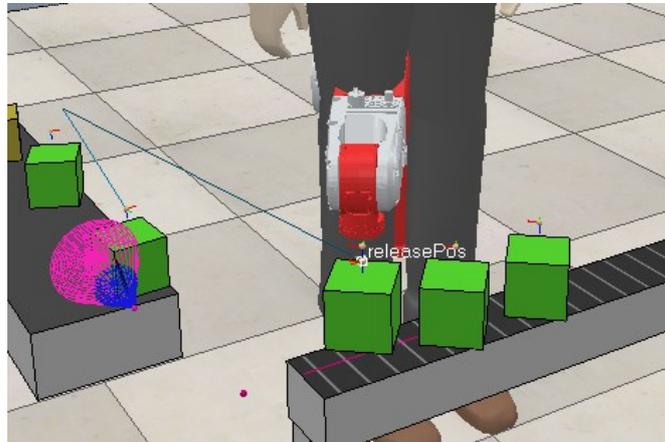


Ilustración 42 Simulación ABB

Fuente: Propia (2021)

Para poder hacer la comparación se estableció las coordenadas del obstáculo en la misma ubicación que la situación del ABB para el KUKA mostrado en la ilustración 42.

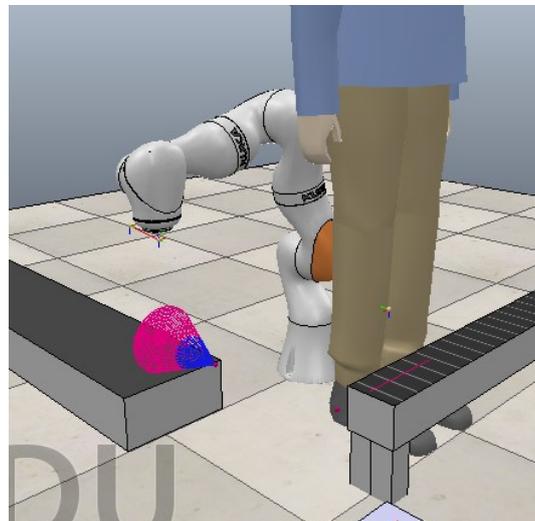


Ilustración 43 Simulación KUKA

Fuente: Propia (2021)

Al simular ambos robots, se nota que el manipulador serial con 6 grados de libertad, sufre colisiones a simple vista con el obstáculo en su junta número 5 mostrado en la ilustración 42, las opciones son limitadas de acuerdo a las pocas configuraciones articulares que dispone este brazo para evitar el obstáculo, lo cual no resuelve ese

problema de singularidad, en cambio se observan diferentes ángulos de vista en las ilustraciones 44-47 que el manipulador de 7 grados de libertad cuenta con la capacidad de evitar este obstáculo, eso es gracias a su grado de libertad extra.

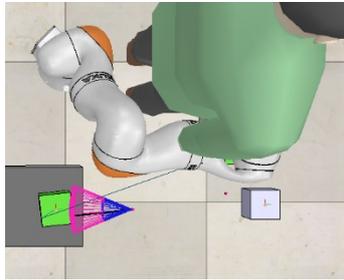


Ilustración 44 Simulación KUKA, vista superior

Fuente: Propia (2021)

La vista superior muestra la efectividad del robot KUKA para no colisionar, la cercanía del robot con el humano es muy poca, pero aun así su efectividad es apreciable.

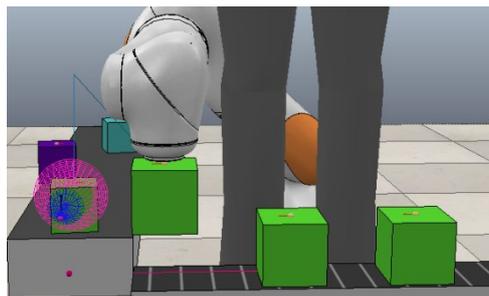


Ilustración 45 Simulación KUKA, vista frontal

Fuente: Propia (2021)

En la vista frontal se puede apreciar también una diferencia con los resultados obtenidos por parte del ABB.

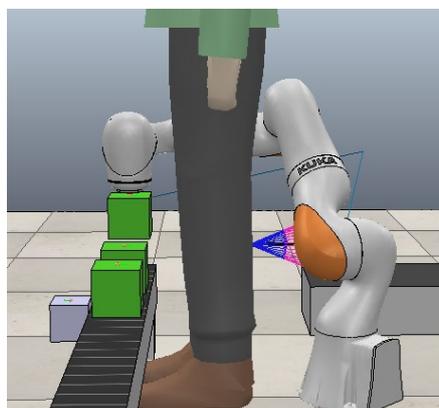


Ilustración 46 Simulación KUKA, vista lateral derecha

Fuente: Propia (2021)

En esta vista lateral derecha se logra poco apreciar los resultados, aunque es necesario apreciar la vista desde distintos ángulos.

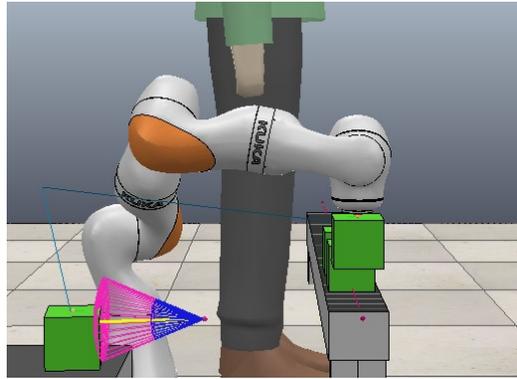


Ilustración 47 Simulación KUKA, vista lateral izquierda

Fuente: Propia (2021)

En esta vista se logra ver que no hay interferencia ni por el obstáculo ni por ambas cintas en el escenario, dado como comprobado que el manipulador KUKA se puede adaptar a su espacio de trabajo.

(Liu et al., 2017) describe que la estructura antropomórfica del manipulador es la que hace posible esta acción de esquivar obstáculos debido a su múltiples configuraciones articulares para evitar colisiones y resolver la singularidad. La estructura antropomórfica se separa con 3 grados de libertad por parte del hombro, 1 grado de libertad el codo y 3 grados de libertad en la muñeca. El movimiento de rotación de la articulación del codo en la ilustración 49 en donde no genera un cambio en la postura de su efector final haciendo un llamado de "auto movimiento" la cual es la que permite solucionar esta redundancia y singularidad haciendo la analogía de cinemática de un brazo humano con un brazo robótico mostrada en la ilustración 48. Es decir que la articulación de la muñeca está fijada a la posición y orientación del marco de coordenadas del efector final y el codo es libre de rotación sobre un arco circular, cuyo eje central es el vector entre la articulación del hombro a la muñeca mostrado en la

ilustración 50. Esto dependerá de la relación entre la postura del efector final y la flexibilidad de la muñeca.

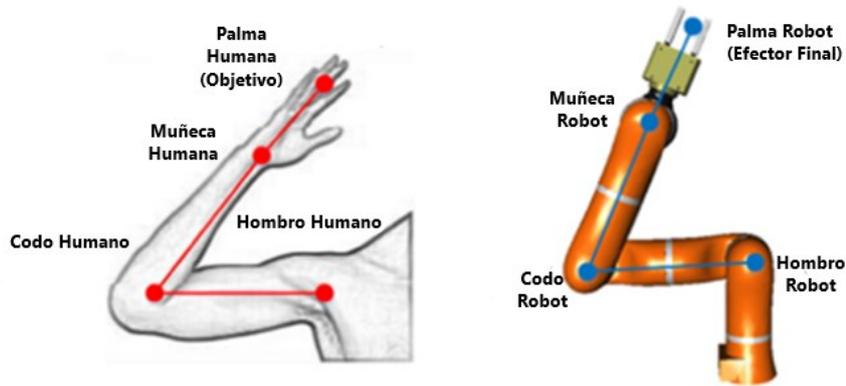


Ilustración 48 Analogía humana parecida.

Fuente: (Liu et al., 2017)

En esta ilustración 48 se ve lo parecido que se hace el brazo articulado robótico con el brazo articulado humano, donde es clara la semejanza entre ambos para poder realizar diferentes estudios de cinemática.

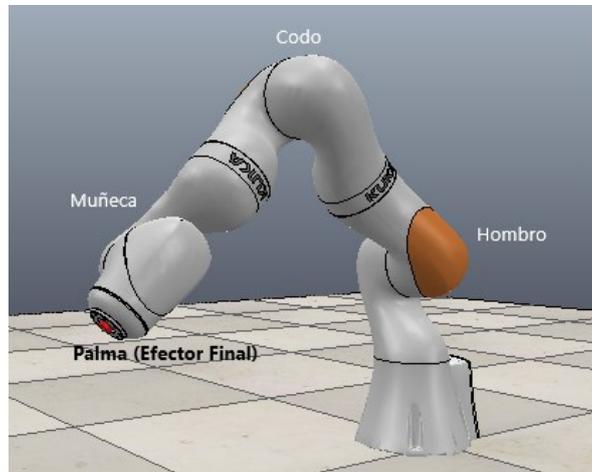


Ilustración 49 Analogía humana parecida.

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 50 se observa el parecido de la teoría de Liu, en donde se hace referencia en esta investigación.

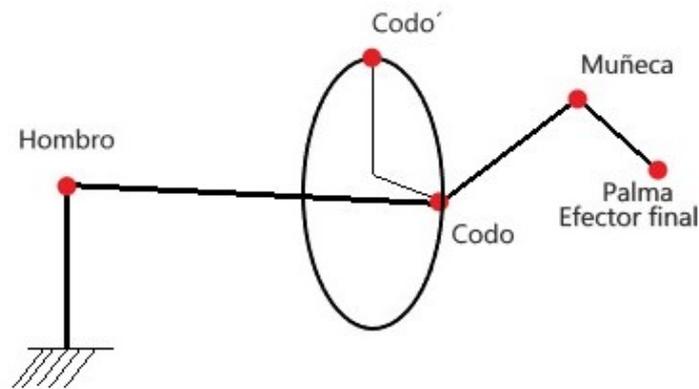


Ilustración 50 Analogía humana parecida.

Fuente: Propia (2021)

Con el objetivo de comparar ambos manipuladores, se logró hacer un estudio de sus capacidades, como lo es la velocidad para realizar el trabajo, teniendo en cuenta sus límites de acuerdo a la hoja de datos representada en la tabla 14 del robot KUKA y en la tabla 15 la del manipulador ABB.

Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6	Articulación 7
98°/s	98°/s	100°/s	130°/s	140°/s	180°/s	180°/s

Tabla 14 Hoja de datos Kuka LBR iiwa 7 R800

Fuente: (KUKA en la fábrica KUKA, s. f. 2017)

Se nota la diferencia de velocidades por cada articulación, donde se resalta velocidades bajas con respecto a las articulaciones principales. También se percata mediante las tablas una amplia diferencia en las velocidades de ambos manipuladores a prueba.

Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
288°/s	240°/s	300°/s	300°/s	300°/s	600°/s

Tabla 15 Robot 6-GDL ABB IBR1200 5-90

Fuente: (IRB 1200, data sheet, PDF, s. f.)

Se realizó pruebas de velocidad en cada repetición en donde el objeto llegaba a su destino, haciendo una comparación entre ambos manipuladores y determinar cuál es el más efectivo para tener en la industria en base a su eficiencia de rapidez. Para estas pruebas se tomó la velocidad de cada iteración en cada manipulador, en donde la iteración empezaba en su punto de casa, logrando una distancia de 0.8935m por ida, y más de un metro para completar una iteración, la distancia calculada está expuesta en la ilustración 51, hace el recorrido de dejar la pieza y vuelve a casa, siendo una iteración.

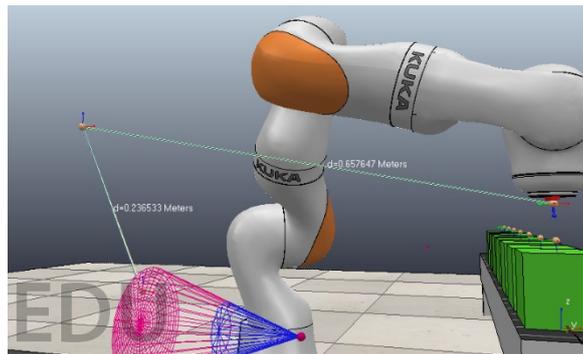
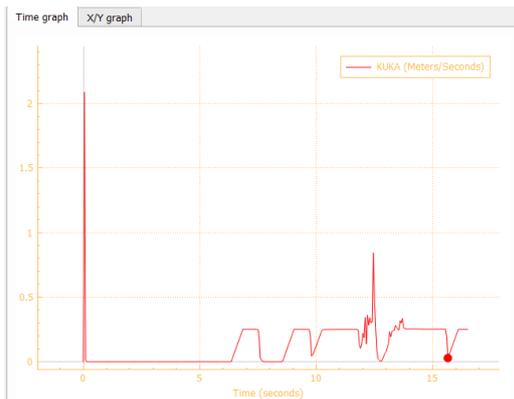


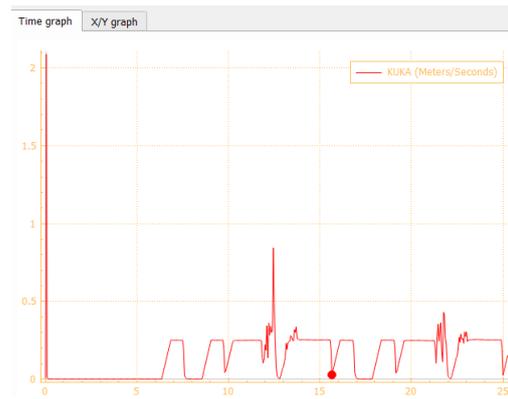
Ilustración 51 Distancia Recorrida

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 52 se muestran las diferentes iteraciones ejemplificadas en gráficas de velocidad, mostrando en el inciso a la primera iteración, b la segunda y c como la tercera iteración.



a.) 0.0447m/s, 23.15 segundos



b.) 0.04582m/s con 19.5 segundos

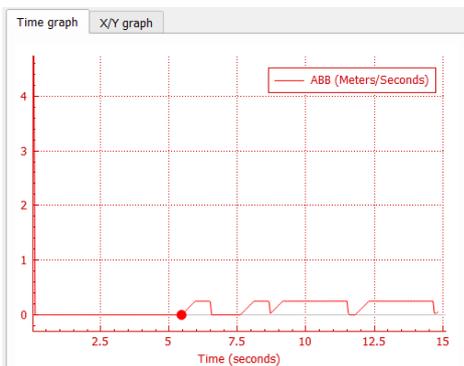


c.) 0.045m/s con 19.85segundos

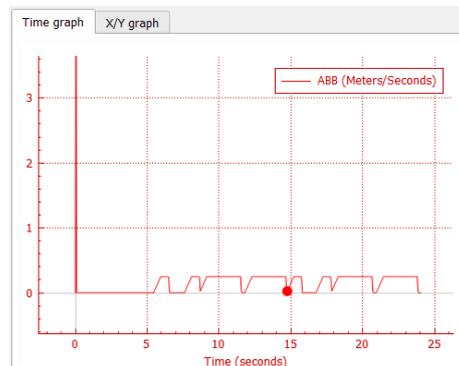
Ilustración 52 Gráficas m/s KuKa

Fuente: Propia (2021)

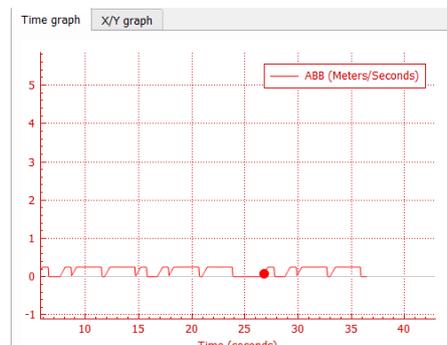
En las gráficas se muestra una relación de metros sobre segundos en el eje x, donde empieza el punto rojo hasta su final es una iteración, se denota que la iteración más rápida fue la segunda, inciso b, tardándose 19.5 segundos. En la ilustración 53 se logra observar los resultados por parte del manipulador ABB.



a.) 0.04524m/s con 19.75 segundos



b.) 0.4593m/s con 19.45 segundos



c.) 0.0447m/s con 19.95 segundos

Fuente: Propia (2021)

Siendo la segunda iteración la más rápida, inciso b. Se puede denotar que cada iteración hecha se ahorra tiempo para la industria, al mismo tiempo se aprovecha el espacio de trabajo con el manipulador de grado de libertad extra. Aun así, la diferencia entre ambos son milésimas de diferencia para determinar que manipulador es mejor. Las velocidades determinadas para esta prueba se basan a través de la tabla 16 en donde se tomaron las mismas velocidades para validar si ambos eran efectivos o había algo externo que hacía la diferencia.

		ARTICULACIONES						
<i>Manipulador</i>	1	2	3	4	5	6	7	
<i>ABB</i>	9.8°/s	9.8°/s	10°/s	13°/s	14°/s	18°/s	18°/s	
<i>KUKA</i>	9.8°/s	9.8°/s	-	13°/s	14°/s	18°/s	18°/s	

Tabla 16 Tabla de Velocidades Prueba 1

Fuente: Propia (2021)

En la tabla 16 se muestran las velocidades respectivas de cada articulación para la prueba anterior, en donde se elimina el grado de libertad número 3 en el ABB debido que es la articulación que permite el movimiento rotativo del codo en una forma circular sobre un eje entre las articulaciones de muñeca y hombro que permite al KUKA moverse de forma antropomórfica. En los resultados de la ilustración 54 se puede ver que, a una misma velocidad, el manipulador KUKA muestra una superioridad muy leve, lo cual no refleja una diferencia potencial en una producción de 5 minutos, demostrado en la tabla 17. Esta leve diferencia hipotéticamente se puede determinar que es debido al diseño de peso ligero presumido por su fabricante con 23.9kg del KUKA, comparado con el peso del ABB de 54kg.

<i>Prueba</i>	<i>KUKA</i>	<i>ABB</i>
<i>Prueba 1</i>	14	14
<i>Prueba 2</i>	14	14
<i>Prueba 3</i>	14	14
<i>Promedio</i>	14	14

Tabla 17 Pruebas de Productividad Misma Velocidad

Fuente: Propia (2021)

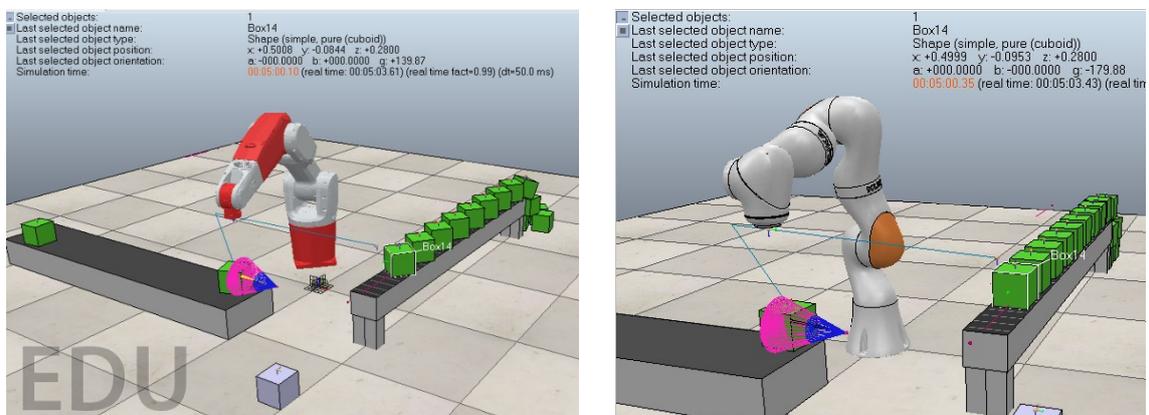
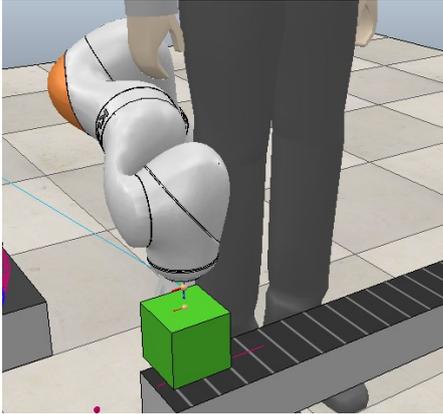


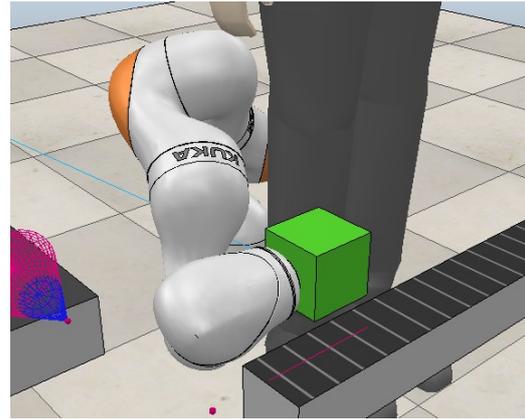
Ilustración 54 Pruebas de Productividad Misma Velocidad

Fuente Propia (2021)

Otra prueba realizada para observar el comportamiento de ambos manipuladores fue cambiar la orientación del punto releasePos a $\text{Alpha} = -9.0000\text{e}+01^\circ$, $\text{Beta} = +0.0000\text{e}+00^\circ$ y $\text{Gamma} = +0.0000\text{e}+00^\circ$, en donde el robot KUKA logró sustituir su cinemática inversa anterior con una nueva configuración articular que esquivaba el obstáculo y dando, aún más espacio de trabajo al humano, al mismo tiempo dando solución extra en escenarios en donde se necesita cambiar la orientación final del objeto a depositar en su destino, en la ilustración 55 se observa la orientación anterior inciso a y la actual, inciso b con diferentes ángulos en el releasePos. En cambio, el robot ABB en la simulación no logró ni esquivar el obstáculo, sino que, en busca de la cinemática inversa para lograr nuevas configuraciones articulares y alcanzar el objetivo, surgieron movimientos aleatorios, producto de una nueva cinemática inversa, que disminuía el espacio de trabajo del humano mostrado en la ilustración 56.



a.) Orientación anterior

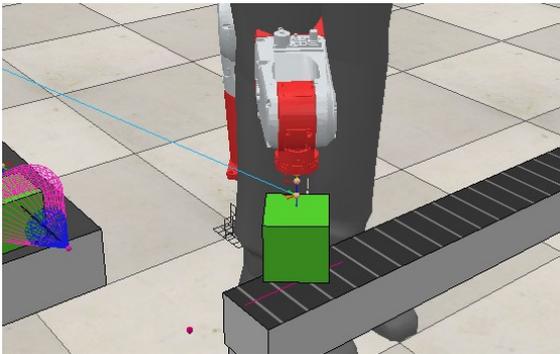


b.) Orientación Actual

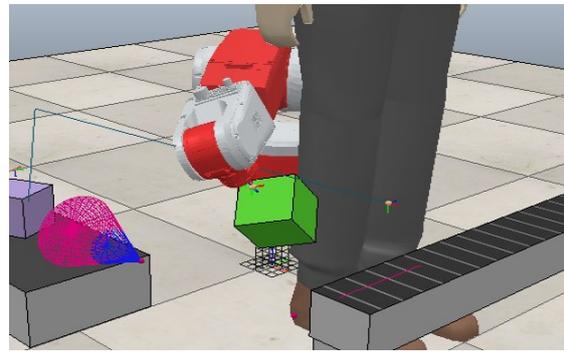
Ilustración 55 Cambio de Orientación releasePos KUKA

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración se logra ver la limitación que tiene el manipulador para moverse en espacios reducidos, mostrando una desventaja en escenarios que el espacio de trabajo no se pueda modificar para que el manipulador funcione.



a.) Orientación anterior



b.) Orientación Actual

Ilustración 56 Cambio de Orientación releasePos ABB

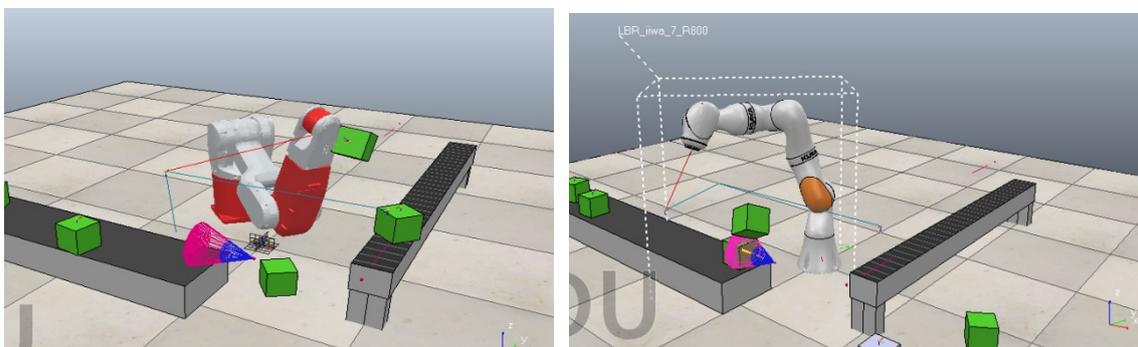
Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 56 inciso b se muestra el límite hasta dónde llega el robot con el cambio de orientación del releasePos, ya que no cuenta con las articulaciones necesaria para hacer este movimiento, no tiene la capacidad de hacer el arco circular hecha por la articulación codo, expuesta anteriormente; en estos escenarios es donde el robot ABB

no tiene la capacidad de hacer el auto movimiento para poder cambiar la orientación de su objeto, a una posición y orientación deseada.

Para obtener una conclusión más concreta y validar la respuesta de ¿qué manipulador le es factible a la industria?, se tomaron en cuenta datos adicionales a favor del KUKA, donde su capacidad de carga de 7kg, comparada al ABB de solo 5kg hace la diferencia; detalles como la reducción de velocidad en procesos repetitivos hace que sea el predilecto para muchas empresas, debido al diseño por parte de KUKA permite al manipulador tener agilidad de movimiento en sus articulaciones, hipotéticamente logrando más velocidad para realizar los procesos, validados anteriormente. Aun así, no logra convencer del todo cuando se tiene velocidades articulares mucho más altas obtenidas por parte del ABB, velocidades articulares casi del doble que ofrece al KUKA.

Se evaluó la productividad de ambos manipuladores realizando una prueba en tiempo real del proceso industrial con velocidades diferentes. Se realizaron 3 pruebas por cada velocidad nominal del patrón a seguir, a un 25% de sus velocidades articulares, el 45% y el 65%, no se tomó en consideración un 100% de sus velocidades ya que ambos mostraban comportamientos que dañaban el producto, mostrado en la ilustración 57. Cada muestra evalúa la rapidez del manipulador en realizar diferentes iteraciones en un periodo de 20 minutos como tiempo óptimo para llevar un conteo visible debido a limitaciones del programa. Los resultados en las tablas 18-25 muestra las pruebas de producción en cada velocidad de los manipuladores, las ilustraciones 58-61 muestra la prueba más productiva con respecto a cada velocidad del testeo.



a.) Falla ABB

b.) Falla KUKA

Ilustración 57 Velocidad Nominal del 100%

Fuentes: Propia (2021)

La iteración cuenta con cada vez que el manipulador deposita una caja de 5 kg en la segunda cinta, cada uno cuenta con sus velocidades articulares correspondientes al porcentaje en las tablas 14 y 15 establecido en la programación en CoppeliaSim. Cabe destacar que a medida se aumenta la velocidad de recolección del manipulador, proporcionalmente se disminuía el tiempo de 1-3 segundos para insertar un nuevo objeto, esto con el propósito que siempre esté disponible el producto y no se pierda tiempo en la espera de una nueva caja.

Se tomó un control de cálculo en donde se hacía conteo de cuantas cajas eran depositadas en un intervalo de 5 minutos eligiendo una prueba por cada velocidad mostrada en las tablas 19, 21, 23, 25 para obtener un segundo promedio por parte de cada manipulador. También se destaca que la velocidad de cada iteración era constante por parte de ambos manipuladores, mostrada en las gráficas de la ilustración 62.

Pruebas 25%	<i>KUKA</i>	<i>ABB</i>
Prueba 1	133	229
Prueba 2	134	229
Prueba 3	133	230
Promedio	133.33	229.33

Tabla 18 Pruebas de Productividad 25% Total

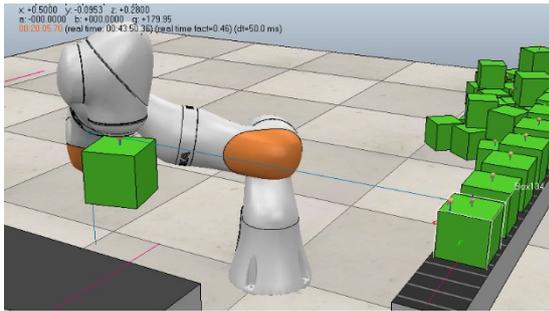
Fuente: Propia (2021)

Pruebas intervalo 5 Min 25%.	<i>KUKA</i>	<i>ABB</i>
5	33	57
10	34	58
15	33	57
20	34	58
Promedio	33.5	57.5

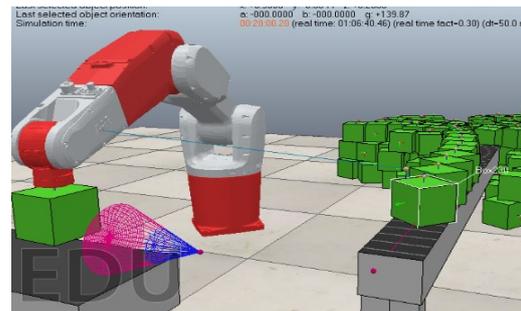
Tabla 19 Pruebas de Productividad Total 25% 5min

Fuente: Propia (2021)

En las tablas anteriores se pueden ver resultados ya determinantes, logrando el manipulador de 6-GDL una producción mayor que el 40% de lo que el robot de 7-GDL realizó.



a.) Iteración más productiva KUKA



b.) Iteración más productiva ABB

Ilustración 58 Velocidad Nominal del 25%

Fuentes: Propia (2021)

Con el objetivo de cubrir diversos campos de comparación y determinar bajo conclusiones concretas se hizo la prueba de ambos manipuladores con una velocidad mayor de un 45% de su velocidades articulares individuales, dando como resultado que el manipulador ABB produce más del 41% de lo que el KuKa a distintas velocidades.

Pruebas 45%	KUKA	ABB
Prueba 1	207	296
Prueba 2	207	297
Prueba 3	206	298
Promedio	206.667	297

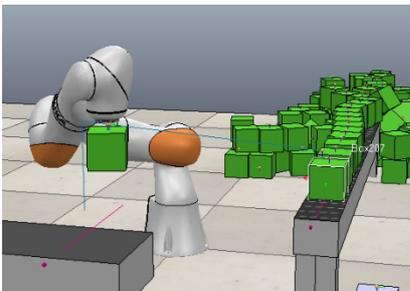
Tabla 20 Pruebas de Productividad 45% Total

Fuentes: Propia (2021)

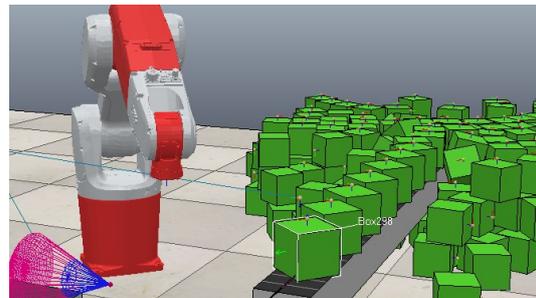
Pruebas intervalo 5 Min 45%.	KUKA	ABB
5	51	74
10	51	75
15	52	74
20	53	75
Promedio	51.75	74.5

Tabla 21 Pruebas de Productividad Total 45% 5min

Fuentes: Propia (2021)



a.) Iteración más productiva KUKA



b.) Iteración más productiva ABB

Ilustración 59 Velocidad Nominal del 45%

Fuentes: Propia (2021)

Para ser constantes se hizo la prueba de una velocidad más alta para comprobar si ambos manipuladores soportaban el trabajo y el peso del producto, las siguientes tablas comprueban el promedio obtenido por las pruebas.

Pruebas 65%	KUKA	ABB
Prueba 1	270	346
Prueba 2	269	347
Prueba 3	270	346
Promedio	269.667	346.33

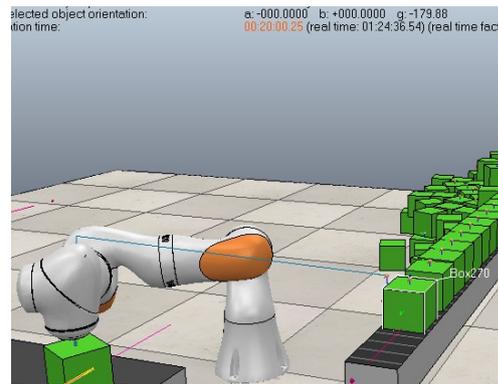
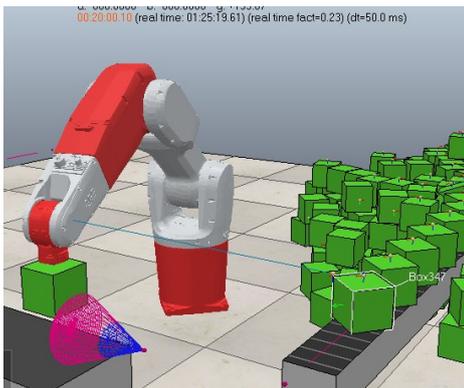
Tabla 22 Pruebas de Productividad 65% Total

Fuentes: Propia (2021)

Pruebas intervalo 5 Min 65%.	KUKA	ABB
5	68	86
10	67	87
15	68	86
20	67	87
Promedio	67.5	86.5

Tabla 23 Pruebas de Productividad 65% 5min

Fuentes: Propia (2021)



a.) Iteración más productiva KUKA

b.) Iteración más productiva ABB

Ilustración 60 Velocidad Nominal del 65%

Fuentes: Propia (2021)

Al momento de la prueba de velocidades se verificó si cada manipulador podía alcanzar una velocidad mayor del 65% sin presentar comportamientos extraños como colocar la caja en otro objetivo, o que su cinemática inversa no sea precisa como no seguir el patrón establecido, también que el objeto no vibre al momento de dejarlo en la segunda cinta. Se estudiaron los casos y dio como resultado que el robot KUKA tiene un límite de velocidad máxima del 87.9% con una varianza de ± 2 para realizar este proceso sin ningún

problema, en cambio el manipulador ABB superó las expectativas al sobreponerse y trabajar sin ningún comportamiento que dañe el objeto y tener un límite del 98% con la misma varianza, dando los resultados de productividad en las tablas 24 y 25. Los valores numéricos de las velocidades están adjuntos en Anexos 3.

Pruebas del 87.9% y 98%	<i>KUKA</i>	<i>ABB</i>
Prueba 1	320	373
Prueba 2	321	372
Prueba 3	321	373
Promedio	320.667	372.667

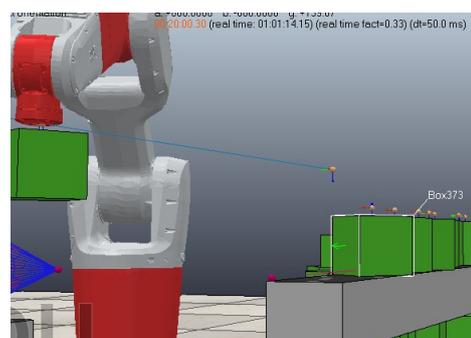
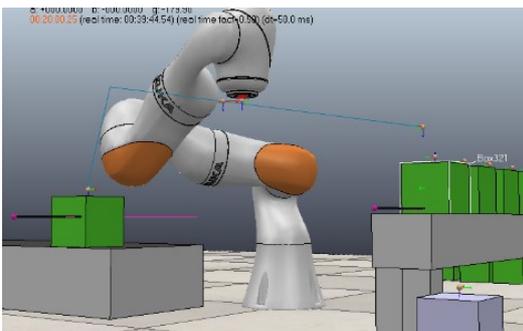
Tabla 24 Pruebas de Productividad Máxima Velocidad

Fuentes: Propia (2021)

Pruebas intervalo 5 Min Máxima Velocidad.	<i>KUKA</i>	<i>ABB</i>
5	80	93
10	80	93
15	81	93
20	80	94
Promedio	80.5	93.25

Tabla 25 Pruebas de Productividad Máxima Velocidad 5 min

Fuentes: Propia (2021)



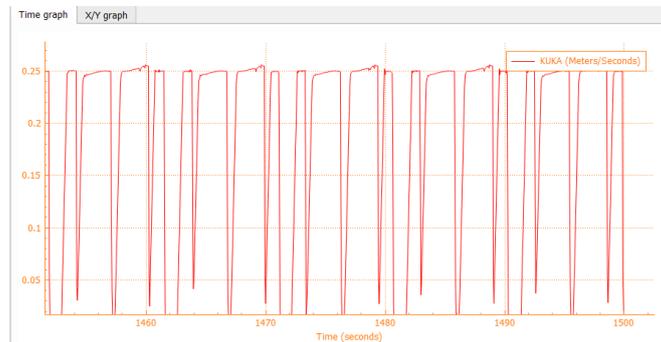
a.) Iteración más productiva KUKA

b.) Iteración más productiva ABB

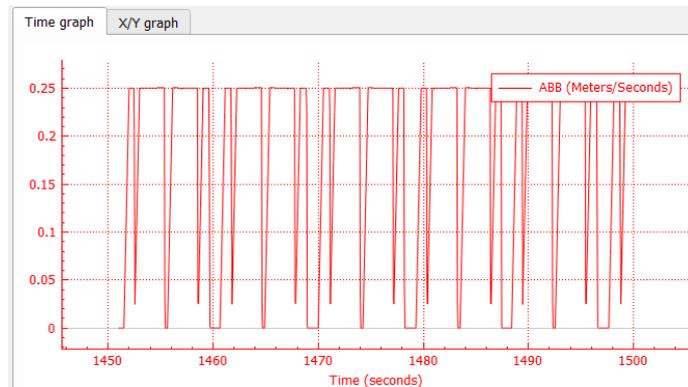
Ilustración 61 Velocidad Nominal Máxima

Fuentes: Propia (2021)

En las siguientes gráficas se demuestra que con respecto a las velocidades de cada manipulador en la etapa de prueba se verifico si las velocidades oscilaban entre bajas y altas, y en efecto fue lo contrario, el resultado fue constantes por parte de ambos manipuladores.



a.) Gráfica KUKA



b.) Gráfica ABB

Ilustración 62 Gráficas De Productividad m/s

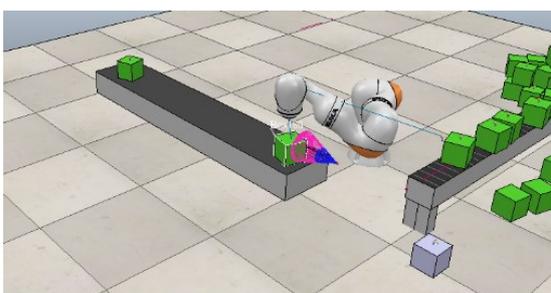
Fuente: Propia (2021)

Al analizar los resultados de productividad, se puede determinar que hay una gran ventaja de estabilidad en trabajos repetitivos a grandes velocidades por parte del ABB siendo muy potente con los resultados, en las tablas anteriores se puede notar que a

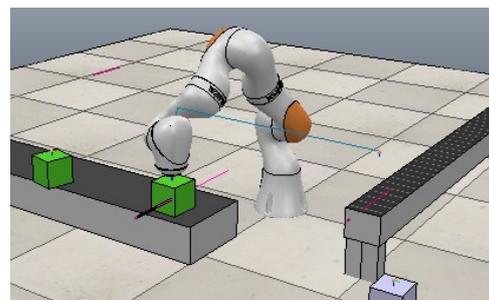
velocidades iguales, el KUKA pudo ser superior por milésimas de m/s, donde resulta insignificante para poder determinar su superioridad, en cambio en la prueba del 25% de sus velocidades relativas a las tablas 14 y 15 se ve que por la misma cantidad de tiempo el KUKA solo cubre el 58% de la producción total hecha por el ABB, aun así ambos a sus máximas velocidades solo cubre el 86.05 de la producción total mostrando una efectividad superior en ámbitos de producción masiva por parte del ABB.

El manipulador cuenta con una cadena cinemática bastante estable en sus articulaciones, lo que le permite trabajar con rapidez y eficiencia, esto se permite al tener un movimiento más rígido; no tener el grado de libertad extra le permite tener mayor estabilidad al no realizar movimientos extras en ciertos escenarios, como lo es el auto movimiento por parte del codo, referirse a la ilustración 50, lo cual por la estructura articular del manipulador KuKa, ve como necesario realizar estos movimientos extras, lo cual para ser estables, su velocidad tiene que ser más limitada y no realizar movimientos indeseados.

La ilustración 63 se logra ver el fallo del manipulador KuKa al excederse de sus velocidades. Se aprecia en la imagen que el manipulador pierde seguimiento de su patrón, alterando la cinemática de sus articulaciones y realizando movimientos indeseados. El robot KuKa muestra una gran desventaja para la industria en lo que respecta trabajos de pick and place a grandes velocidades.



a.) Falla



b.) Posición Inicial Correcta

Ilustración 63 Falla Kuka

Fuente: Propia (2021)

En cambio, si lo que se necesita es precisión y lograr alcance de su efector final a zonas de difícil acceso. El KuKa sobresale en ámbitos de trabajo en donde se realizan actividades de ensamblaje con niveles de precisión bastante sensibles, con su articulación extra le permite adaptarse al espacio de trabajo asignado sin necesidad de hacer lo

inverso como se ha observado con el ABB. Además, su fabricante presume la sensibilidad de sus sensores para hacerlo capaz de trabajar mano a mano con los humanos, evitando costos de riesgos por daños a colisiones o costos por utilería de seguridad como barreras de no acceso entre otras cosas, haciendo su productividad aún mayor.

De acuerdo a costos varía un poco el precio de ambos, mostrados en la tabla 26, siendo el ABB más económico debido a la rigidez de su estructura cinemática en y por la poca combinación de sensores para poder hacer uso de una buena colaboración humana robot, siendo más riesgos para el obrero que comparte espacio de trabajo, aumentando los costos en prevención de accidentes, como compra de barreras de protección entre otras cosas.

<i>Moneda</i>	<i>KUKA</i>	<i>ABB</i>
<i>Lempiras</i>	679,760.142	534 874.123
<i>Dólares</i>	28,000.00	22,032.00

Tabla 26 Precios de Manipuladores

Fuente: (*Industrial Robot Kuka Lbr liwa Cobot For The Man-machine Collaboration - Buy Collaboration Robot,Industrial Robot,Cobot Product on Alibaba.com, s. f.*)

Como parte extra se validó la simulación de un modelo de robot KUKA LBR4+ de 7 grados de libertad, parte de las simulaciones de movimiento de patrones de CoppeliaSim, en donde el robot esquiva diferentes obstáculos con un espacio de trabajo reducido, dando énfasis a lo mencionado anteriormente donde se demostró la ventaja de tener el grado de libertad extra al momento de evitar obstáculos y disminuir el espacio de trabajo.

Se destaca el uso del grado de libertad extra para realizar el auto movimiento y así evitar la colisión con los obstáculos, en la ilustración 64 se observa una simulación en donde el robot hace seguimiento hacia 4 objetivos, estando en un principio de posición casa.

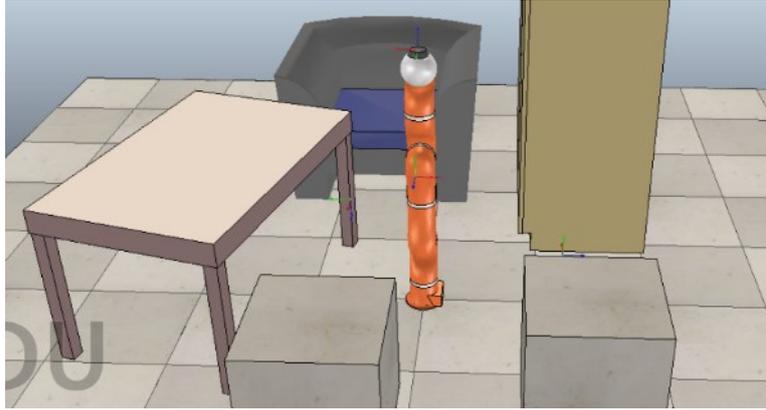


Ilustración 64 Posición Casa

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 65 se observa que para que el manipulador pueda llegar al objetivo 1 que es frente al sofá, el robot realiza un movimiento inicial en su primera articulación para luego formar hacer una rotación en su codo y quedar frente a su objetivo.

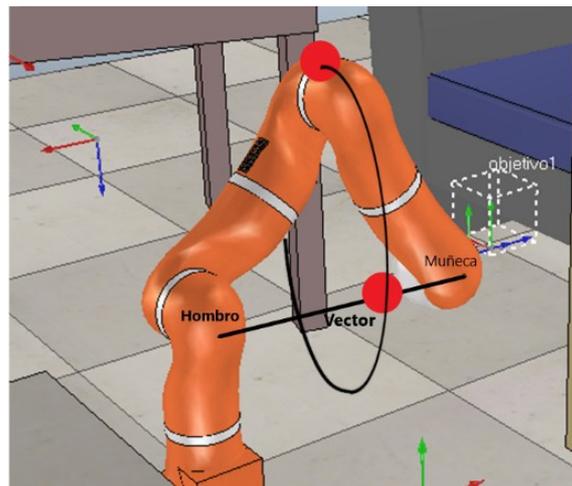


Ilustración 65 Primer Objetivo LBR4

Fuente: Propia (2021)

Para llegar a su segundo objetivo mostrado en la ilustración 66, el manipulador realiza un giro de 45 grados en su primera articulación, siempre de forma que la muñeca y el hombro formen un vector y el codo forman el arco circular para esquivar el closet.

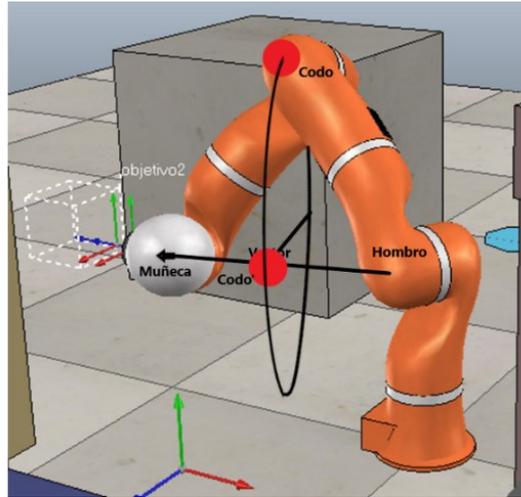


Ilustración 66 Segundo Objetivo LBR4

Fuente: Propia (2021)

Una vez el manipulador logre realizar auto movimiento, el podrá lograr diferentes configuraciones articulares para llegar a sus objetivos, así como fue realizado su tercer objetivo mostrado en la ilustración 67.

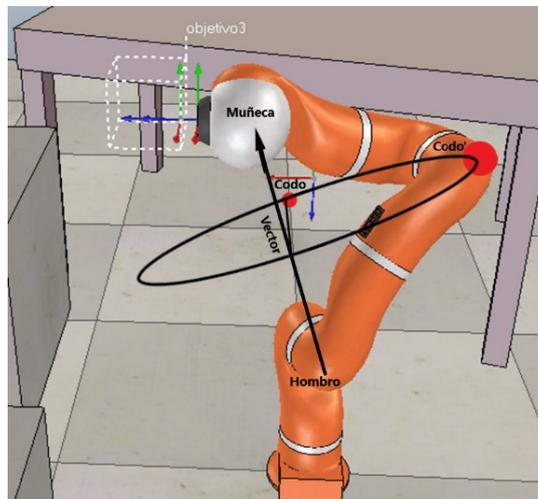


Ilustración 67 Tercer Objetivo LBR4

Fuente: Propia (2021)

El movimiento alrededor de un vector entre la articulación del hombro y la muñeca es muy práctico para estos manipuladores redundantes en donde brindan múltiples soluciones para llegar a un solo objetivo, así demostrado en la prueba.

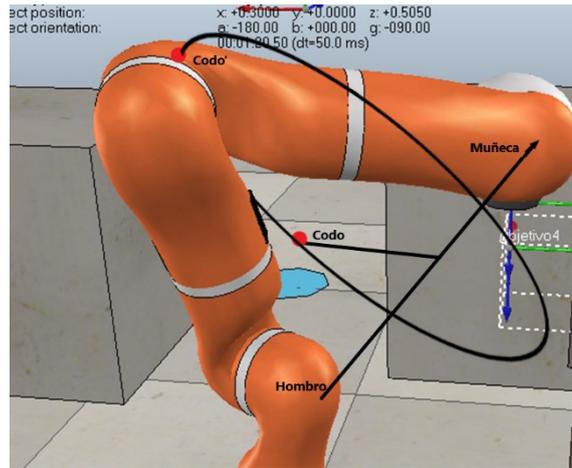


Ilustración 68 Cuarto Objetivo LBR4

Fuente: Propia (2021)

Como proceso extra se analizó el manipulador de 6 grados libertad Viper 650, elaborado por la empresa Omron. El manipulador tiene características muy similares al ABB, cuenta con un máximo soporte de carga de 5kg, tiene un peso de 34kg, lo cual lo hace más ligero que el ABB, tiene un alcance máximo de 653mm lo cual es desventaja frente al ABB que cuenta con un máximo alcance de 900mm. Las especificaciones de velocidades del manipulador Viper se observan en la tabla 27.

<i>Articulación</i>	<i>Articulación</i>	<i>Articulación</i>	<i>Articulación</i>	<i>Articulación</i>	<i>Articulación</i>
1	2	3	4	5	6
328°/s	300°/s	375°/s	375°/s	375°/s	600°/s

Tabla 27 Velocidades Viper 650

Fuente: (Viper 650/850 Robot with EMB-60R User's Guide, s. f.)

En la ilustración 69 se observa el espacio de trabajo específico a escala del manipulador serial Viper 650. Si se es observador y se compara la tabla 27 con la tabla 15 se nota una leve superioridad con respecto a las velocidades del ABB y aun mas con las del KUKA, haciendo una predicción intuitiva se puede predecir que su desempeño será mucho mejor que los dos anteriores.

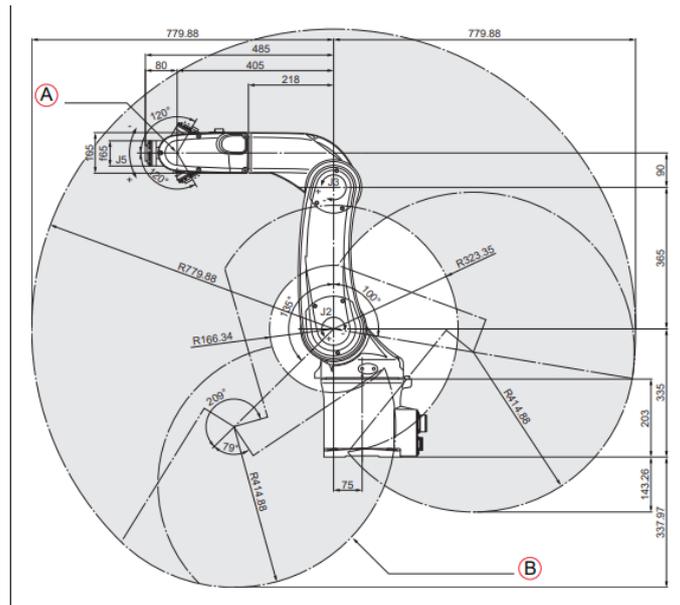


Ilustración 69 Espacio de Trabajo Viper 650

Fuente: (Viper 650/850 Robot with EMB-60R User's Guide, s. f.)

En la ilustración 69 se denota el espacio de trabajo de acuerdo a las limitaciones articulares del robot de acuerdo a la tabla 28.

Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
$\pm 170^\circ$	-190° a $+45^\circ$	-29° a 256°	$\pm 190^\circ$	$\pm 120^\circ$	$\pm 360^\circ$

Tabla 28 Limitaciones articulares Viper 650

Fuente: (Viper 650/850 Robot with EMB-60R User's Guide, s. f.)

En la tabla 29 se observan las velocidades establecidas para la primera prueba de los manipuladores, en donde se validará si trabajan de una forma eficiente a velocidades mínimas, mostrando un 2.98% promediado de la velocidades máximas articulares por parte del Viper y un 3.40% de la velocidad máxima del manipulador ABB.

	Articulaciones					
<i>Manipulador</i>	1	2	3	4	5	6
<i>ABB</i>	9.8°/s	9.8°/s	10°/s	13°/s	14°/s	18°/s
<i>Viper 650</i>	9.8°/s	9.8°/s	10°/s	13°/s	14°/s	18°/s

Tabla 29 Velocidades iguales

Fuente: Propia (2021)

Se denota en la tabla 30 el desempeño de ambos manipuladores a velocidades iguales, se muestra que su funcionamiento es bastante complaciente.

Pruebas V	<i>Viper 650</i>	<i>ABB</i>
Prueba 1	14	14
Prueba 2	14	14
Prueba 3	14	14
Promedio	14	14

Tabla 30 Productividad Velocidades Iguales

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 70 se puede observar los resultados obtenidos por ambos manipuladores en su desempeño a velocidades iguales en el proceso industrial.

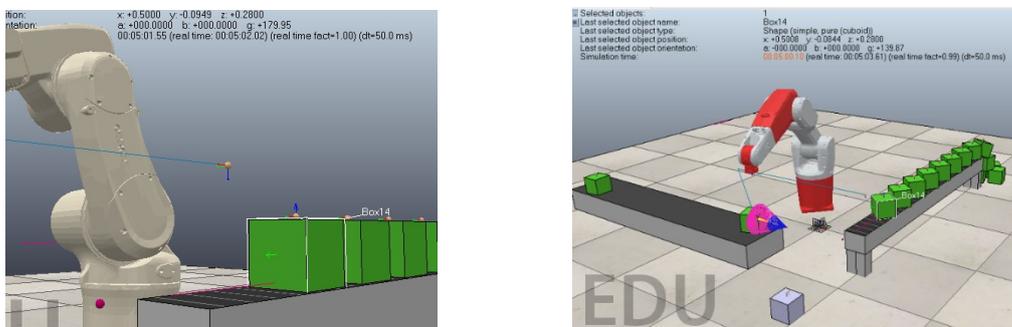


Ilustración 70 Productividad Velocidades Iguales

Fuente: Propia (2021)

También se realizaron pruebas a velocidades porcentuales referidas a las velocidades limitantes de cada manipulador, refiriéndose a un 25%, 45%, y 65%, los resultados de la segunda prueba son mostrados en la tabla 31.

<i>Pruebas 25%</i>	<i>Viper 650</i>	<i>ABB</i>
<i>Prueba 1</i>	233	229
<i>Prueba 2</i>	232	229
<i>Prueba 3</i>	233	230
<i>Promedio</i>	232.667	229.33

Tabla 31 Velocidades a un 25% Viper & ABB

Fuente: Propia (2021)

Se observan los resultados y como lo era esperado, el manipulador Viper logró obtener un 101.4% de la productividad hecha por el ABB, siendo de mayor provecho el Viper. En la ilustración 71 se muestran las vistas de esta prueba.

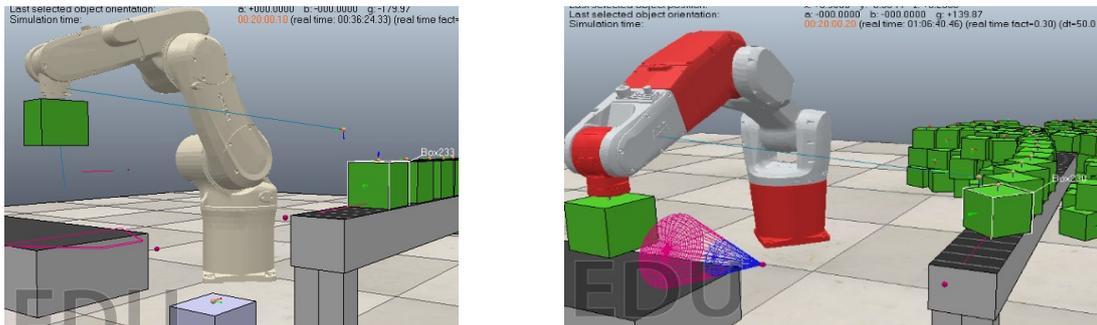


Ilustración 71 Velocidades a un 25% Viper & ABB

Fuente: Propia (2021)

En la tabla 32 se muestran los resultados a una velocidad articular del 45% en ambos manipuladores, logrando una producción del 102.91% de por parte del Viper comparado a lo realizado por parte del ABB.

<i>Pruebas 45%</i>	<i>Viper</i>	<i>ABB</i>
<i>Prueba 1</i>	306	296
<i>Prueba 2</i>	305	297

Prueba 3	306	298
Promedio	305.667	297

Tabla 32 Velocidades a un 45% Viper & ABB

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 72 se logra observar la correspondiente vista de estos resultados.

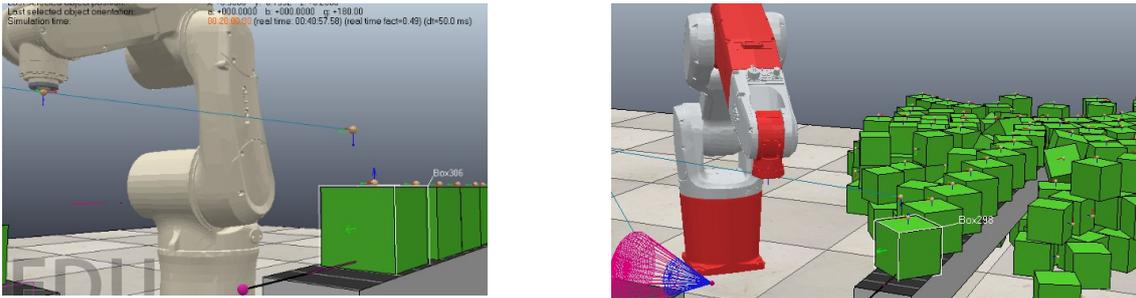


Ilustración 72 Velocidades a un 45% Viper & ABB

Fuente: Propia (2021)

En la tabla 33 se actualizó los resultados a un 65% de velocidades articulares dando una producción del 101.54% por parte del Viper en comparado con el ABB.

Pruebas 65%	<i>Viper</i>	<i>ABB</i>
Prueba 1	352	346
Prueba 2	351	347
Prueba 3	352	346
Promedio	351.667	346.33

Tabla 33 Velocidades a un 65% Viper & ABB

Fuente: Propia (2021)

En la ilustración 73 se logra observar la correspondiente vista de estos resultados.

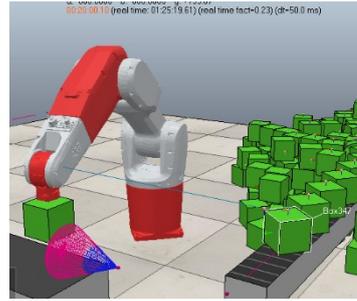
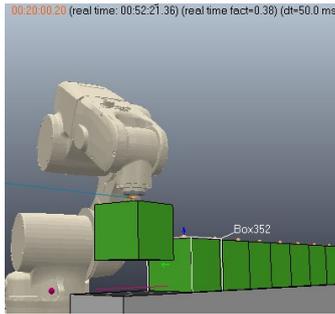


Ilustración 73 Velocidades a un 65% Viper & ABB

Fuente: Propia (2021)

De acuerdo los resultados se ven comportamientos bastante constantes con respecto a los porcentajes de productividad, es por eso que se realizó una última prueba observando los resultados a una velocidad máxima capaz de ambos manipuladores. Por parte del Viper logra una velocidad máxima del 96% comparado a un 98% del ABB, dando los resultados de la tabla 34.

<i>Pruebas del 96% y 98%</i>	<i>Viper</i>	<i>ABB</i>
<i>Prueba 1</i>	384	373
<i>Prueba 2</i>	383	372
<i>Prueba 3</i>	384	373
<i>Promedio</i>	383.66	372.667

Tabla 34 Velocidades Máximas velocidades Viper 650 vs ABB

Fuente: Propia (2021)

Se observa el comportamiento por parte del Viper sigue siendo levemente superior al ABB, logrando el 102.86% de la productividad hecha por el ABB, superándolo por un 2.865%, lo cual sería de gran ventaja viéndolo de una perspectiva productiva de 8 horas, logrando un conteo de 9216 cajas por parte del Viper y solo 8952 por parte del ABB, siendo ya más considerable la diferencia. Estos datos son influyentes en la toma de decisiones por parte de las empresas para mejorar su producción diaria, siendo los

manipuladores constantes en el tiempo y dándole su respectivo mantenimiento, dando como mejor opción en este escenario el Viper 650.

Comparado con el KUKA, daría más beneficio el manipulador de 7-GDL en escenarios donde se requiera movimientos articulares complejos como ensamblaje de partes internas de los automóviles, en donde no solo se requieran movimientos simples de pick and place entre otros, siendo un poco más lento, pero brindando soluciones para llegar a extremos que solo el brazo humano puede llegar.

5.4 Discusión

A lo largo de la investigación se fueron desarrollando aptitudes y conocimientos que enaltezcan la educación del lector, se usó como recurso diferentes estudios hechos correspondiente a la cinemática de los manipuladores seriales. En la investigación de Gong et al., (2019) expone un estudio de la cinemática del manipulador de 7 grados de libertad a base de métodos de solución de la cinemática inversa, en donde se determina el ángulo de la articulación vectorial del codo del robot para evitar obstáculos, se realizan pruebas de trayectoria simulados en Matlab estudiando las posibles colisiones del manipulador a base del estudio de la cinemática inversa, también se le adjunta la comparación de varios artículos en donde estudian rangos factibles a la cinemática inversa con base en la perturbación que actúa sobre la base del manipulador para obtener la solución óptima. Ghozlane & Knani, (2016) ofrece una solución a la cinemática del manipulador de 6 grados de libertad, logrando un diseño del robot en SolidWorks con sus características dinámicas y cinemáticas, lo cual hace falta un estudio de trabajo, mostrando la precisión de su efector final en la industria, como también la rapidez del robot para realizar algún tipo de trabajo. Li et al., (2018) expone en su proyecto la solución de la cinemática del robot, creando un modelo matemático a base del espacio vectorial de los manipuladores de 7 grados de libertad. El estudio se enfoca en robots antropomórficos, o como mencionado en el estudio, robots con base de estructura biomimética, imitando la vida humana. El artículo deriva ecuaciones para encontrar el punto óptimo del ángulo del vector de la articulación del codo, en cambio no expone los puntos importantes que figuran en la industria, no expone las claves del manipulador para facilitar el trabajo en la industria, de acuerdo a su rapidez de trabajo y algunos escenarios aplicables de esquivar obstáculos.

(Liu et al., 2017) propone una investigación bastante interesante en donde soluciona la cinemática del manipulador de 7 grados de libertad haciendo una analogía humana parecida al brazo humano, en este artículo Liu también expone la virtud del grado de libertad llamado codo, en donde busca el ángulo vectorial entre los planos de la articulación del hombro, articulación del codo y la articulación de la muñeca para resolver el auto movimiento y resolver la redundancia y singularidad de los manipuladores de 7 grados de libertad, expone que se puede diseñar un modelo matemático separando las articulaciones dependiendo de las posiciones claves del robot. (Chen et al., 2018) argumenta en su investigación una propuesta analítica para resolver la cinemática del manipulador de 7-GDL, propone un método geométrico en donde los eslabones son simplificados como vectores para poder calcular los ángulos de forma más sencilla. Propone también una solución articular de los elementos codo, hombro y muñeca para lograr un estudio preciso de su cinemática.

En ésta investigación, se hace estudio de la cinemática directa a base del algoritmo D-H, como estudios anteriores de (Chen et al., 2018; Ghozlane & Knani, 2016; Gong et al., 2019; Liu et al., 2017), usando métodos de configuraciones humano parecidas, en donde se usa la analogía del brazo humano con un brazo robótico para poder realizar un auto movimiento que permita sobreponerse a los obstáculos y evitar colisiones presentadas en la industria para llegar a una posición deseada, dando un logro a obtener un modelo matemático que describa con precisión la posición del efector final en un proceso industrial, se usó el modelo matemático para simular la vida real en la industria y así compararlo un robot de 6-GDL, con uno de 7-GDL, en la literatura no usan esta comparación que es lo que realmente importa para la empresa. La comparación es basada en la forma que ambos manipuladores esquivan obstáculos para llegar su objetivo, también se valora la rapidez de las iteraciones en procesos repetitivos para mejorar la producción en una cantidad de tiempo menor, es decir a más producto se transporte en menor cantidad de tiempo. Artículos describen la cinemática de ambos manipuladores, pero no destacan la comparación entre ambos ya que son usados para mismo escenarios habitualmente, la investigación se enfocó en usar el algoritmo D-H y crear un modelo matemático que sea de lo más preciso posible para describir la cinemática directa del manipulador y simularlo como fuese en la vida real, eliminando

costos de pruebas y validaciones de ver cuál es más factible comparando ambos manipuladores.

Esta investigación aporta detalles clave a la ciencia como para la industria, el modelo matemático puede ser usado para robots alternos con estructuras articulares parecidas al KUKA, y poder lograr una simulación del robot para describir la posición del efector final a base de los parámetros de las articulaciones conocidas. Con la comparación, ayuda a las empresas a determinar que robot sería más factible en el ámbito industrial humano-colaborativo para aumentar la producción de procesos repetitivos y aprovechar el espacio de trabajo reducido y no se requiera adaptarlo para el manipulador, el robot KUKA demostró que puede esquivar obstáculos de forma efectiva mediante una cinemática inversa favorable gracias a su estructura articular que permite configuraciones articulares variadas debido a su grado de libertad extra, o en procesos de producción sencilla que no se necesite una precisión tan exacta y se requiera una producción lo más alta posible.

VI. Conclusiones

En este capítulo se responderán las conclusiones obtenidas en el transcurso de esta investigación.

1. Se logró obtener un modelo matemático que describe la cinemática directa del manipulador de 7-GDL Kuka iiwa R800, es decir, la descripción matemática de la posición y orientación del efector final mediante el estudio del algoritmo Denavit-Hartenberg, realizando 2 transformaciones de rotación y 2 de traslación a base de los parámetros $(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i)$ de la cual se obtuvieron 7 matrices de transformación homogéneas debido a la cantidad de articulaciones presentes en el manipulador que definen la pose relativa ${}^0\xi_7$. En comparación con modelos matemáticos de manipuladores no redundantes resultan ser no tan complejos de simplificar debido que no existe la transformación extra de la pose relativa de ${}^6\xi_7$ requerida en el Kuka.
2. Se logró diseñar un diagrama de cinemática tridimensional, especificando los grados de libertad del manipulador nombrados como theta, resultando que el modelo matemático depende del tipo de articulación que le conforma, si la articulación es revoluta, la variable de junta sería el ángulo theta, en cambio, si es prismática, la variable de junta sería la traslación d. De esto dependerá la transformación del sistema de coordenadas i-enésimo con el i-enésimo-1 sujeto al movimiento realizado por la articulación.
3. Al haber realizado las distintas actividades de productividad donde se pone a prueba la agilidad articular de ambos manipuladores se determinó que el brazo robótico de 7-GDL Kuka supera al ABB teniendo control de movimientos antropomórficos descritos en el artículo de Liu que conlleva a resolver puntos de singularidad y resolución de la redundancia. En cambio, en las pruebas de rapidez resultó el manipulador ABB superior, obteniendo una producción mayor del 14% que el Kuka a máximas velocidades en el proceso industrial. Concluyendo que para las empresas que requieran un proceso repetitivo donde quieran aumentar su producción y no haya requerimiento de una destreza articular, el manipulador ABB sería el más factible, en cambio para las empresas donde se necesita una

destreza extra como una mano humana, el manipulador Kuka resultaría excelente, por ejemplo, en una ensambladora de partes internas de automóviles, donde se requiere una alta precisión articular.

VII. Bibliografía

- Baturone, A. O. (2005). *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Marcombo.
- Becerra, Y., Arbulu, M., Soto, S., & Martinez, F. (2019). A Comparison Among the Denavit—Hartenberg, the Screw Theory, and the Iterative Methods to Solve Inverse Kinematics for Assistant Robot Arm. En Y. Tan, Y. Shi, & B. Niu (Eds.), *Advances in Swarm Intelligence* (pp. 447-457). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26369-0_42
- Bogomolov, V., Lazarev, S., & Abanosimov, O. (2019). Calculation of Industrial Membrane Processes Based on Mathematical Modeling. *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, 94-98. <https://doi.org/10.1109/SUMMA48161.2019.8947609>
- Boriskina, Z. M., & Baryshnikova, O. O. (2020). The Mathematical Model of Motion of Particles in Vibrating Conveyors. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 76-79. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.1.76-79>
- Chadeev, V. M., & Aristova, N. I. (2017). Control of industrial automation. *2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/MLSD.2017.8109604>
- Chen, B., Cao, G., Li, W., Sun, J., Huang, S., & Zeng, J. (2018). An analytical solution of inverse kinematics for a 7-DOF redundant manipulator. *2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, 523-527. <https://doi.org/10.1109/URAI.2018.8441903>
- Chien, S., Lewis, M., Sycara, K., Kumru, A., & Liu, J. (2020). Influence of Culture, Transparency, Trust, and Degree of Automation on Automation Use. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 50(3), 205-214. <https://doi.org/10.1109/THMS.2019.2931755>
- Coiffet, P., & Chirouze, M. (1983). *An Introduction to Robot Technology*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6100-8>
- Corke, P. (2017a). Robot Arm Kinematics. En P. Corke (Ed.), *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms In MATLAB® Second, Completely Revised, Extended*

And Updated Edition (pp. 193-228). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7_7

Corke, P. (2017b). *Robotics, Vision and Control* (Vol. 118). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7>

Faria, C., Vilaca, J. L., Monteiro, S., Erlhagen, W., & Bicho, E. (2019). Automatic Denavit-Hartenberg Parameter Identification for Serial Manipulators. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 610-617. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927455>

Fiaidhi, J. (2018). Extreme Automation: A New Game-Changing Technology. *IT Professional*, 20(2), 88-90. <https://doi.org/10.1109/MITP.2018.021921656>

G, A. (2020, octubre 31). *Modelo Espiral*. Medium. <https://anaguevara560.medium.com/modelo-espiral-20d49551f565>

Galín, R., Meshcheryakov, R., & Samoshina, A. (2020). Mathematical Modelling and Simulation of Human-Robot Collaboration. *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 1058-1062. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208040>

García, F. X. S. (s. f.). *CONTROL DEL MOVIMIENTO DEL ROBOT MANIPULADOR DE 7 GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO MATLAB*. 106.

Ghosh, A. (2018). Dynamics of Rigid Bodies in Plane Motion. En A. Ghosh (Ed.), *Introduction to Dynamics* (pp. 239-309). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6095-3_6

Ghozlane, W., & Knani, J. (2016). Modelling and simulation using mathematical and CAD model of a robot with six degrees of freedom. *2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/CEIT.2016.7929054>

Gong, M., Li, X., & Zhang, L. (2019). Analytical Inverse Kinematics and Self-Motion Application for 7-DOF Redundant Manipulator. *IEEE Access*, 7, 18662-18674. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2895741>

Grachev, S. V., Smagin, D. I., Savelev, R. S., & Napreenko, K. S. (2020). Optimization Problems of Crash-Resistant Fuel Systems Design Calculations for Helicopters Using

Mathematical Modeling. *2020 11th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, 82-86.
<https://doi.org/10.1109/ICMAE50897.2020.9178903>

Grosch, P., & Thomas, F. (2019). *Parallel Robots With Unconventional Joints: Kinematics and Motion Planning*. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-11304-9>

Guicheng, W., Guoxin, W., Yunbo, Z., & Bo, J. (2019). Kinematics simulation analysis of a 7-DOF series robot. *2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 1599-1605.
<https://doi.org/10.1109/ICEMI46757.2019.9101720>

Gupta, A., Singh, A., Bharadwaj, D., & Mondal, A. K. (2021). Humans and Robots: A Mutually Inclusive Relationship in a Contagious World. *International Journal of Automation and Computing*. <https://doi.org/10.1007/s11633-020-1266-8>

Herbin, P., & Pajor, M. (2017). Interactive 7-DOF motion controller of the operator arm (ExoArm 7-DOF). *2017 IEEE International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, 185-188.
<https://doi.org/10.1109/INISTA.2017.8001154>

Industrial Robot Kuka Lbr Iiwa Cobot For The Man-machine Collaboration—Buy Collaboration Robot, Industrial Robot, Cobot Product on Alibaba.com. (s. f.). Recuperado 15 de marzo de 2021, de https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Robot-KUKA-LBR-iiwa-Cobot_1600195416128.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.339f3ca6ZmJrKx

Iqbal, H., Khan, M. U. A., & Yi, B.-J. (2020). Analysis of duality-based interconnected kinematics of planar serial and parallel manipulators using screw theory. *Intelligent Service Robotics*, 13(1), 47-62. <https://doi.org/10.1007/s11370-019-00294-7>

IRB 1200, data sheet, PDF. (s. f.). Recuperado 5 de marzo de 2021, de <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106103A6066&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Jitjumnong, K., Chujai, P., & Kamata, N. (2020). Robot Contest for Innovative Development in Education Technology. *International Journal of Mechanical*

Engineering and Robotics Research, 395-400. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.3.395-400>

Joseph, T. (2020). An Alternative Proof of Euler's Rotation Theorem. *The Mathematical Intelligencer*, 42(4), 44-49. <https://doi.org/10.1007/s00283-020-09991-z>

Kim, H. S. (2018). Design of a Novel 4-DOF High-Speed Parallel Robot. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 500-506. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.5.500-506>

Klug, C., Schmalstieg, D., Gloor, T., & Arth, C. (2019). A Complete Workflow for Automatic Forward Kinematics Model Extraction of Robotic Total Stations Using the Denavit-Hartenberg Convention. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 95(2), 311-329. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0931-4>

KUKA en la fábrica KUKA. (s. f.). KUKA AG. Recuperado 4 de marzo de 2021, de <https://www.kuka.com/es-es/sectores/base-de-datos-de-soluciones/2016/07/solution-robotics-nave-7>

Kurniadi, E., Darmawijoyo, & Pratiwi, W. D. (2020). Developing a learning design of mathematical modelling courses on understanding basic concept of mathematical modelling. *Journal of Physics: Conference Series*, 1480, 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1480/1/012033>

Lau, P. L., & Lau, P. L. (2019). La extensión de la personalidad jurídica en la Inteligencia Artificial. *Revista de Bioética y Derecho*, 46, 47-66.

Lee, J., Park, G., Shin, J., & Woo, J. (2017). Industrial robot calibration method using denavit—Hatenberg parameters. *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 1834-1837. <https://doi.org/10.23919/ICCAS.2017.8204265>

Li, S., Wang, Z., Zhang, Q., & Han, F. (2018). Solving Inverse Kinematics Model for 7-DoF Robot Arms Based on Space Vector. *2018 International Conference on Control and Robots (ICCR)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICCR.2018.8534498>

Liu, W., Chen, D., & Steil, J. (2017). Analytical Inverse Kinematics Solver for Anthropomorphic 7-DOF Redundant Manipulators with Human-Like Configuration Constraints. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 86(1), 63-79. <https://doi.org/10.1007/s10846-016-0449-6>

- Lu, H., Zhou, X., & Li, R. (2016). An optimization algorithm for trajectory planning of a 7-DOF redundant manipulator. *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, 2016-2021. <https://doi.org/10.1109/CGNCC.2016.7829100>
- Matthews, P., & Greenspan, S. (2020). *Automation and Collaborative Robotics: A Guide to the Future of Work*. Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5964-1>
- Ozgoren, M. K. (2020). *Kinematics of General Spatial Mechanical Systems* (1.^a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119195740>
- Paff, M., Wang, A. S., Phielipp, N., Vadera, S., Morenkova, A., Hermanowicz, N., & Hsu, F. P. K. (2020). Two-year clinical outcomes associated with robotic-assisted subthalamic lead implantation in patients with Parkinson's disease. *Journal of Robotic Surgery*, *14*(4), 559-565. <https://doi.org/10.1007/s11701-019-01025-x>
- Perrusquía, A., & Yu, W. (2020). Human-in-the-Loop Control Using Euler Angles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, *97*(2), 271-285. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01058-2>
- Php, G. E. (2009, agosto 8). Modelo Espiral: MODELO ORIGINAL DE BOEHM. *Modelo Espiral*. <http://modeloespiral.blogspot.com/2009/08/modelo-original-de-boehm.html>
- Pio, L., Musleh, L., Paraboschi, I., Pistorio, A., Mantica, G., Clermidi, P., Leonelli, L., Mattioli, G., Sarnacki, S., & Blanc, T. (2020). Learning curve for robotic surgery in children: A systematic review of outcomes and fellowship programs. *Journal of Robotic Surgery*, *14*(4), 531-541. <https://doi.org/10.1007/s11701-019-01026-w>
- Robotics History Project—IEEE Robotics and Automation Society*. (s. f.). Recuperado 1 de febrero de 2021, de <https://www.ieee-ras.org/publications/ra-l/ra-letters-information-for-authors/review-procedure/12-educational-resources-outreach/101-robotics-history-project>
- Rojas, A. M., & Barbieri, G. (2019). A Low-Cost and Scaled Automation System for Education in Industrial Automation. *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 439-444. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869535>
- Sánchez-Martín, F. M., Jiménez Schlegl, P., Millán Rodríguez, F., Salvador-Bayarri, J., Monllau Font, V., Palou Redorta, J., & Villavicencio Mavrich, H. (2007). Historia de la

robótica: De Arquitas de Tarento al Robot da Vinci (Parte II). *Actas Urológicas Españolas*, 31(3), 185-196.

Sun, J., Cao, G., Li, W., Liang, Y., & Huang, S. (2017). Analytical inverse kinematic solution using the D-H method for a 6-DOF robot. *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 714-716. <https://doi.org/10.1109/URAI.2017.7992807>

Tavallaey, S. S., & Ganz, C. (2019). Automation to Autonomy. *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 31-34. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869329>

Torres, J. A. M. (s. f.). *La modelación matemática en el contexto de la robótica: Una actividad didáctica realizada por aprendizaje de proyectos para el concepto de proporción*. 9.

Types of Robots - ROBOTS: Your Guide to the World of Robotics. (s. f.). Recuperado 1 de febrero de 2021, de <https://robots.ieee.org/learn/types-of-robots/>

Viper 650/850 Robot with eMB-60R User's Guide. (s. f.). 148.

What Is a Robot? - ROBOTS: Your Guide to the World of Robotics. (s. f.). Recuperado 1 de febrero de 2021, de <https://robots.ieee.org/learn/what-is-a-robot/>

Yang, L., & Zhang, G. (2018). An Analytic Solution Study for a 7-DOF Redundant Robot Manipulator. *2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 1057-1061. <https://doi.org/10.1109/CYBER.2018.8688249>

Yee, J., Low, C. Y., Ong, P., Soh, W. S., Hanapiah, F. A., Zakaria, N. A. C., Enzberg, S. von, Asmar, L., & Dumitrescu, R. (2020). Verification of Mathematical Model for Upper Limb Spasticity with Clinical Data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 824, 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/824/1/012013>

Zakaria, N. A. C., Komeda, T., Low, C. Y., Hanapiah, F. A., & Inoue, K. (2015). Spasticity mathematical modelling in compliance with modified ashworth scale and modified tardieu scales. *2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 1893-1897. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2015.7364673>

Zambrano, R. G. (2011). *Diseño y Puesta en Marcha de un Laboratorio Remoto de Robótica*. Editorial Académica Española.

<https://www.morebooks.de/store/es/book/dise%C3%B1o-y-puesta-en-marcha-de-un-laboratorio-remoto-de-rob%C3%B3tica/isbn/978-3-8443-3843-0>

Zaplana, I., Claret, J. A., & Basanez, L. (2018). Análisis Cinemático de Robots Manipuladores Redundantes: Aplicación a los Robots Kuka LWR 4+ y ABB Yumi. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 15(2), 192. <https://doi.org/10.4995/riai.2017.8822>

Zhaojun Meng, Rui Chen, Changzhi Sun, & Yuejun An. (2010). The mathematical simulation model of brushless dc motor system. *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*, V12-625-V12-629. <https://doi.org/10.1109/ICCASM.2010.5622430>

Zheng, X., Zheng, Y., Shuai, Y., Yang, J., Yang, S., & Tian, Y. (2019). Kinematics analysis and trajectory planning of 6-DOF robot. *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 1749-1754. <https://doi.org/10.1109/ITNEC.2019.8729280>

VIII. Anexos

8.1 Anexos 1. Programación Matlab

8.1.1 Modelo Matemático Cinemática Directa KUKA LBR iiwa 7 R800

```
%Tesis Roger Midence
%Parámetros Estándar DH
syms th d alph a

A = [ cos(th)  -cos(alph)*sin(th)  sin(alph)*sin(th)  a*cos(th)
      sin(th)  cos(alph)*cos(th)  -sin(alph)*cos(th)  a*sin(th)
      0        sin(alph)          cos(alph)        d
      0        0                  0                  1 ];

% A = troztz(th)*transl(0,0,d)*transl(a,0,0)*trotx(alph)
% Articulación 1
syms th1 L1
T01 = subs(A,{th,d,a,alph},{th1-pi/4,L1,0,-pi/2})

% Articulación 2
syms th2
T12 = subs(A,{th,d,a,alph},{th2,0,0,pi/2})

% Articulación 3
syms th3 L2
T23 = subs(A,{th,d,a,alph},{th3,L2,0,-pi/2})

% Articulación 4
syms th4
T34 = subs(A,{th,d,a,alph},{-th4,0,0,pi/2})

% Articulación 5
syms th5 L3
T45 = subs(A,{th,d,a,alph},{th5,L3,0,-pi/2})

% Articulación 6
syms th6
T56 = subs(A,{th,d,a,alph},{th6,0,0,pi/2})

% Articulación 7
syms th7 L4
T67 = subs(A,{th,d,a,alph},{th7,L4,0,0})
```

```

% CDirecta Total T07
Tt = simplify(T01*T12*T23*T34*T45*T56*T67)

Tt2 = subs(Tt,{L1,L2,L3,L4},{0.340,0.400,0.400,0.1110})

% Obtener las coordenadas X, Y, Z con angulos en 0
% *pi/180
q1 = 0; q2 = 0; q3 = 0; q4 = 0; q5 = 0; q6 = 0; q7 = 0;
Tt3 = subs (Tt2 ,{th1,th2,th3,th4,th5,th6,th7},{q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7})

```

8.1.2 Plot del Modelo Matemático

```

L1 = 340; L2 = 400; L3= 400; L4= 111;

% L = Eslabón ( [ Th d a alph])

L(1)= Link ( [0 L1 0 -pi/2]);

L(2)= Link ( [0 0 0 pi/2]);

L(3)= Link ( [0 L2 0 -pi/2]);

L(4)= Link ( [0 0 0 pi/2]);

L(5)= Link ( [0 L3 0 -pi/2]);

L(6)= Link ( [0 0 0 pi/2]);

L(7)= Link ( [0 L4 0 0]);

Rob = SerialLink (L);
Rob.name = 'Simulación 7-GDL';
%q1 = 0 ; q2 = 0 ; q3 = 0 ; q4 = 0 ; q5 = 0; q6 = 0; q7 = 0;
%q1 = 45 ; q2 = 45 ; q3 = 45 ; q4 = 45 ; q5 = 45; q6 = 45; q7 = 45
%q1 = 58.2600 ; q2 = 58.9400 ; q3 =123.6000 ; q4 = -58.9400 ; q5
=58.2500 ; q6 = 58.2500; q7 =58.2500 ;
Rob.plot ( [ q1 ,q2 ,q3,q4,q5,q6,q7 ])

Rob.fkine([ q1 ,q2 ,q3,q4,q5,q6,q7 ])

```


8.2 Anexos 2. Programación CoppeliaSim

8.2.1 Programación KUKA LBR iiwa 7 R800

```
-- Velocity and acceleration on path
nominalVel = .65
nominalAcc = 3

-- Get object and script handles
target = sim.getObjectHandle("Target")
connector = sim.getObjectHandle("Connector")
belt1_script = sim.getScriptHandle("ConveyorBelt")

-- Initialize variables
pickupDummy = -1
releasePath = -1

function sysCall_threadmain()
    while sim.getSimulationState()~=sim.simulation_advancing_abouttostop
    do
        -- Pause script until a signal is applied on integer signal
        "objectAvailable"
        sim.waitForSignal("objectAvailable")
        -- Obtain current pickupPath-handle
        path = sim.getObjectHandle("pickupPath")
        -- Follow the pickupPath
        sim.followPath(target,path,3,0,nominalVel,nominalAcc)
        -- Wait one second to mimic a connection process
        sim.wait(1)
        -- Connect the connector to pickupDummy
        sim.setLinkDummy(connector,pickupDummy)
        -- Set link type

sim.setObjectInt32Parameter(connector,sim.dummyintparam_link_type,sim.dum
my_linktype_dynamics_loop_closure)
        -- Follow back the pickup path
        sim.followPath(target,path,3,1,-nominalVel,-nominalAcc)
        -- Follow release path
        sim.followPath(target,releasePath,3,0,nominalVel,nominalAcc)
        -- Wait 0.25 seconds
        sim.wait(0.25)
        -- Disconnect pickupDummy from connector
        sim.setLinkDummy(connector,-1)
        -- Follow back releasePath to "idle" position
        sim.followPath(target,releasePath,3,1,-nominalVel,-nominalAcc)
    end
end
```

8.2.2 Programación ABB IRB1200 5-90 & Omron Viper 650

```
-- Velocity and acceleration on path
nominalVel = 2.8224
nominalAcc = 4

-- Get object and script handles
target = sim.getObjectHandle("Target")
connector = sim.getObjectHandle("Connector")
belt1_script = sim.getScriptHandle("ConveyorBelt")

-- Initialize variables
pickupDummy = -1
releasePath = -1

function sysCall_threadmain()
    while sim.getSimulationState()~=sim.simulation_advancing_abouttostop
    do
        -- Pause script until a signal is applied on integer signal
        "objectAvailable"
        sim.waitForSignal("objectAvailable")
        -- Obtain current pickupPath-handle
        path = sim.getObjectHandle("pickupPath")
        -- Follow the pickupPath
        sim.followPath(target,path,3,0,nominalVel,nominalAcc)
        -- Wait one second to mimic a connection process
        sim.wait(1)
        -- Connect the connector to pickupDummy
        sim.setLinkDummy(connector,pickupDummy)
        -- Set link type

sim.setObjectInt32Parameter(connector,sim.dummyintparam_link_type,sim.dum
my_linktype_dynamics_loop_closure)
        -- Follow back the pickup path
        sim.followPath(target,path,3,1,-nominalVel,-nominalAcc)
        -- Follow release path
        sim.followPath(target,releasePath,3,0,nominalVel,nominalAcc)
        -- Wait 0.25 seconds
        sim.wait(0.25)
        -- Disconnect pickupDummy from connector
        sim.setLinkDummy(connector,-1)
        -- Follow back releasePath to "idle" position
        sim.followPath(target,releasePath,3,1,-nominalVel,-nominalAcc)
    end
end
end
```

8.3 Anexos 3. Tablas de Velocidades Porcentuales

Velocidad de 25%	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6	Articulación 7
KUKA	24°/s	24°/s	25°/s	32.5°/s	135°/s	45°/s	45°/s
ABB	72°/s	60°/s	75°/s	75°/s	75°/s	150°/s	---

Velocidad de 45%	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6	Articulación 7
KUKA	44.1°/s	44.1°/s	45°/s	58.5°/s	63°/s	81°/s	81°/s
ABB	129.6°/s	108°/s	135°/s	135°/s	135°/s	270°/s	---

Velocidad de 65%	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6	Articulación 7
KUKA	63.7°/s	63.7°/s	65°/s	84.5°/s	91°/s	117°/s	117°/s
ABB	187.2°/s	156°/s	195°/s	195°/s	195°/s	390°/s	---

Velocidad de 87.9%	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6	Articulación 7
KUKA	86.24°/s	86.24°/s	88°/s	114.4°/s	123.2°/s	158.4°/s	158.4°/s

Velocidad de 98%	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
ABB	282°/s	235.2°/s	294°/s	294°/s	294°/s	528°/s

Velocidad de 25%	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
Viper 650	82°/s	75°/s	93.75°/s	93.75°/s	93.75°/s	125°/s

Velocidad de 45%	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
Viper 650	147.6°/s	135°/s	168.75°/s	168.75°/s	168.75°/s	270°/s

Velocidad de 65%	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
Viper 650	213.2°/s	195°/s	243.75°/s	243.75°/s	243.75°/s	390°/s

Velocidad de 96%	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5	Articulación 6
Viper 650	314.88°/s	288°/s	360°/s	360°/s	360°/s	576°/s