

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN POR COMPUTADOR
DE LA CINEMÁTICA DIRECTA DE UNA MANO
ROBÓTICA DE CINCO DEDOS**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
DISEÑO, PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

AUTOR: ALFONSO XAVIER BOADA ZURITA
alfonso.boada@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. WILLAN LEOPOLDO MONAR MONAR, MBA, MSc
william.monar@epn.edu.ec

QUITO, SEPTIEMBRE DE 2016

DECLARACIÓN

Yo, Alfonso Xavier Boada Zurita, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Alfonso Xavier Boada Zurita

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Ing. Alfonso Xavier Boada Zurita bajo mi supervisión.

Ing. Willan Monar Monar, MBA, MSc

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional por el elevado nivel de conocimientos impartidos a lo largo de la Maestría y por su esfuerzo al llevar adelante dicho programa.

A los profesores de la Maestría, quienes con total desinterés pusieron sus conocimientos al servicio del estudiantado.

Al Sr. Ing. Willan Monar Monar, MBA, MSc, por la acertada dirección prestada para la culminación de este proyecto.

Alfonso Boada Zurita

DEDICATORIA

A L :: G :: D :: G :: A :: D :: U ::

A la memoria de Luis Alfonso, mentor, maestro y amigo.

A Francia, encarnación de lo más sublime

A Mónica, inseparable compañera en el viaje de retorno a casa

A Thaís Alejandra y Daniel Alfonso, principal razón de mi existir

Con todo mi amor, Alfonso

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------------|
| DECLARACIÓN..... | i |
| CERTIFICACIÓN..... | ii |
| AGRADECIMIENTOS..... | iii |
| DEDICATORIA..... | iv |
| RESUMEN..... | xiii |
| PRESENTACIÓN..... | xiv |
| | |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 4 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 5 |
| 1.3. ALCANCE DEL PROYECTO..... | 5 |
| 1.4. PLANTEAMIENTO TEÓRICO..... | 6 |
| 1.4.1. IDEAS PRELIMINARES EN TORNO A LA ROBÓTICA..... | 6 |
| 1.4.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS..... | 7 |
| 1.4.3. DEFINICIONES BÁSICAS..... | 8 |
| 1.4.4. LOS SUBSISTEMAS DE UN ROBOT..... | 8 |
| 1.4.5. CONSIDERACIONES ESENCIALES DEL MOVIMIENTO..... | 9 |
| 1.4.6. TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS..... | 12 |
| 1.4.7. PARAMETRIZACIÓN DENAVIT-HARTENBERG..... | 18 |
| 1.4.8. ALGORITMO DH PARA LA CINEMÁTICA DIRECTA DE UN ROBOT..... | 20 |

| | |
|---|-----------|
| 1.4.9. MÉTODOS D-H ESTÁNDAR Y D-H MODIFICADO..... | 22 |
| 1.4.10. CONSIDERACIONES ANATÓMICAS DE LA MANO HUMANA..... | 25 |
| CAPÍTULO 2..... | 32 |
| DISEÑO GEOMÉTRICO DEL PROTOTIPO..... | 32 |
| 2.1. GENERALIDADES..... | 32 |
| 2.2. DISEÑO DEL BASTIDOR, CARPO Y METACARPO..... | 34 |
| 2.3. DISEÑO DE LOS MANIPULADORES (DEDOS)..... | 40 |
| CAPÍTULO 3..... | 47 |
| ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SIMULACIÓN DE LA CINEMÁTICA | |
| DIRECTA DEL DISPOSITIVO..... | 47 |
| 3.1. GENERALIDADES..... | 47 |
| 3.2. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL SEGUNDO AL QUINTO DEDO..... | 49 |
| 3.2.1. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DEDO ÍNDICE..... | 49 |
| 3.2.2. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DEDO MEDIO..... | 58 |
| 3.2.2. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DEDO ANULAR..... | 63 |
| 3.2.2. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DEDO MEÑIQUE..... | 67 |
| 3.2. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL PRIMER DEDO..... | 71 |
| CAPÍTULO 4..... | 80 |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS FINALES..... | 80 |
| 4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO..... | 80 |
| 4.1.1. VALIDACIÓN DEL DEDO INDICE..... | 87 |
| 4.1.2. VALIDACIÓN DEL DEDO MEDIO..... | 88 |
| 4.1.3. VALIDACIÓN DEL DEDO ANULAR..... | 89 |

| | |
|---|------------|
| 4.1.4. VALIDACIÓN DEL DEDO MEÑIQUE..... | 90 |
| 4.1.5. VALIDACIÓN DEL DEDO PULGAR..... | 91 |
| 4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 92 |
| 4.2. CONCLUSIONES..... | 96 |
| 4.3. RECOMENDACIONES..... | 98 |
| 4.4. BIBLIOGRAFÍA..... | 100 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1. Dimensiones promedio de las falanges de una mano humana de adulto masculino en porcentaje de la longitud total de la mano..... | 31 |
| Tabla 2.1: Longitud de los metacarpianos..... | 38 |
| Tabla 2.2: Dimensiones de los dedos..... | 41 |
| Tabla 3.1: Parámetros Denavit-Hartenberg para el segundo dedo..... | 52 |
| Tabla 3.2: Parámetros Denavit-Hartenberg para el tercer dedo..... | 59 |
| Tabla 3.3: Parámetros Denavit-Hartenberg para el cuarto dedo..... | 64 |
| Tabla 3.4. Parámetros Denavit-Hartenberg para el quinto dedo..... | 68 |
| Tabla 3.5. Parámetros denavit-hartenberg para el primer dedo..... | 72 |
| Tabla 4.1. Valores permitidos de ángulos de articulaciones..... | 84 |
| Tabla 4.2. Desplazamientos angulares asignados a las articulaciones..... | 85 |
| Tabla 4.3. Hoja de cálculo dinámica para ingreso de datos de simulación..... | 86 |
| Tabla 4.4. Hoja de cálculo dinámica para ingreso de datos de simulación..... | 94 |
| Tabla 4.5. Error promedio..... | 95 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1: Esquema de una junta revoluta..... | 11 |
| Fig. 1.2: Localización de un punto en el plano x-y..... | 13 |
| Fig. 1.3: Rotación de un sistema de ejes coordenados..... | 14 |
| Fig. 1.4: Coordenadas de “P” en el sistema “u”, “v”..... | 15 |
| Fig. 1.5: Ejes “z” de cada articulación de un mecanismo..... | 19 |
| Fig. 1.6: Método D-H estándar vs modificado..... | 23 |
| Fig. 1.7: Esquema del esqueleto de la mano humana..... | 27 |
| Fig. 1.8: Amplitud del movimiento de la muñeca..... | 28 |
| Fig. 1.9: Amplitud de rotación de la articulación metacarpo-falángica..... | 29 |
| Fig. 1.10: Amplitud de movimiento de las falanges distal y media..... | 29 |
| Fig. 1.11: Abducción de los dedos..... | 30 |
| Fig. 1.12: Abducción del dedo pulgar..... | 30 |
| Fig. 1.13: Longitud total de la mano..... | 31 |
| Fig. 2.1: Esqueleto de la mano derecha (palmar)..... | 33 |
| Fig. 2.2: Esqueleto de la mano derecha (lateral)..... | 34 |
| Fig. 2.3: Eslabón fijo..... | 35 |
| Fig. 2.4: Diseño propuesto para el carpo y dimensionamiento del mismo..... | 36 |
| Fig. 2.5: Varias vistas simuladas del carpo..... | 37 |
| Fig. 2.6: Esquema del diseño geométrico propuesto para los metacarpianos..... | 38 |
| Fig. 2.7: Ensamble de los metacarpianos con el carpo..... | 39 |
| Fig. 2.8: Ensamble del pulgar y su metacarpiano..... | 40 |
| Fig. 2.9: Ensamble de los dedos y sus grados de libertad..... | 41 |
| Fig. 2.10: Dimensiones genéricas de los dedos..... | 41 |
| Fig. 2.11-a: Ensamble de los 4 dedos con el carpo y el metacarpo..... | 42 |
| Fig. 2.11-b: Simulación del ensamble metálico..... | 42 |
| Fig. 2.12: Varias posiciones del dispositivo..... | 43 |
| Fig. 2.13: Ensamble del metacarpiano del pulgar con el carpo y sus grados de libertad..... | 44 |
| Fig. 2.14: Ensamble del dedo pulgar..... | 44 |
| Fig. 2.15-a: Mano completa distendida..... | 45 |
| Fig. 2.15-b: Mano distendida, vista inferior..... | 45 |
| Fig. 2.16-c: Vista superior de la mano completa..... | 45 |

| | |
|---|----|
| Fig. 2.16-d: Ensamble completo de la mano con el eslabón fijo..... | 46 |
| Fig. 3.1: Asignación de nuevos eslabones para simulación..... | 49 |
| Fig. 3.2: Configuración esquelética del segundo dedo..... | 50 |
| Fig. 3.3: Numeración de eslabones y asignación de ejes z_i | 50 |
| Fig. 3.4: Determinación del nuevo eslabón metacarpiano..... | 51 |
| Fig. 3.5: Sistemas de coordenadas y dimensionamiento del segundo dedo..... | 51 |
| Fig. 3.6: Programación en Matlab para el segundo dedo..... | 56 |
| Fig. 3.7-a: Pantalla de simulación cinemática..... | 57 |
| Fig. 3.7-b: Pantalla de desplazamientos angulares..... | 57 |
| Fig. 3.8: Determinación del nuevo eslabón metacarpiano..... | 58 |
| Fig. 3.9: Sistemas de coordenadas y dimensionamiento del tercer dedo..... | 59 |
| Fig. 3.10: Programación MATLAB para simulación del tercer dedo..... | 62 |
| Fig. 3.11: Pantalla de simulación del tercer dedo..... | 63 |
| Fig. 3.12: Diagrama esquelético y dimensional del cuarto dedo..... | 63 |
| Fig. 3.13: Programación MATLAB para simulación del cuarto dedo..... | 66 |
| Fig. 3.14: Pantalla de simulación del cuarto dedo..... | 67 |
| Fig. 3.15: Diagrama esquelético y dimensional del quinto dedo..... | 67 |
| Fig. 3.16: Programación MATLAB para simulación del quinto dedo..... | 70 |
| Fig. 3.17: Pantalla de simulación del quinto dedo..... | 71 |
| Fig. 3.18: Diagrama esquelético y dimensional del primer dedo..... | 72 |
| Fig. 3.19: Programación MATLAB para simulación del primer dedo..... | 75 |
| Fig. 3.20: Pantalla de simulación del primer dedo..... | 75 |
| Fig. 3.21: Simulación de la mano completa..... | 76 |
| Fig. 3.22: Vistas de la posición alcanzada por la mano luego de la simulación. ... | 78 |
| Fig. 4.a: Determinación del ángulo θ_1 | 81 |
| Fig. 4.b: Determinación del ángulo θ_2 | 81 |
| Fig. 4.c: Determinación del ángulo θ_3 | 82 |
| Fig. 4.d: Determinación del ángulo θ_4 | 82 |
| Fig. 4.e: Determinación del ángulo θ_5 | 83 |
| Fig. 4.f: Determinación del ángulo θ_6 | 83 |
| Fig. 4.1: Pantalla de simulación del dedo índice para validación..... | 87 |
| Fig. 4.2: Cálculo de coordenadas finales del dedo índice para validación..... | 87 |
| Fig. 4.3: Pantalla de simulación del dedo medio para validación..... | 88 |
| Fig. 4.4: Cálculo de coordenadas finales del dedo medio para validación..... | 88 |

| | |
|---|----|
| Fig. 4.5: Pantalla de simulación del dedo anular para validación..... | 89 |
| Fig. 4.6: Cálculo de coordenadas finales del dedo anular para validación..... | 89 |
| Fig. 4.7: Pantalla de simulación del dedo meñique para validación..... | 90 |
| Fig. 4.8: Cálculo de coordenadas finales del dedo meñique para validación..... | 90 |
| Fig. 4.9: Pantalla de simulación del dedo pulgar para validación..... | 91 |
| Fig. 4.10: Cálculo de coordenadas finales del dedo pulgar para validación..... | 91 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| Anexo 1: Códigos de programación para Matlab..... | 100 |
| Anexo 2: Diseño geométrico del dispositivo: Diagramas esquemáticos en Solid Works de los elementos constitutivos..... | 112 |

RESUMEN

La presente tesis inicia con la formulación del problema a tratarse, que gira alrededor de las implicaciones psicológicas y laborales que se generan cuando una persona enfrenta la pérdida de uno de sus miembros superiores, es decir una de sus manos, por amputación debida a enfermedad crónica o accidente. Mediante un breve análisis situacional, se determina un número aproximado de personas que sufren este tipo de padecimientos y las secuelas que ellos conllevan.

Posteriormente se realiza un pre-diseño de tipo geométrico cuyo principal objetivo es el de proporcionar una idea de la forma que debería tener una prótesis para ajustarse al modelo matemático que se planteará posteriormente. Este pre-diseño trata esencialmente de la forma de ensamblaje de las partes y su consiguiente grado de movilidad, así como del diseño de un elemento bastidor, que se asemeja al esqueleto de una mano humana. Este diseño es esencial para establecer el grado de movilidad de cada dedo y del conjunto así como para determinar las dimensiones de cada parte a fin de poder validar el funcionamiento del dispositivo

A continuación se realiza un análisis de la cinemática directa del dispositivo utilizando el algoritmo Denavit-Hartenberg estándar, así como el software Matlab y su herramienta “robot”. Dicho análisis se desarrolla individualmente para cada dedo a fin de posteriormente realizar un análisis conjunto, y consiste en determinar teóricamente las coordenadas geométricas que debe alcanzar cada dedo al proporcionársele diferentes desplazamientos angulares a cada una de sus articulaciones, mediante la aplicación de la matriz global de transformación de coordenadas para cada dedo. Una vez realizado este análisis se procede a hacer una simulación que consiste en escribir el código de programación en Matlab para cada dedo y luego proporcionar valores de giro a cada una de las articulaciones para determinar la posición final de cada uno de los dedos.

Por último, se procede a validar los resultados obtenidos, proceso que consiste en realizar el cálculo de las coordenadas obtenidas para cada dedo al realizar desplazamientos angulares arbitrarios sobre cada articulación y comparar los resultados obtenidos con los valores arrojados por la simulación.

PRESENTACIÓN

La cinemática directa es un proceso que busca encontrar las coordenadas finales del último eslabón de una cadena cinemática cuyas articulaciones tienen diferentes grados de libertad y orientaciones espaciales relativas. La herramienta matemática utilizada comúnmente es el algoritmo Denavit-Hartenberg, ampliamente utilizado en robótica, que provee un análisis matemático de la transformación de sistemas de coordenadas mediante productos matriciales, proporcionando como resultado las coordenadas buscadas. A partir de este análisis se puede desarrollar la cinemática inversa y el análisis dinámico del mecanismo, siendo por lo tanto, su formulación y validación, condición esencial para el desarrollo posterior de un prototipo.

El software Matlab es un programa especialmente diseñado para trabajar sistemas matriciales y operaciones entre matrices, siendo por esta razón ampliamente utilizado en varios tópicos de ingeniería por la facilidad que proporciona para resolver problemas complejos. Particularmente, en robótica, utiliza la herramienta “robot” de su toolbox, la que es capaz de desarrollar la cinemática directa, la inversa y la dinámica de un brazo robótico de hasta 6 grados de libertad, así como de simular la trayectoria seguida por el brazo para desplazamientos angulares arbitrarios.

En el presente estudio se analiza y simula la cinemática directa de una mano robótica de dedos, cuyo objetivo fundamental es el de constituirse en el primer paso para el desarrollo de prótesis de extremidades humanas que sean cercenadas por diversas causas y que puedan accionarse mediante señales biológicas provistas por el cerebro, abriendo las puertas a la investigación en el campo de la biónica.

Pese a que la herramienta de Matlab solo provee simulación a brazos de 6 grados de libertad, mediante un código de programación propio es posible incluir los 5 dedos y la articulación de la muñeca dentro del mismo programa y visualizar la mano completa y sus posibles movimientos, lo que abre la posibilidad de introducir estructuras robóticas con muchos grados de libertad adicionales, como en el caso de la mano humana, que en esta aproximación posee 29 grados. Aunque el costo computacional sea elevado, es deseable trabajar en la simulación de la mano considerando todas las posibilidades de movimiento que anatómicamente ella posee.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Estado ecuatoriano, como signatario y Estado parte de la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad de las Naciones Unidas¹, aprobada por la Asamblea General de Naciones Unidas el 13 de diciembre de 2006², está obligado a promover, proteger y garantizar el pleno goce de los derechos humanos de las personas con discapacidad y su plena igualdad ante la ley. En consecuencia, y en razón de la adhesión del Ecuador a dicha Convención³, en fecha 30 de marzo de 2007, ratificada por la Asamblea Nacional Constituyente en abril de 2008, y al amparo del Art.47 de la Constitución de la República del Ecuador, que reza “El Estado garantizará políticas de prevención de las discapacidades y de manera conjunta con la sociedad y la familia procurará la equiparación de oportunidades para las personas con discapacidad y su integración social”, el Consejo Nacional de la Igualdad de Discapacidades (CONADIS) formuló la Agenda Nacional para la Igualdad en Discapacidades (ANID) 2013-2017⁴ abriendo de esta manera la posibilidad de que el Estado ecuatoriano formule y asuma de manera integral y en su totalidad las políticas pertinentes que sustenten su status de miembro participante en esta Convención.

¹ “Convención sobre los derechos de las personas con discapacidad”, recuperado de: <http://www.un.org/esa/socdev/enable/documents/tccconvs.pdf>

² Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Convenci%C3%B3n_Internacional_sobre_los_Derechos_de_las_Personas_con_Discapacidad

³ Recuperado de: <http://www.discapacidadesecuador.org/portal/images/stories/File/leyes%20y%20ordenanzas/NORMATIVALEGALQUEAMPARALOSDERECHOSDELASPERSONASCONDISCAPACIDAD.pdf>

⁴Recuperado de: <http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/09/Agenda-Nacional-para-Discapacidades.pdf>

Según los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos en el Censo de Población y Vivienda (CPV) 2010⁵, en el Ecuador existía en ese año un total de 343.714 (2,37% de la población) personas que presentaban discapacidad físico-motora debida a parálisis o amputaciones a nivel nacional. De ellos, un 62% aproximadamente pertenecen al sector urbano, y el resto al rural.

Adicionalmente, la Misión Solidaria Manuela Espejo, creada por la Vicepresidencia de la República, determinó en 2010 que existen en el Ecuador 294.803 personas discapacitadas en situación crítica, sea por el estado avanzado de su discapacidad o por su entorno socio-económico⁶.

Bajo este entorno, el CONADIS ha asumido la plena responsabilidad de la ejecución de una política de Estado alrededor de las discapacidades, que busca esencialmente la inclusión o re-inclusión en la sociedad de aquellas personas que tienen limitaciones en su desempeño diario, sean éstas congénitas o adquiridas.

Las discapacidades físico-motoras adquiridas por amputaciones tienen en general dos tipos de origen: enfermedad crónica o accidentes (laborales, de tránsito, domésticos, etc.)⁷

En cualquiera de los casos, se abren dos frentes de acción íntimamente ligados con respecto a la recuperación y re-inserción del individuo: su recuperación física y la emocional. Existe evidencia de una tendencia en los profesionales de la salud a enfocarse primordialmente en los aspectos técnicos que conllevan una amputación, sin considerar el deterioro emocional de quien la sufre. Adicionalmente, los familiares del paciente tienden a silenciar sus sentimientos al respecto, empeorando la situación (Marín Padilla, 2007).

⁵ Recuperado de www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas/

⁶ Análisis de la atención a las personas con discapacidad a través de los programas y servicios de accesibilidad y recreación, para grupos de atención prioritaria en la Provincia de Cotopaxi en el año 2012, Mónica Acurio, 2013.
Recuperado de: http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/8020/1/Acurio_Recalde_Monica_Anabelly.pdf

⁷ http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/05/causas_discapacidad_conadis.pdf

Pero los factores emocionales asociados a pérdidas de miembros repercuten directa y decisivamente en el estado anímico de quienes las han padecido, dando como resultado en la generalidad de los casos, un severo deterioro de la calidad de vida del paciente, y lo que es más grave aún, de su entorno familiar y social cercano. De acuerdo con Affleck, Tennen y Rowe, (1990, citados por Martín y Pérez, 2007), “esta situación estresante en la que se halla inmersa la familia y que se produce cuando uno de sus miembros ingresa en una Unidad de Cuidados Intensivos, no finaliza tras el alta hospitalaria, debido a que con frecuencia se produce una serie de dificultades que han de asumir los miembros familiares; por ejemplo, algunos pacientes sufren amputaciones traumáticas o presentan amnesia” (p. 73).

Al igual que la pérdida de un ser querido, la de un miembro del cuerpo produce un dolor psíquico que desencadena un proceso de duelo que debe ser vivenciado y asimilado en su totalidad por el individuo para lograr su restablecimiento emocional.

En forma intrínseca, todos tenemos una concepción afectiva de nuestro cuerpo, que en definitiva nos proporciona identidad a través de las sensaciones que de él se originan (Lillo Espinosa, 2000). Por eso, al perder una parte de él, las primeras reacciones que se producen, que se conocen como el “miembro fantasma”, son de dolor, comezón o cosquilleo en la zona donde estaba el miembro original y se producen por señales que sigue enviando el cerebro a dicha zona en razón de no haberse producido aún una reconstrucción a nivel psíquico de las funciones que desempeñaba la parte perdida (Vásquez, 2013).

Posteriormente, según Freud (1917), generalmente se produce una serie de acontecimientos de orden psíquico, que caracterizan a toda labor de duelo (Lillo Espinosa, 2000): un intenso sentimiento de dolor psíquico; una pérdida de interés por el mundo exterior que rodea al individuo afectado por la pérdida; una pérdida de la capacidad de interrelación y una inhibición de toda productividad que no tenga que ver o que gire alrededor de la memoria de lo perdido.

Como consecuencia de este proceso de duelo, se producen secuelas emocionales en individuos principalmente adolescentes y jóvenes, en especial ansiedad, depresión, recurrencia en el uso de psicofármacos y otros trastornos postraumáticos. También se presenta el problema del rechazo a las prótesis implantadas, que puede llegar a ser

muy difícil de superar. Todo este proceso da como resultado una gran dificultad para readaptarse a la sociedad, con la consecuente disminución de la calidad de vida de la víctima y su entorno (García, León, Abreu, Peralta, Pérez: 2007).

El escenario de vida que se presenta a la persona amputada es sumamente complicado, pudiendo abrirse varios frentes de acción que deben ser conjuntamente trabajados para lograr su re inserción en la sociedad. Desde el tema de apariencia física que afecta directamente a la autoestima, hasta el dolor psíquico producto de la pérdida en sí, son elementos que deben ser tratados y superados de manera efectiva.

Dado que todo el problema emocional y físico gira en torno a la pérdida de un miembro y la imposibilidad de su recuperación, muchas veces agravado por el factor sorpresa presente en los accidentes, probablemente sea deseable poder recuperar el status anterior de que gozaba el individuo mediante la implantación de un nuevo miembro que pueda suplir el funcionamiento del perdido, y que le proporcione la misma capacidad sensorial, laboral, táctil, etc. que ha perdido, todo lo cual podría hacerse con la asistencia inicial de la ciencia robótica, abriéndose a su vez nuevos campos de investigación que lleven a la concreción de la fabricación de un nuevo miembro con las mismas capacidades y características del perdido y a un costo asequible.

Por supuesto que el alcanzar tal objetivo conlleva la realización de varias etapas, cada una de ellas con pasos subsecuentes, constituyéndose el presente trabajo en un primer pilar en el desarrollo de esta tecnología nacional.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar y simular por computador la cinemática directa de una mano robótica de cinco dedos.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Realizar el diseño geométrico de una mano robótica de características humanoides.
- b. Simular en MATLAB la cinemática directa del dispositivo.
- c. Validar el proceso de simulación de la cinemática directa del dispositivo.

1.3. ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto se ha concebido como el paso inicial en el desarrollo de una tecnología local para la construcción de prótesis biónicas de partes humanas. En base a este trabajo, en un futuro cercano se podrá realizar investigaciones que permitan completar las mismas. Para llevar a buen término el presente análisis, el mismo se supeditarán a las siguientes fases:

- Diseño geométrico del dispositivo robótico con la mano de cinco dedos: Este diseño se basará en consideraciones anatómicas que permitan determinar con aceptable exactitud los grados de libertad de cada dedo y de la mano completa.
- Análisis y simulación de la cinemática directa del dispositivo: A partir del conocimiento de la geometría del dispositivo y de sus grados de libertad, se procederá a hacer un análisis de la cinemática directa del mismo, lo que es un paso previo a lo cinemática inversa y a la cinética que debe observar el dispositivo. Para el análisis y simulación se utilizará el software “Matlab”, y la base teórica del método Denavit-Hartenberg modificado.
- Validación del dispositivo: Una vez ingresadas en el software las variables necesarias, se hará la validación mediante el ingreso de valores específicos de las variables intervinientes, a fin de determinar los resultados de movilidad del dispositivo.

1.4. PLANTEAMIENTO TEÓRICO

A continuación se realiza una breve exposición de la fundamentación teórica necesaria para la concreción del presente trabajo: en primer lugar se exponen ciertas ideas preliminares e históricas en torno a la robótica, para continuar en seguida con una descripción de los conceptos básicos necesarios, luego de lo cual se expone sobre transformación de coordenadas mediante matrices de rotación y traslación, para concluir con la parametrización Denavit-Hartenberg y su aplicación al presente trabajo.

1.4.1. IDEAS PRELIMINARES EN TORNO A LA ROBÓTICA⁸

Una vaga idea inicial del término “robótica”, la puede proporcionar cualquier película de ciencia ficción, en la cual se observe a seres metálicos con características humanoides interactuando con seres humanos, y bajo su mando y vigilancia. Ese fue una especie de ideal al que apuntaron los primeros intentos en este campo. Actualmente sin embargo, pocos son los robots que existen con aquellas características humanoides, pese a lo cual el desarrollo de la robótica ha sido vertiginoso, pero enfocado a otros campos de utilidad para la humanidad. Es así que en los tiempos actuales, el mundo está poblado por todo tipo de robots encargados de labores que le costarían bastante trabajo a un ser humano, ahorrándole así esfuerzos ingentes en la llevada a cabo de varios tipos de tareas. Tal es el caso del campo industrial, en el que se encuentra un sin número de máquinas autómatas, capaces de tomar decisiones, que llevan a cabo incesantes faenas de trabajo, con altísimos índices de exactitud y volúmenes de actividad sobresalientes, lo cual desde el punto de vista económico constituye, si, un verdadero pináculo de los conceptos de eficiencia financiera y ahorro. Pero no sólo ése es el campo de acción de los robots actuales. También son utilizados para tareas peligrosas, como por ejemplo asuntos policiales, desactivación de bombas, investigación en lugares inaccesibles, etc. o para trabajos de limpieza que para un ser humano resultan harto desagradables, e incluso a

⁸ KUMAR SAHA, SUBIR; Introducción a la robótica; McGraw-Hill; México, 2010

nivel doméstico, se encuentran robots encargados del aseo, la cocina, etc. En conjunto, se puede observar en la actualidad que los robots proporcionan una contribución decisiva en cuanto a la calidad de vida de la población.

1.4.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS⁹

El término ROBOT fue utilizado por primera vez en 1921, por el dramaturgo checo Karel Capek, que la utilizó en su obra R.U.R. (Rossum's Universal Robots) y que proviene del vocablo "robota" que en algunas lenguas eslavas significa "trabajo" o figuradamente, "trabajo duro". En dicha novela, un fabricante de criaturas mecánicas se especializó en construir autómatas para reemplazar a los trabajadores humanos, que presentaban la ventaja de no preguntar nada sino únicamente obedecer y hacer su trabajo. Con el paso del tiempo estas máquinas desarrollaron su inteligencia propia y empezaron a destruir a todos los humanos, menos a uno al que necesitaban para que siga construyendo robots. El contenido grotesco de la trama de esta novela generó una especie de odio hacia este tipo de máquinas, puesto que se llegó a pensar que en el horizonte de que esta posibilidad se hiciera realidad, la civilización como la conocemos desaparecería rápidamente. Este temor morboso, reforzado incluso por la producción de filmes de ficción / horror que reseñan el tema de una manera trágica, ha dado como resultado un retraso en el desarrollo de la ciencia robótica, al estar intrínsecamente presente el temor a que la humanidad caiga en manos de una civilización de máquinas.

Sin embargo, para tranquilidad de todos, en los actuales momentos la inteligencia de un robot no es ni remotamente cercana a la de un humano, por lo que la materialización de semejante despropósito es materialmente imposible.

Como un primer intento de creación de robots útiles y prácticos, en 1958 se creó la empresa UNIMATION Robotics Company, que fue la primera en construir un robot industrial que fue instalado en 1961 en la General Motors.

⁹KUMAR SAHA, SUBIR; Introducción a la robótica; McGraw-Hill; México, 2010

1.4.3. DEFINICIONES BÁSICAS

La ISO define al robot como “un manipulador multifuncional reprogramable”, capaz de desempeñar tareas de diverso grado de complejidad. Este concepto lleva asociado por sí mismo el control computacional de sus movimientos y acciones. Los robots, en general se clasifican en industriales, no industriales y de usos especiales.

La decisión sobre el uso de robots en determinada actividad, se rige por 4 reglas generales:

1. La selección de un robot para una actividad debe ceñirse a “las 4 D de la robótica”: que sea una actividad sucia (Dull), aburrida (Dirty), peligrosa (Dangerous) y/o difícil (Difficult).
2. El robot no debe sustituir el trabajo de una persona, sino hacerlo más fácil o placentero.
3. El robot debe usarse cuando no se prevé encontrar personas dispuestas a hacer un trabajo.
4. El uso del robot debe producir beneficios económicos.

Estas reglas, como puede verse, se refieren a sistemas robóticos completos con autonomía de movimiento total. Los subsistemas que lo conforman, como es el caso del presente trabajo, no necesariamente se guiarán por las reglas establecidas hasta aquí.

1.4.4. LOS SUBSISTEMAS DE UN ROBOT

Generalmente se acepta que un sistema robótico está conformado por tres subsistemas: el de movimiento, el de reconocimiento y el de control. El presente trabajo se ciñe únicamente al subsistema de movimiento, puesto que se estima que el reconocimiento y el control se ejercerán por medio de la voluntad del usuario de la

prótesis robótica y a nivel de señales biológicas enviadas y recibidas por el cerebro. Los elementos del subsistema de movimiento son:

1. Manipulador: Es la estructura física que se mueve, es decir el bastidor del robot. En el presente caso, el mismo es el antebrazo del usuario, puesto que la mano robótica iría montada en él, mas no a nivel de la parte superior.
2. Efector final: Es la parte que se instala al final del manipulador. En el caso presente, la mano completa es el efector final, y está compuesta por cada uno de los dedos, con su movilidad propia y tomando en cuenta que el pulgar tiene una orientación inicial contraria al resto de dedos.
3. Actuadores: Son los elementos que proporcionan el movimiento al manipulador y al efector final. En el caso de un miembro humano, éstos son proporcionados por los músculos, pero para un elemento del tipo descrito en este trabajo, los mismos que, en razón de las limitaciones de espacio, no podrían ser ni neumáticos ni hidráulicos, sino que tendrían que ser realizados por servomotores que muevan los eslabones de cada mecanismo (dedos), lo cual implica una diferencia sustancial con respecto al miembro humano.
4. Transmisión: Es el conjunto de partes que posibilitan la acción de comunicar el movimiento de una a otra. Mecánicamente, se puede hablar de varios tipos de transmisión, pero en el caso presente, la misma únicamente se podrá realizar por mecanismos de eslabones, en los que los servomotores deben ubicarse en los lugares donde existan pares cinemáticos rotatorios.

1.4.5. CONSIDERACIONES ESENCIALES DEL MOVIMIENTO

El primer objetivo de una prótesis de mano robótica es alcanzar una posición determinada con todos los dedos o varios de ellos, a fin de que el miembro en sí mismo pueda reemplazar al miembro amputado de forma útil y práctica, para lo cual sus dedos deben moverse y también ejercer fuerzas sobre los objetos que van a ser sostenidos y/o movidos, siendo éste el segundo objetivo de la prótesis. Esto requiere tratar varios temas relativos al movimiento.

De acuerdo con la mecánica Newtoniana, a efectos de realizar un estudio ordenado del tema del movimiento, se suele dividir a la ciencia mecánica en Cinemática y Cinética, esta última también llamada Dinámica.

La Cinemática únicamente describe la configuración geométrica del movimiento, es decir, la forma que toma el movimiento de un cuerpo, sin prestar atención a las causas que lo producen. La Cinética o Dinámica en cambio, se encarga de estudiar las fuerzas que generan tales movimientos sobre las partículas, a fin de conocer en definitiva la cantidad de energía que se debe proveer a un sistema para que éste adquiera un movimiento determinado. Este tema, la cinética, debe ser tratado y estudiado detenidamente y no forma parte de este trabajo, que como se ha dicho, se ciñe únicamente al análisis cinemático, del que parte el posterior análisis dinámico.

En cuanto a la cinemática, tres variables son las que definen el estado de un cuerpo o partícula en cualquier instante: la posición, la velocidad y la aceleración. La interacción de éstas definirá la trayectoria que sigue una partícula en cierto intervalo de tiempo. En consecuencia, el punto de partida para el diseño de una prótesis robótica completa es el análisis cinemático, ya que definirá por sí solo el estado de movimiento de los dedos y por extensión proporcionará las aceleraciones que deben sufrir los mismos para, con ellas, poder determinar las fuerzas y torques que deberán a su vez ser proporcionados por los servomotores que accionarán la prótesis. La ciencia robótica a su vez, otorga dos enfoques diferentes al análisis cinemático: el directo y el inverso.

Por cinemática directa se entiende a la determinación de la posición que adquiere una partícula, que en este caso podría ser el efector final o cada uno de los eslabones de la cadena cinemática que forma el robot, cuando a las diferentes articulaciones se les proporciona un valor determinado de giro o desplazamiento lineal.

La cinemática inversa en cambio, determina los diferentes valores de desplazamiento angular y/o lineal que debe darse a cada articulación para alcanzar una posición determinada. Como puede preverse, la cinemática directa precede a la inversa, pero es ésta última la que tiene utilidad práctica en robótica. A partir de la determinación de la cinemática directa y posteriormente de la inversa, se podrá calcular todo lo relativo al aspecto dinámico del dispositivo.

Respecto a la configuración física del manipulador, es necesario hacer referencia a varios tópicos relativos a la Teoría de Mecanismos:

Un mecanismo es un conjunto de eslabones unidos mediante juntas denominadas “pares cinemáticos”. Los eslabones se consideran como sólidos rígidos. Los pares cinemáticos son las uniones producidas entre dos eslabones. Para efectos de su estudio se los clasifican en pares cinemáticos inferiores y superiores. Los inferiores son juntas simples en las que se estima que el contacto se produce a lo largo de una línea entre los dos sólidos. En los superiores, el contacto se produce en una superficie. Convencionalmente se establecen 6 pares cinemáticos inferiores, de los que el más útil y aplicado es el de revoluta o rotatorio, que es el indicado en la figura 1.1 y que por su configuración geométrica ofrece un grado de libertad, que es una rotación alrededor de un eje normal al plano de rotación

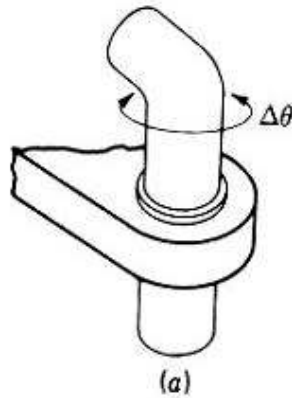


Fig. 1.1: Esquema de una junta revoluta¹⁰

Existen otros pares cinemáticos inferiores, pero no se tratarán en este trabajo en virtud de ser la revoluta el único par que intervendrá en los mecanismos propuestos para la mano robótica.

Para que un conjunto de eslabones sea considerado mecanismo, deben cumplirse varias condiciones: en primer lugar, el mecanismo no puede tener menos de cuatro

¹⁰ Recuperado de http://www.mecapedia.uji.es/par_cinematico.htm

eslabones. En segundo término, debe siempre existir un eslabón fijo, que se denomina bastidor. Cumplidas estas dos reglas, lo siguiente es determinar el grado de movilidad del mecanismo, el cual se expresa a través de los grados de libertad (Degrees of Freedom, DOF). El DOF total de un mecanismo viene determinado por el DOF de cada una de sus partes mediante el criterio de Kutzbach¹¹:

Para mecanismos planos:

$$m = 3(n - 1) - 2\gamma^1 - \gamma^2 \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Para mecanismos espaciales:

$$m = 6(n - 1) - 5\gamma^1 - 4\gamma^2 - 3\gamma^3 - 2\gamma^4 - \gamma^5 \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde:

- m es el número de grados de libertad totales del mecanismo. En el caso de mecanismos robóticos, este valor también proporciona el número de servomotores que serán necesarios.
- n es el número de eslabones (sólidos rígidos) del mecanismo.
- γ^i es el número de restricciones impuestas por pares cinemáticos de movilidad “ i ”.

Para un mecanismo robótico se considera que el efector final se encuentra libre de eslabonamientos con otras partes del robot, o sea que el mecanismo es una cadena cinemática abierta.

1.4.6. TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS

La determinación de la posición de un punto mediante un vector es esencial para la formulación de la cinemática directa, puesto que a partir de ella se podrá determinar la velocidad y aceleración de ese punto mediante sendas derivadas respecto al tiempo. Sin embargo, para estos cálculos, es conveniente que los ejes de coordenadas

¹¹ SHIGLEY J.E., UICKER J. J.; Teoría de máquinas y mecanismos; McGraw-Hill, México, 1983

se planteen en relación a direcciones preferenciales de los eslabones. Esto trae como consecuencia, la necesidad de establecer sistemas de transformación de coordenadas, procedimiento que se explica a continuación.

Considérese la figura 1.2. El punto indicado \mathbf{P} , cuya posición en el sistema de coordenadas planas x - y está determinada por el vector \vec{r} :

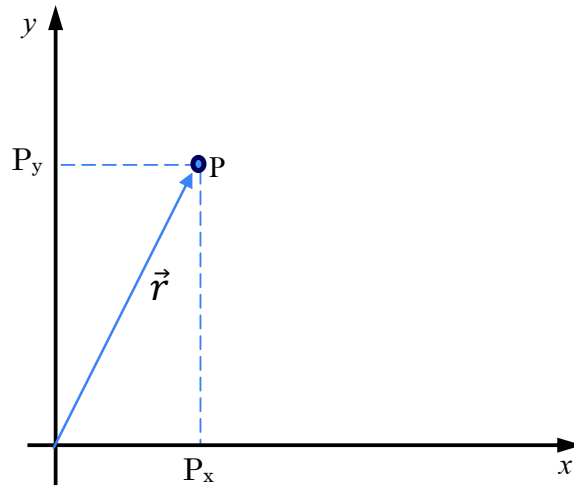


Fig. 1.2: Localización de un punto en el plano x - y
Fuente: Propia

De tal forma que:

$$\vec{r} = P_x \vec{i} + P_y \vec{j} + 0 \vec{k} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

En tal sistema plano, se entiende que el eje “ z ” es ortogonal a “ x ” y “ y ”. Los vectores $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ son los unitarios en las direcciones x, y, z respectivamente, de manera que el vector \vec{r} puede expresarse también como:

$$\vec{r} = r \vec{u}_r \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Supóngase ahora que el sistema x - y rota un ángulo “ α ” alrededor del eje “ z ”, como lo indica la figura 1.2. Los vectores unitarios \vec{u}, \vec{v} de este sistema rotado u - v en términos de los unitarios de x - y serán entonces:

$$\vec{u} = \vec{i} \cos \alpha + \vec{j} \sin \alpha \quad (\text{Ec. 1.5})$$

$$\vec{v} = -\vec{i} \sin \alpha + \vec{j} \cos \alpha \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Que, matricialmente, puede escribirse:

$$\begin{bmatrix} \vec{u} \\ \vec{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

La figura 1.3 representa la rotación de los ejes “x” y “y” alrededor de un eje ortogonal a ambos, generando los ejes rotados “u”, “v”.

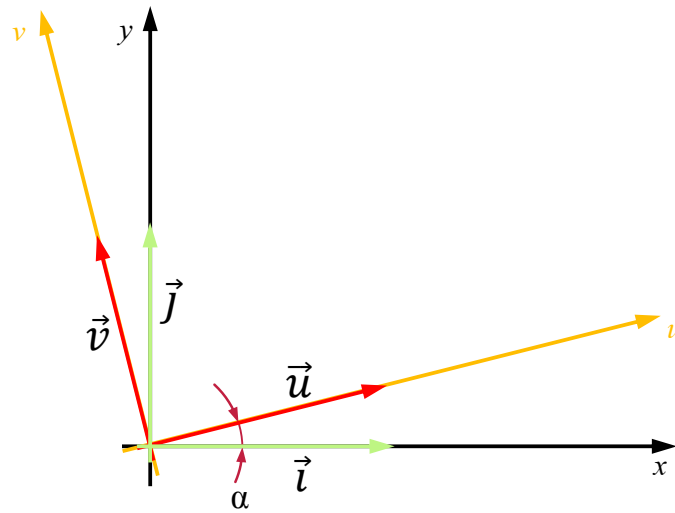


Fig. 1.3: Rotación de un sistema de ejes coordenados
Fuente: Propia

De tal manera que las coordenadas del punto P en el sistema rotado y en notación matricial se determinan mediante la ecuación 1.8 y se esquematizan en la figura 1.4.

$$\begin{bmatrix} P_u \\ P_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

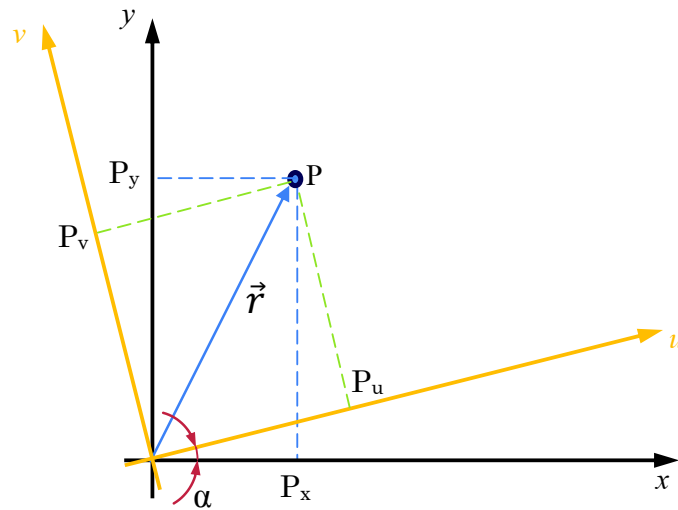


Fig. 1.4: Coordenadas de “P” en el sistema “u”, “v”
Fuente: Propia

La matriz:

$$Q_z = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Se denomina “*Matriz de Rotación Elemental*”¹² y permitirá pasar de un sistema de coordenadas plano a otro rotado alrededor del eje z , con el mismo origen. En adelante, se utilizarán los símbolos C para denotar la función *coseno* y S para la función *seno*. Si se toma en cuenta la tercera coordenada, que en el sistema plano no ha sufrido ninguna alteración, la matriz de rotación en tres dimensiones para el caso explicado es:

$$Q_z = \begin{bmatrix} C\alpha & S\alpha & 0 \\ -S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

El subíndice z indica que la rotación del sistema de coordenadas se ha producido alrededor del eje z . Haciendo análisis similares para la rotación alrededor de los otros ejes de, por ejemplo un ángulo β alrededor del eje y y un ángulo γ alrededor del eje x , las matrices de rotación obtenidas son:

¹² CRAIG J.; Robótica, Pearson Educación, México, 2006

$$\mathbf{Q}_y = \begin{bmatrix} C\beta & 0 & S\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\beta & 0 & C\beta \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad \mathbf{Q}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\gamma & -S\gamma \\ 0 & S\gamma & C\gamma \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (\text{Ec. 1.11})$$

Estos arreglos matriciales describen la rotación individual alrededor de cada uno de los tres ejes coordenados que definen el espacio de trabajo de un robot. La descripción de la rotación alrededor de los tres ejes en forma combinada viene determinada por el producto de estas matrices \mathbf{Q}_T ¹³:

$$\mathbf{Q}_T = \mathbf{Q}_z \mathbf{Q}_y \mathbf{Q}_x = \begin{bmatrix} C\alpha & S\alpha & 0 \\ -S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\beta & 0 & S\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\beta & 0 & C\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\gamma & -S\gamma \\ 0 & S\gamma & C\gamma \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.12})$$

$$\rightarrow \mathbf{Q}_T = \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & -S\alpha C\gamma + C\alpha S\beta S\gamma & S\alpha S\gamma + C\alpha S\beta C\gamma \\ S\alpha C\beta & C\alpha C\gamma + S\alpha S\beta S\gamma & -C\alpha S\gamma + S\alpha S\beta C\gamma \\ -S\beta & C\beta S\gamma & C\beta C\gamma \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

Que se denomina “*Matriz de Rotación 3D*”¹⁴. A este arreglo se puede incrementar una coordenada adicional que describa el efecto de la traslación, en la dirección de cada uno de los ejes coordenados. Para que dicha matriz sea homogénea, debe ser cuadrada. Esto se logra con cierto artificio matemático que se explicará a continuación:

A la matriz de rotación total se le añade una columna al final, formada por un vector de traslación en tres direcciones, una fila al final, formada por tres ceros (perspectiva) y un factor de escala de valor 1 en la última posición, obteniéndose la siguiente “*Matriz de Transformación Homogénea*”¹⁵:

¹³ CRAIG J.; Robótica, Pearson Educación, México, 2006

¹⁴ CRAIG J.; Robótica, Pearson Educación, México, 2006

¹⁵ CRAIG J.; Robótica, Pearson Educación, México, 2006

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & -S\alpha C\gamma + C\alpha S\beta S\gamma & S\alpha S\gamma + C\alpha S\beta C\gamma & P_x \\ S\alpha C\beta & C\alpha C\gamma + S\alpha S\beta S\gamma & -C\alpha S\gamma + S\alpha S\beta C\gamma & P_y \\ -S\beta & C\beta S\gamma & C\beta C\gamma & P_z \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.14})$$

Que, resumidamente, puede expresarse así:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matriz de Rotación} & \text{Vector de Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.14})$$

La matriz básica de traslación es, por lo tanto:

$$\mathbf{T}(\mathbf{P}) = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & P_x \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & P_y \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & P_z \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

De esta manera es posible combinar rotaciones y traslaciones sucesivas para obtener posiciones finales del manipulador, lo que se logra mediante multiplicación de las matrices correspondientes. Pero, como el producto entre matrices no es conmutativo, el orden en que se hacen los movimientos tiene incidencia directa en el resultado final. Es decir, no es lo mismo primero trasladar y luego rotar que primero rotar y luego trasladar. Por ejemplo, si se realiza una rotación alrededor del eje “x” y luego una traslación, y efectuando los productos matriciales correspondientes se obtiene:

$$T((x, \alpha), P) = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & P_x \\ \mathbf{0} & C\alpha & -S\alpha & P_y \\ \mathbf{0} & S\alpha & C\alpha & P_z \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.16})$$

Ahora, si se realiza primero una traslación y luego una rotación alrededor del eje “x”, se obtiene:

$$T(P, (x, \alpha)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & C \alpha & -S \alpha & P_y C \alpha - P_z S \alpha \\ 0 & S \alpha & C \alpha & P_y S \alpha + P_z C \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.17})$$

1.4.7. PARAMETRIZACIÓN DENAVIT-HARTENBERG¹⁶

El método de Denavit-Hartenberg es una herramienta de cálculo sencilla desarrollada alrededor de 1955 por Jaques Denavit y Richard Hartenberg. Mediante una parametrización adecuada, se obtiene un modelo cinemático del mecanismo robótico que a su vez, en función de dichos parámetros, permite conocer la posición final del efector. Si se da avances puntuales a cada articulación también es posible determinar la trayectoria de cada eslabón del mecanismo robótico. El método toma en cuenta la configuración geométrica del mecanismo y acepta en general, dos tipos de articulaciones o pares cinemáticos inferiores: revoluta y prismática.

El método se basa en una cadena cinemática abierta, de la cual se toma cada uno de los eslabones como base para el análisis del siguiente eslabón. En las articulaciones en las que se une cada eslabón con el siguiente se produce una transformación de coordenadas, de forma que la interacción de todas ellas permite conocer, al final, la posición del extremo del último eslabón, en función de los parámetros establecidos en el método. Estos parámetros se denominan “*Parámetros Denavit-Hartenberg*” o simplemente “*Parámetros DH*”. En la figura 1.5 se observan los ejes “z” de cada articulación de un mecanismo, los que servirán de base para la determinación de los parámetros DH.

¹⁶ CRAIG J.; Robótica, Pearson Educación, México, 2006

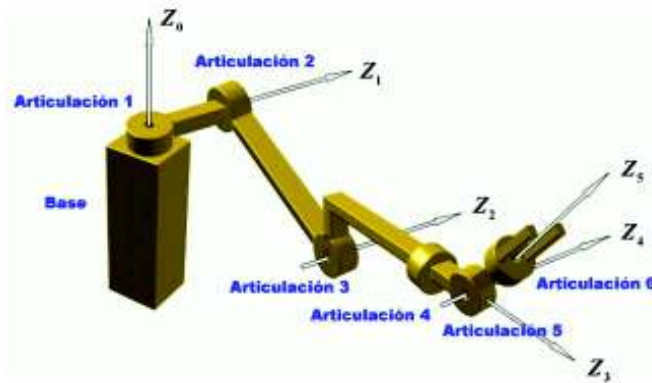


Fig. 1.5: Ejes “z” de cada articulación de un mecanismo¹⁷

Cada articulación lleva asociado un sistema de referencia local, que queda definido por los parámetros DH de la articulación anterior. Por lo tanto, los parámetros DH únicamente dependen de las características geométricas de cada eslabón y son independientes de la posición del robot. Por medio de esta parametrización es posible definir las matrices A_i que posibilitan el paso de un sistema de referencia de una articulación al de la siguiente, definiendo de esta manera las matrices de transformación “T”. Los parámetros DH necesarios para cada articulación son:

- θ_i : Es el ángulo medido en sentido dextrógiro, formado por los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} . Para articulaciones rotatorias es un valor variable.
- d_i : Es la distancia medida a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas $i-1$ hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i . Para articulaciones prismáticas, es un valor variable.
- a_i : Es la distancia medida a lo largo del eje x_i desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i . Es decir, es la longitud del eslabón. Para articulaciones rotatorias.
- α_i : Es el ángulo medido en sentido dextrógiro desde el eje z_{i-1} hasta el eje z_i , en un plano perpendicular al eje x_i .

¹⁷ Recuperado de http://personal.us.es/jcortes/Material/Material_archivos/Articulos%20PDF/RepresentDH.pdf

Bajo esta parametrización se puede determinar, para la articulación “ i ”, una matriz local A_i de transformación de coordenadas definida por:

$$A_i = T(z, \theta_i)T(0, 0, d_i)T(a_i, 0, 0)T(x, \alpha_i)$$

$$= \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Aplicando la definición de producto matricial para las matrices de transformación que establece que:

$$\text{Si } A = (a_{ij})_{m \times n} \text{ y } B = (b_{ij})_{n \times p}$$

$$\rightarrow C = A \times B = (c_{ij})_{m \times p}$$

$$\text{Donde: } c_{ij} = \sum_{r=1}^n a_{ir} b_{rj}$$

Obteniéndose en consecuencia la matriz A_i :

$$A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.18})$$

1.4.8. ALGORITMO DH PARA LA CINEMÁTICA DIRECTA DE UN ROBOT¹⁸

El planteamiento matemático descrito soluciona la cinemática directa del robot, que se define como la determinación de la posición de un efector final al proporcionar movimientos definidos a cada articulación. Esto se logra estableciendo para cada articulación “ $i+1$ ” un sistema de coordenadas rectangulares ortogonales fijo al elemento “ i ”. Este proceso se sigue para cada articulación, calculando la matriz A_i correspondiente y obteniendo al final la matriz T_n que es el producto de todas las matrices A_i y corresponde a la transformación de coordenadas global que permiten

¹⁸ CRAIG J.; Robótica, Pearson Educación, México, 2006

determinar la última posición del efector final. Este proceso se facilita y sistematiza siguiendo los pasos del algoritmo denominado de Denavit-Hartenberg que se explican a continuación:

1. Numerar los eslabones móviles del mecanismo robótico desde 1 hasta “n”. Asignar al bastidor el número 0.
2. Numerar cada articulación desde 1 hasta “n”
3. Situar el eje z_i para cada articulación $i+1$, para i desde 0 hasta $n-1$. Los ejes z_i para articulaciones rotatorias son el eje de giro. Para articulaciones prismáticas es el eje de movimiento.
4. Ubicar el origen del bastidor (O) en algún punto conveniente del eje z_0 . Los ejes x_0 y y_0 deben ser dextrógiros.
5. Ubicar los sistemas de coordenadas (O_i) de cada articulación. El origen O_i se localiza en la intersección del eje z_i con la normal común a z_{i-1} y z_i . Si los ejes z_i y z_{i-1} se intersecan, el origen se coloca en la intersección. Si z_i y z_{i-1} son paralelos y la articulación i es rotacional, se coloca el origen en la articulación ($d_i=0$). Si z_i y z_{i-1} son paralelos y la articulación i es prismática se coloca el origen en un punto extremo de la articulación i .
6. Ubicar el eje x_i sobre la normal que une los ejes z_{i-1} y z_i , definiendo el lado positivo del eje desde la articulación $i-1$ hacia la articulación i .
7. Colocar los ejes y_i de manera que todos los sistemas sean dextrógiros.
8. Colocar el sistema O_n en el extremo del último eslabón. El eje z_n debe coincidir con z_{n-1} y el eje x_n debe ser normal a z_{n-1} y z_n
9. Construir la tabla de parámetros DH para cada articulación, para la que:
 - θ_i es el ángulo que se debe rotar alrededor de z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.
 - d_i es la distancia que debería desplazarse O_{i-1} para que x_i y x_{i-1} queden alineados. Esta distancia se mide a lo largo de z_{i-1} .

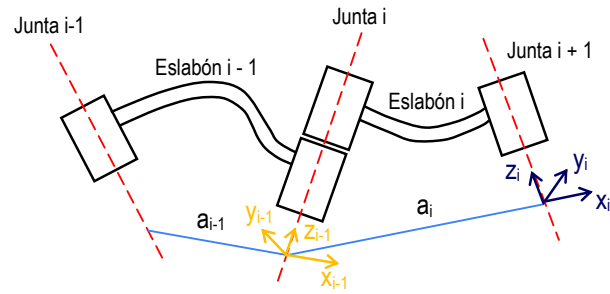
- a_i es la distancia a lo largo de x_i que debería desplazarse O_{i-1} para que coincida con O_i .
- α_i es el ángulo que debería rotarse alrededor de x_i para que O_{i-1} coincida con O_i .

10. Obtener las matrices de transformación A_i .

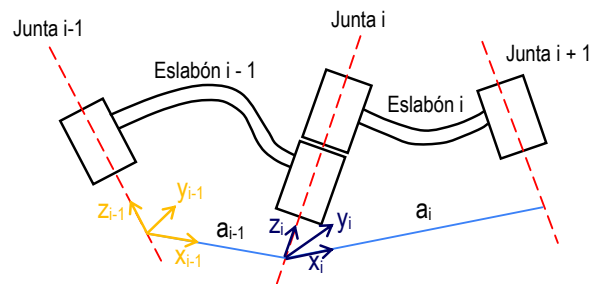
11. Obtener la matriz de transformación entre la base y el extremo del robot $T = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$. La misma define la orientación (matriz de rotación) y posición (matriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las “n” coordenadas articulares

1.4.9. MÉTODOS D-H ESTÁNDAR Y D-H MODIFICADO

Existen varias formas de determinación de las matrices homogéneas que siguen el mismo principio del método Denavit-Hartenberg pero que facilitan su implementación y cálculo, aunque en esencia son el mismo método. El método Denavit-Hartenberg estándar (DHS) asigna el sistema de coordenadas O_i solidario con el eslabón $i+1$. En cambio el método Denavit-Hartenberg Modificado (DHM), por ejemplo, asigna el sistema de coordenadas O_i al eslabón i , lo que deriva en una mayor facilidad en la determinación de las matrices homogéneas. La figura 1.6 ilustra las diferencias entre los dos métodos. Nótese que en esencia son iguales, difiriendo la nomenclatura de cada articulación respecto al siguiente eslabón, lo cual trae como consecuencia una matriz homogénea de transformación diferente en cada caso.



a) Estándar
Eje $z_i \rightarrow$ Junta $i + 1$



b) Modificado

Eje $z_i \rightarrow$ Junta i

Figura 1.6. Método D-H estándar vs modificado

Fuente: Propia

La matriz de transformación de coordenadas en el método estándar se obtiene mediante una secuencia de movimientos de rotación-traslación-traslación-rotación, (RTTR), donde las matrices homogéneas obtenidas al aplicar el algoritmo anterior son las siguientes:

$$R(z, \theta_i) = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Rotación alrededor del eje } z)$$

$$T(0, 0, d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Traslación a lo largo del eje } z)$$

$$T(\mathbf{a}_i, \mathbf{0}, \mathbf{0}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{a}_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ (Traslación a lo largo del eje } x \text{)}$$

$$R(x, \alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ (Rotación alrededor del eje } x \text{)}$$

La matriz de transformación global se define por:

$$A_i = R(z, \theta_i)T(\mathbf{0}, \mathbf{0}, d_i)T(\mathbf{a}_i, \mathbf{0}, \mathbf{0})R(x, \alpha_i)$$

Aplicando la definición de producto matricial, se obtiene la matriz de transformación global bajo el método Denavit-Hartenberg Estándar:

$$A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.19})$$

El mismo procedimiento se sigue en el caso del Método Denavit-Hartenberg modificado. En este nuevo algoritmo se tiene dos variaciones: la primera en lo que concierne a la numeración de eslabones y articulaciones; la segunda respecto al orden de los movimientos de cada articulación. En este caso se tiene la siguiente secuencia: Rotación alrededor del eje x – Traslación a lo largo del eje x – Rotación alrededor del eje z – Traslación a lo largo del eje z (RTRT). Por lo tanto, las matrices de transformación locales son:

$$R(x_{i-1}, \alpha_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_{i-1} & -S\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & S\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ (Rotación alrededor del eje } x \text{)}$$

$$T(\mathbf{a}_{i-1}, \mathbf{0}, \mathbf{0}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \mathbf{a}_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ (Traslación a lo largo del eje } x \text{)}$$

$$R(z, \theta_i) = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Rotación alrededor del eje } z)$$

$$T(0, 0, d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Traslación a lo largo del eje } z)$$

La matriz de transformación global ahora se define por:

$$A_i = R(x_{i-1}, \alpha_{i-1})T(x_{i-1}, \alpha_{i-1})R(z, \theta_i)T(z, d_i)$$

En este caso, la matriz global de transformación que se obtiene para el algoritmo es:

$$A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ S\theta_i C \alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1} C\theta_i & -S\alpha_{i-1} & -d_i S \alpha_{i-1} \\ S\theta_i S \alpha_{i-1} & C\theta_i S \alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1} d_i C \alpha_{i-1} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1.20})$$

El método modificado resulta algo más sencillo para la formulación de las matrices homogéneas de transformación en algunos casos, especialmente cuando existen juntas de traslación. En el presente trabajo se opta por utilizar el método estándar en virtud de sólo encontrarse articulaciones rotatorias.

1.4.10. CONSIDERACIONES ANATÓMICAS DE LA MANO HUMANA¹⁹

La función fundamental de la mano humana se denomina “prensión”, que podría interpretarse como una propiedad de agarre, y por tanto involucra intrínsecamente su movilidad y la fuerza que deben efectuar sus músculos en conjunto.

Como se indica en la figura 1.7, el esqueleto de la mano está formado por un total de 27 huesos, repartidos de la siguiente manera: el carpo, con 8 huesos; el metacarpo

¹⁹ LATARJET M., RUIZ LIARD A.; Anatomía Humana: Ed. Médica Panamericana, 2006

que tiene 5 huesos y los dedos que en su totalidad constan de 14 huesos. El carpo se une directamente con los huesos del brazo formando la articulación conocida como muñeca. A su vez, cada uno de los dedos está formado por falanges: todos los dedos tienen una falange distal, que se encuentra en el extremo libre del dedo. Todos tienen también una falange proximal y, con excepción del pulgar, una falange media.

La movilidad de cada uno de los dedos es independiente, pero está ligada al metacarpo, que también posee algo de movilidad. Una cuestión importante es que el pulgar está orientado en sentido contrario al resto de dedos, lo que proporciona a la mano su propiedad de agarrabilidad. La movilidad de los huesos del metacarpo se ve restringida por los músculos y nervios que lo rodean. Los 4 dedos paralelos tienen una movilidad individual a partir de la primera falange (proximal) que se puede manifestar esencialmente en dos ejes de rotación ortogonales, el primero de los cuales se encuentra en el plano de la palma de la mano y el segundo, por supuesto, es perpendicular a él.

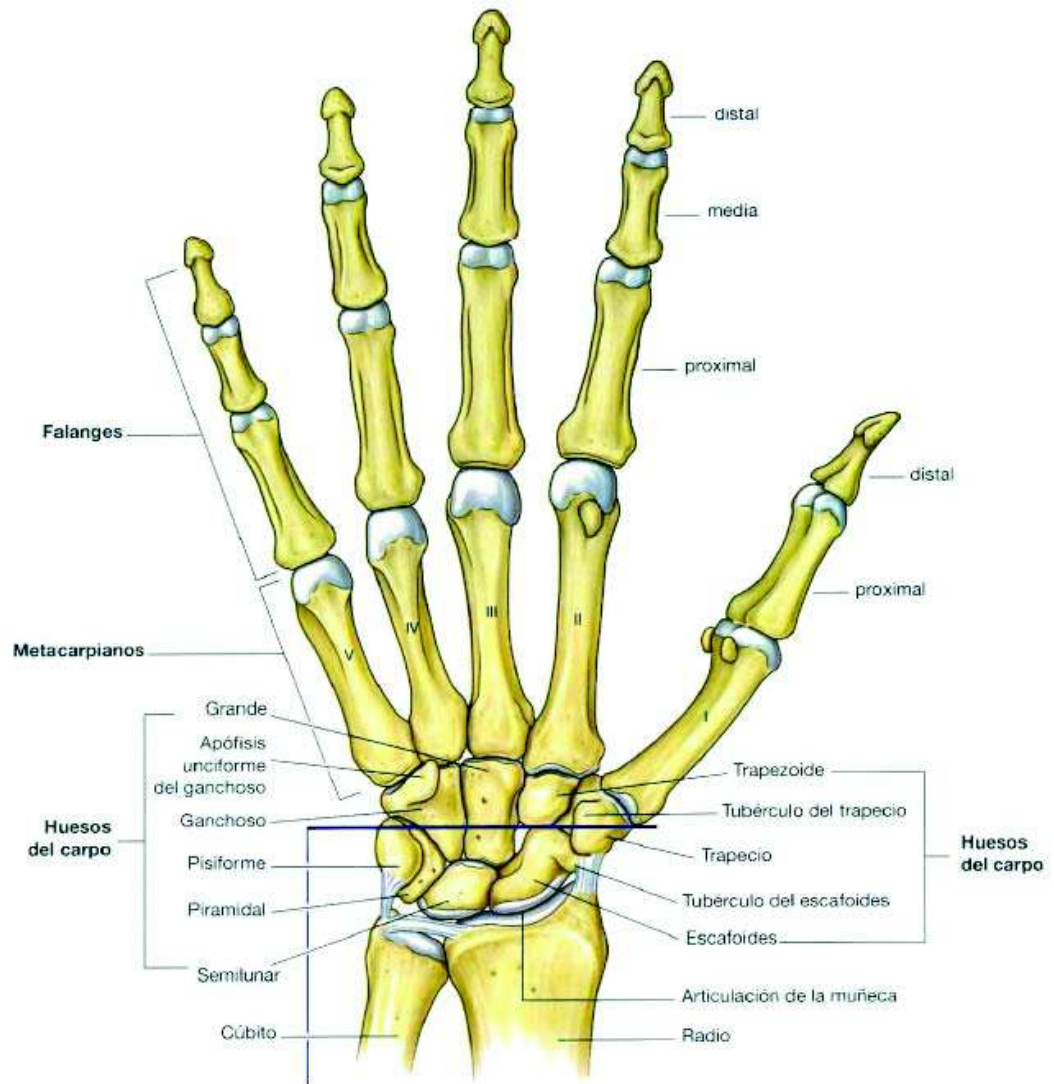


Figura 1.7. Esquema del esqueleto de la mano humana²⁰

El pulgar tiene la particularidad de que su movilidad libre comienza desde el hueso del metacarpo, denominado “*primer metacarpiano*”²¹, cuya orientación es aproximadamente perpendicular al plano de la palma. El capítulo 2 de este trabajo detalla estas consideraciones para el diseño geométrico propuesto de la mano robótica.

²⁰ Recuperado de <http://www.myanatomy.tuars.com/huesos-ms2.html>

²¹ LATARJET M., RUIZ LIARD A.; Anatomía Humana: Ed. Médica Panamericana, 2006

Aunque en la realidad cada articulación de la mano tiene configuración esférica, su movilidad en dos de sus ejes es muy pequeña. Por esta razón es posible realizar una aproximación al respecto asignando a cada articulación de los dedos únicamente un grado de libertad de rotación alrededor de un eje transversal. En todo caso la mano humana no posee ninguna articulación prismática. Las articulaciones que unen las falanges proximales con los huesos individuales del metacarpo son también de tipo esférico, pero en el presente trabajo se restringirá uno de sus grados de libertad, quedando su movilidad únicamente con 2. Los rangos de amplitud de movimiento de cada una de las falanges son independientes de las otras: en primer lugar, se observa que la muñeca posee un rango de amplitud de movimiento de 150° respecto a un eje transversal a ella, como se observa en la figura 1.8.

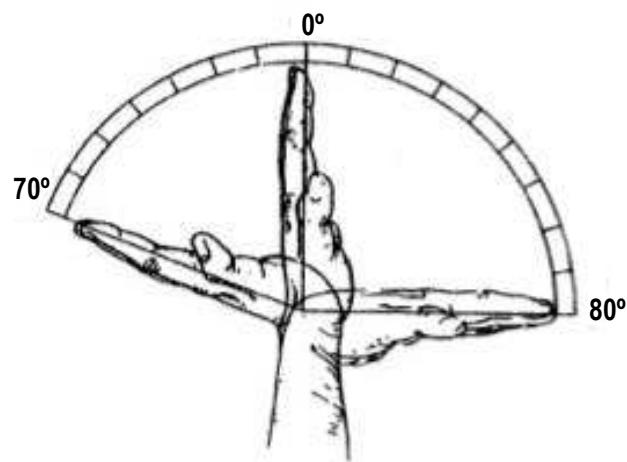


Fig. 1.8: Amplitud del movimiento de la muñeca²²

La articulación metacarpo-falángica, formada por el metacarpo y la falange proximal, presenta una amplitud de rotación de alrededor de 120° , como puede observarse en la figura 1.9.

²² Recuperado de <http://es.slideshare.net/pedroespino106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>

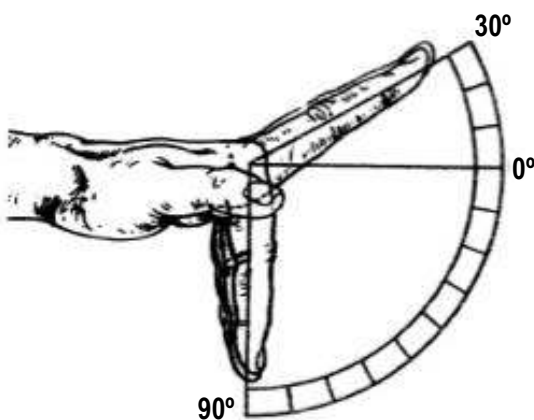


Fig. 1.9: Amplitud de rotación de la articulación metacarpo-falángica²³

A su vez las articulaciones proximal-media y media-distal presentan en promedio, amplitudes rotacionales de 100° y 90° respectivamente, como ilustra la figura 1.10. Por su parte, el movimiento rotativo en el plano palmar entre las articulaciones proximales denominado “abducción”, tiene una amplitud de 40° lo que se observa en la figura 1.11. Por último, la rotación (abducción) del dedo pulgar tiene una amplitud de 70° como se ve en la figura 1.12.

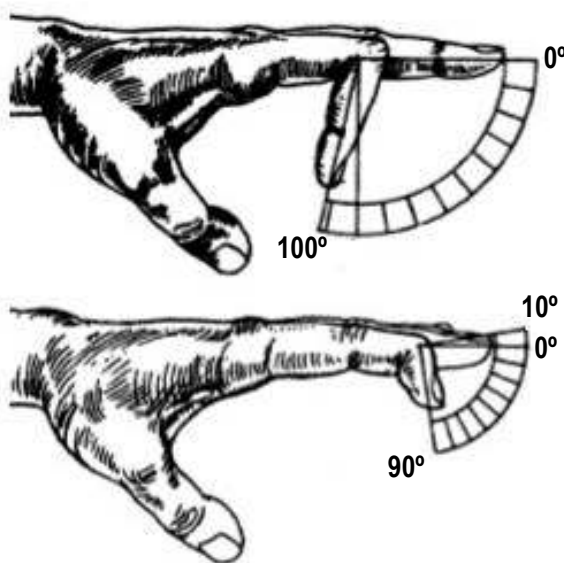


Fig. 1.10: Amplitud de movimiento de las falanges distal y media²⁴

²³ Recuperado de <http://es.slideshare.net/pedroespino106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>

²⁴ Recuperado de <http://es.slideshare.net/pedroespino106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>

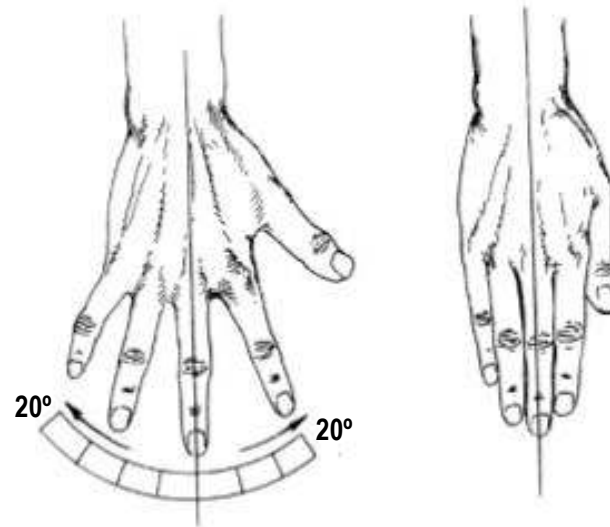


Fig. 1.11: Abducción - aducción de los dedos²⁵

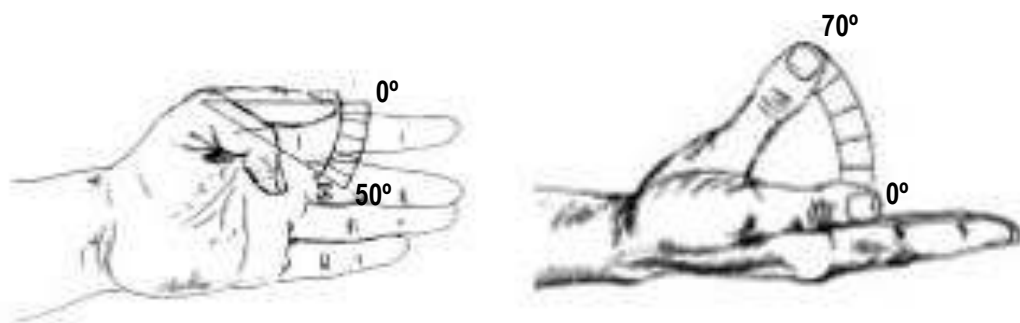


Fig. 1.12: Abducción del dedo pulgar²⁶

En cuanto a la antropometría, según el estudio realizado por J.W. Garrett (Velásquez Sánchez, 2007; citado por Zúñiga, 2013) se puede establecer un rango de dimensiones promedio de cada uno de los huesos de la mano en porcentaje de la longitud total de la mano medida desde su base hasta la punta del dedo medio. Los resultados de tal estudio que son significativos para el presente trabajo se detallan en la tabla 1.1, con referencia a la figura 1.13. La longitud total de la mano se toma desde la base del carpo hasta el extremo del dedo medio.

²⁵ Recuperado de <http://es.slideshare.net/pedroespinosa106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>

²⁶ Recuperado de <http://es.slideshare.net/pedroespinosa106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>

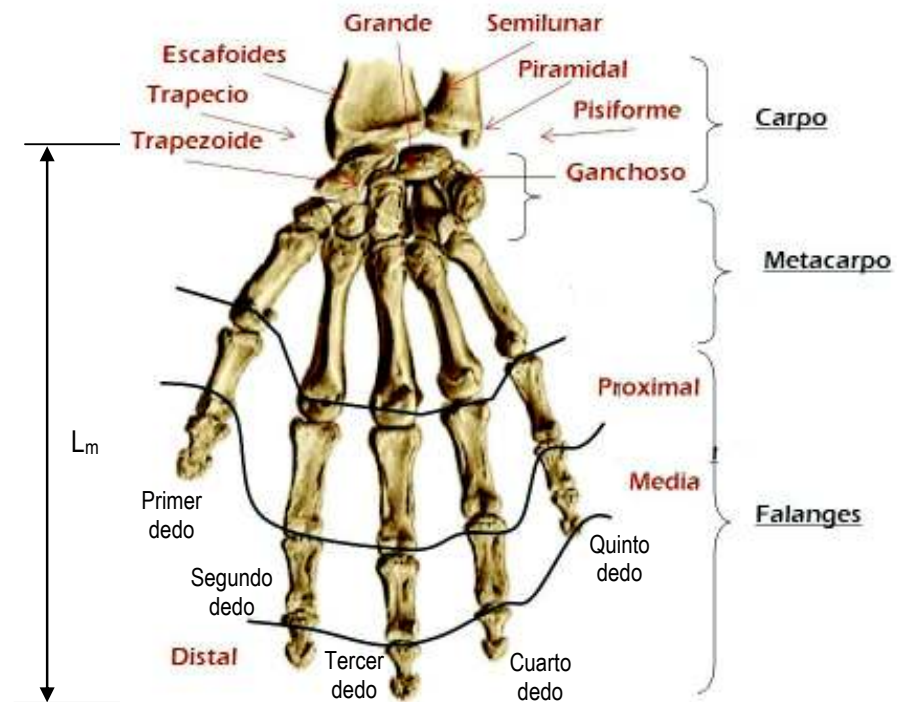


Fig. 1.13: Longitud total de la mano

Tabla 1.1. Longitudes promedio de las falanges de una mano humana de adulto masculino en porcentaje de la longitud total de la mano L_m

| FALANGE | PROXIMAL | MEDIA | DISTAL |
|-----------------------|----------|--------|--------|
| Primer dedo (Pulgar) | 17.1 % | - | 12.1 % |
| Segundo dedo (Índice) | 21.8 % | 14.1 % | 8.6 % |
| Tercer dedo (Medio) | 24.5 % | 15.8 % | 9.8 % |
| Cuarto dedo (Anular) | 22.2 % | 15.3 % | 9.7 % |
| Quinto dedo (Meñique) | 17.2 % | 10.8 % | 8.6 % |

Fuente: Cailliet, 2006; citado por ZÚÑIGA D., ANDRADE D.; Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2013

La fundamentación teórica del comportamiento cinemático y del cálculo de posición de la mano, así como su análisis antropométrico permiten abordar el diseño geométrico y posterior análisis y simulación del dispositivo robótico de prótesis de mano, lo que se verá en los capítulos 2 y 3.

CAPÍTULO 2

DISEÑO GEOMÉTRICO DEL PROTOTIPO

2.1. GENERALIDADES

El esqueleto de la mano humana está formado esencialmente por tres partes: carpo, metacarpo y dedos. El carpo, a su vez, se encuentra constituido por 8 huesos que, gracias a su separación y conexión elástica, proporcionan cierto grado de movilidad a la palma de la mano. Esto se refleja en la exactitud que posee este órgano para ejecutar la gran variedad de movimientos que la caracteriza. El metacarpo, por su parte, está formado por 5 huesos, que en la posición normal de la mano, se separan entre ellos un valor angular que oscila entre 9 y 10 grados. Conectados a él se encuentran los dedos, formados por tres falanges, a excepción del dedo pulgar que solo tiene 2. La movilidad de los huesos del metacarpo es restringida por la presencia de músculos y piel, pudiendo observarse, sin embargo, que los mismos tiene la posibilidad de efectuar pequeños desplazamientos angulares que parecen ser planos. Lo anteriormente descrito le confiere a la mano un grado elevado de complejidad que a su vez proporciona una muy amplia variedad de movimientos con alto nivel de exactitud y consecuentemente un gran número de grados de libertad. Este hecho, de tomarse en cuenta, produciría una compleja red de ecuaciones matriciales y sistemas de éstas cuya resolución implicaría un elevado costo computacional. A efectos de simplificar el tratamiento matemático del modelo, se tratará de restringir la movilidad de cada parte de la mano, simplificando la concepción de cada una de las partes.

En el presente capítulo solo se abordará un diseño geométrico dimensional que permita, de manera simplificada, determinar los parámetros DH para todo el prototipo. En estudios posteriores que involucren ya la construcción de un prototipo, se podrá profundizar en el tema.

En la figura 2.1 se puede apreciar la forma distendida real del esqueleto de la mano derecha, tanto al anverso como al reverso, cuando ésta se encuentra en una posición completamente natural. Se observa que los huesos del carpo, al unirse, proporcionan una base para el resto de la mano. Esto abre la posibilidad de reemplazar todos estos huesos pequeños por uno sólo.



a) Anverso

b) Reverso

Fig. 2.1: Esqueleto de la mano derecha²⁷

En la posición indicada, los dedos se encuentran con un grado de apertura natural. La totalidad del carpo, cuya vista lateral se observa en la figura 2.2, no sobrepasa los 15 cm. Adicionalmente, debe notarse que el pulgar, a diferencia del resto de dedos, tiene un ángulo de anclaje diferente y su hueso metacarpiano correspondiente tiene varios grados de libertad, lo que permite la capacidad de agarre de la mano. Con las consideraciones presentadas hasta el momento, a continuación se procede a realizar el diseño geométrico del dispositivo de mano robótica.

²⁷McMINN R.M.H, HUTCHINGS R.T.; Color Atlas of Human Anatomy: Wolfe Medical Publications, London 1977



Fig. 2.2: Esqueleto de la mano derecha²⁸

2.2. DISEÑO DEL BASTIDOR, CARPO Y METACARPO

A efectos de realizar la simulación computarizada de la mano robótica, es necesario establecer un eslabón que haga las veces de bastidor. En este acápite y en adelante, se entenderá como bastidor al conjunto formado por una única estructura que hace las veces de todos los huesos del carpo, y los 5 huesos metacarpianos.

El eslabón fijo se une directamente al brazo, del cual obtendrá las señales para mover el dispositivo. Con él se ensamblará el carpo mediante una cruceta que definirá los movimientos de rotación (“pitch” y “yaw”) respecto a ejes ortogonales al plano palmar. Este eslabón se observa en la figura 2.3.

²⁸McMINN R.M.H, HUTCHINGS R.T.; Color Atlas of Human Anatomy: Wolfe Medical Publications, London 1977

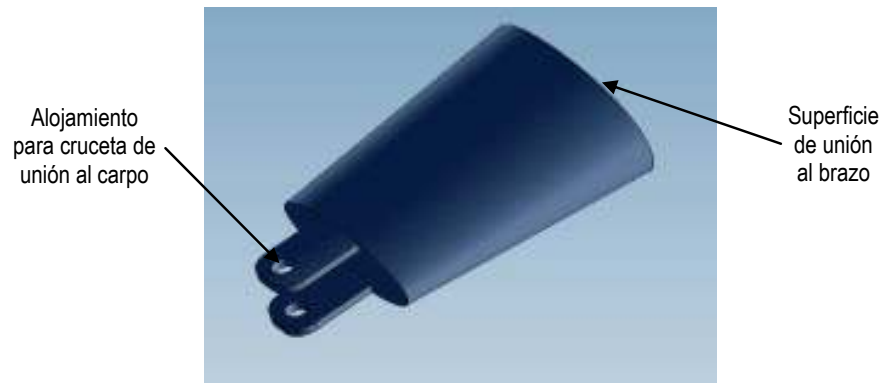


Fig. 2.3: Eslabón fijo
Fuente: Propia

La estructura que reemplaza a los huesos del carpo en la mano real, también tomará el nombre de carpo en este trabajo. El giro alrededor del eje axial indicado en dicha figura es efectuado por el movimiento del antebrazo, por lo que no se considerará el grado de libertad correspondiente a éste. En consecuencia, el carpo tendrá dos grados de libertad con respecto al elemento fijo, asemejándose al movimiento de la muñeca natural. El diseño propuesto para el carpo y su dimensionamiento se indican en la figura 2.4. El dimensionamiento del mismo se ha propuesto en base a las consideraciones antropométricas del estudio de J.W. Garrett.

Utilizando la herramienta informática “SolidWorks”, se puede hacer una simulación “renderizada” de la estructura propuesta, varias de cuyas vistas se indican en la figura 2.5. Este proceso tiene la ventaja de poder realizar dibujos de casi cualquier parte mecánica para luego construir un acoplamiento entre varias partes y verificar su correcta movilidad, a fin de hacer los ajustes necesarios al diseño con eficiencia y bajo costo. Además, esta herramienta permite obtener directamente planos de taller y de montaje listos para su utilización. Por último en este tipo de herramientas es posible hacer simulación del movimiento que tendría el mecanismo real una vez construido.

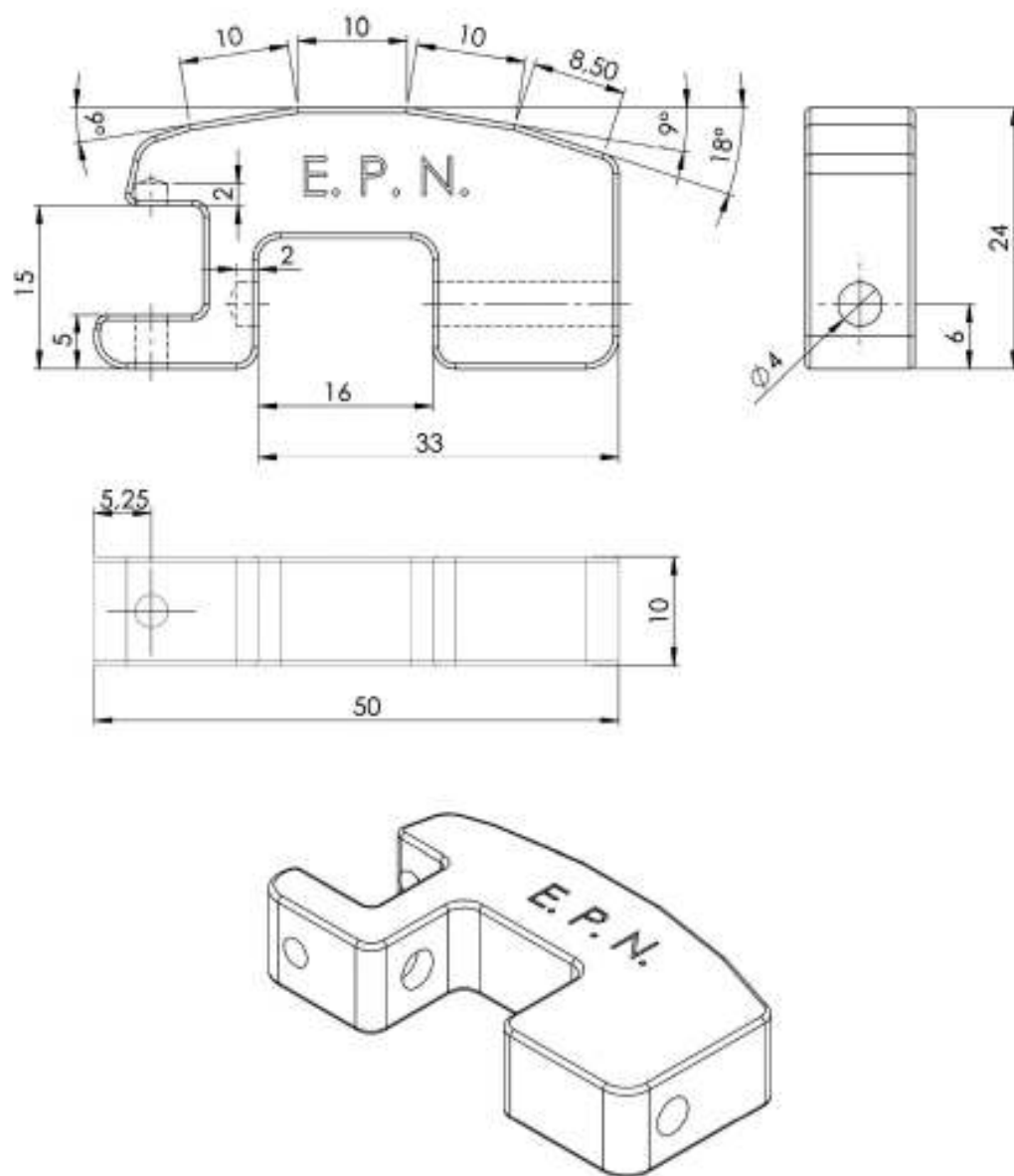


Fig. 2.4: Diseño propuesto para el carpo y dimensionamiento del mismo

Fuente: Propia

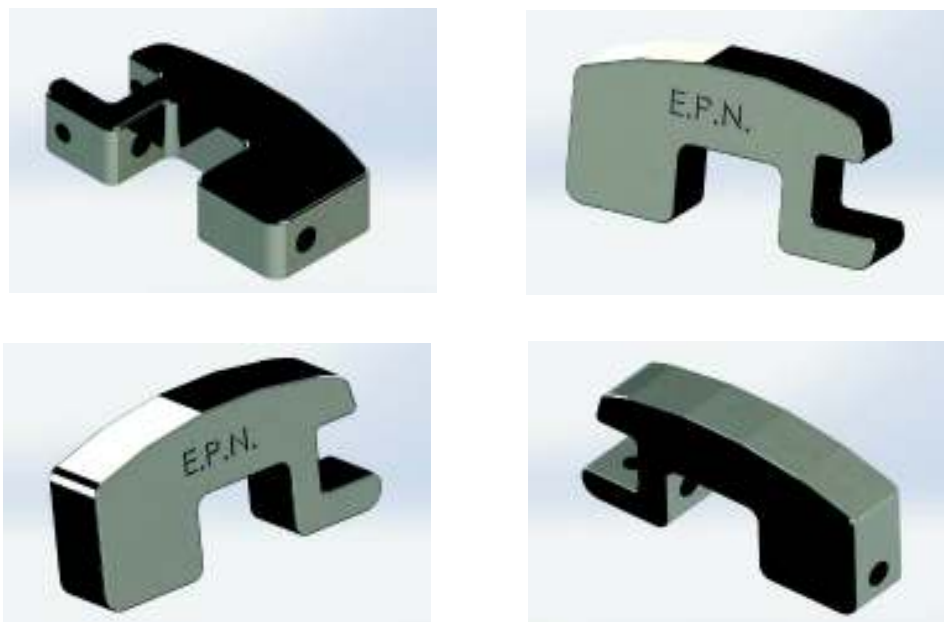
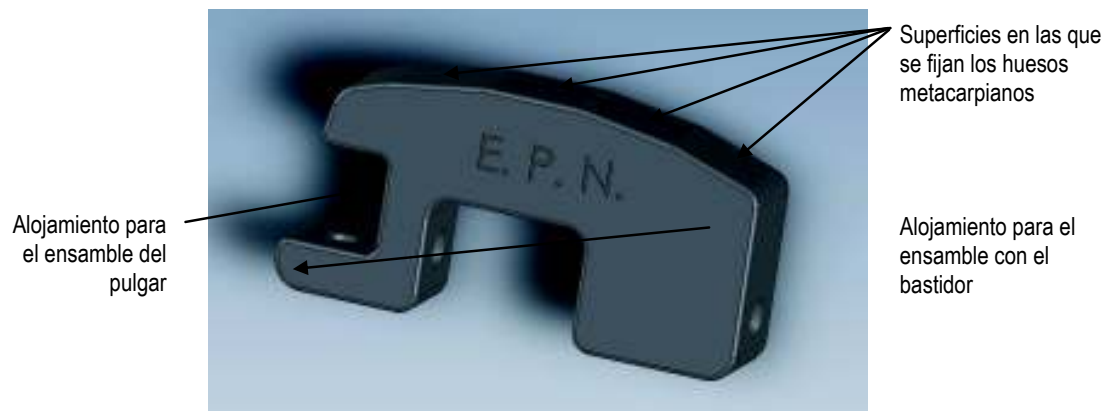


Fig. 2.5: Varias vistas simuladas del carpo
Fuente: Propia

Los 4 metacarpianos correspondientes a los dedos segundo al cuarto son elementos alargados y sin movilidad, puesto que se unen con el carpo formando ángulos de entre 9 y 10 grados entre ellos, dados por la superficie carpiana sobre la que se fijan. Con el fin de mostrar una similitud adecuada con la mano real, se diseñan los huesos metacarpianos en la forma indicada en la figura 2.6.

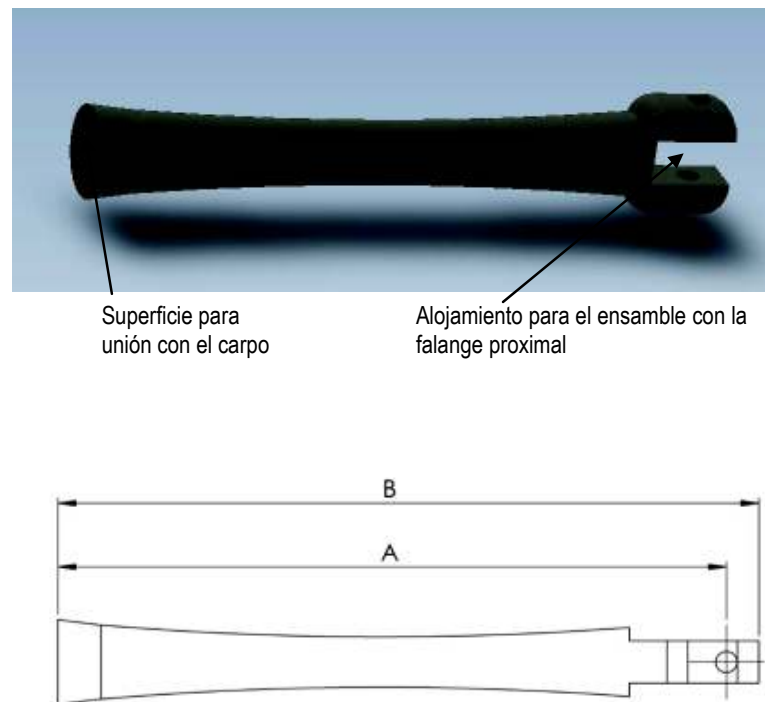


Fig. 2.6: Esquema del diseño geométrico propuesto para los metacarpianos
Fuente: Propia

La longitud de cada metacarpiano, signada por la dimensión “A” se determina utilizando el estudio antropomórfico de J.W. Garrett, para una longitud de mano total estándar de 175 mm indica el diseño propuesto para los metacarpianos. La tabla 2.1 indica la longitud de cada metacarpiano en referencia a la dimensión “A” indicada en la figura 2.6.

Tabla 2.1: Longitud de los metacarpianos

| Dedo | % de la longitud de la mano | A (mm) |
|---------|-----------------------------|--------|
| Índice | 30,6 % | 53,2 |
| Medio | 32,1 % | 55,8 |
| Anular | 31,4 % | 54,6 |
| Meñique | 24,1 % | 42,0 |

Elaboración: Alfonso Boada

El extremo del metacarpiano que no va unido al carpo se ensamblará mediante una junta de cruceta con la primera falange de cada dedo, proporcionando dos DOF a cada uno de ellos. El otro extremo quedará fijo al carpo. En la figura 2.7 se observa el ensamble de los 4 metacarpianos con el carpo.

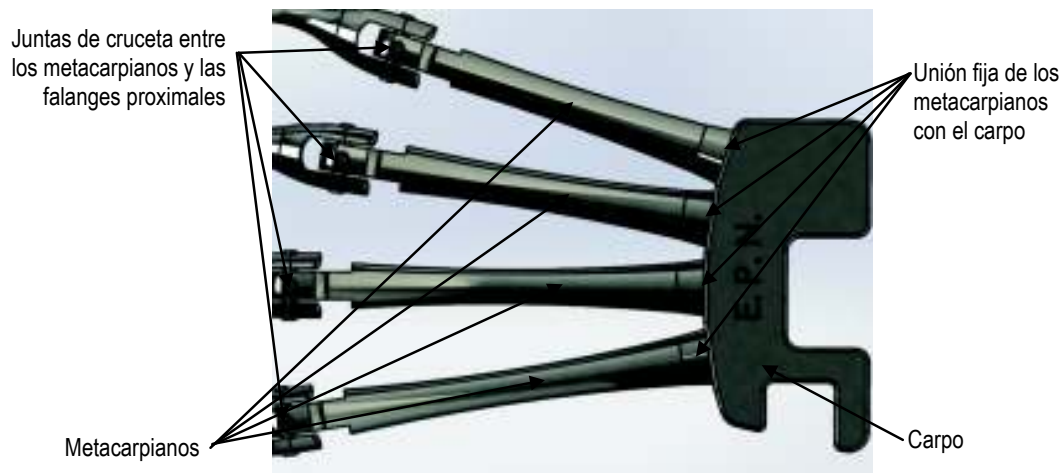


Fig. 2.7: Ensamble de los metacarpianos con el carpo
Fuente: Propia

El metacarpiano del pulgar tiene una movilidad propia, cuyo ensamble se indicará más adelante. Atendiendo al estudio antropomórfico citado, la longitud del metacarpiano del pulgar se establece en 30,0mm. Dicho ensamble permite que el dedo pulgar se oriente al contrario de los otros dedos y tenga una movilidad diferente, para consolidar la función de agarre. Con esta disposición se obtienen dos grados de libertad para el pulgar, proporcionándole un rango de movimiento (espacio de trabajo) considerablemente amplio.

2.3. DISEÑO DE LOS MANIPULADORES (DEDOS)

Cada uno de los dedos, a excepción del pulgar, tiene 3 falanges: proximal, media y distal. La falange proximal se une al metacarpo, específicamente a cada uno de los huesos metacarpianos, que son alargados, y cuyas dimensiones se indicaron en la tabla 2.1. Dicha unión se produce mediante una junta de cruceta, que permite para cada dedo, un rango de movimiento de dos DOF, como lo indica la figura 2.8.

Seguidamente cada una de las falanges se une con la siguiente mediante un par cinemático de pasador (revoluta), que le proporciona un grado de libertad, como se indica genéricamente en la figura 2.9. Las dimensiones específicas que tiene cada una de las falanges de cada dedo se indican en la tabla 2.2, en referencia a las genéricas establecidas en la figura 2.10 y en base al estudio antropomórfico de Garrett, para una longitud de mano genérica de 175 mm.

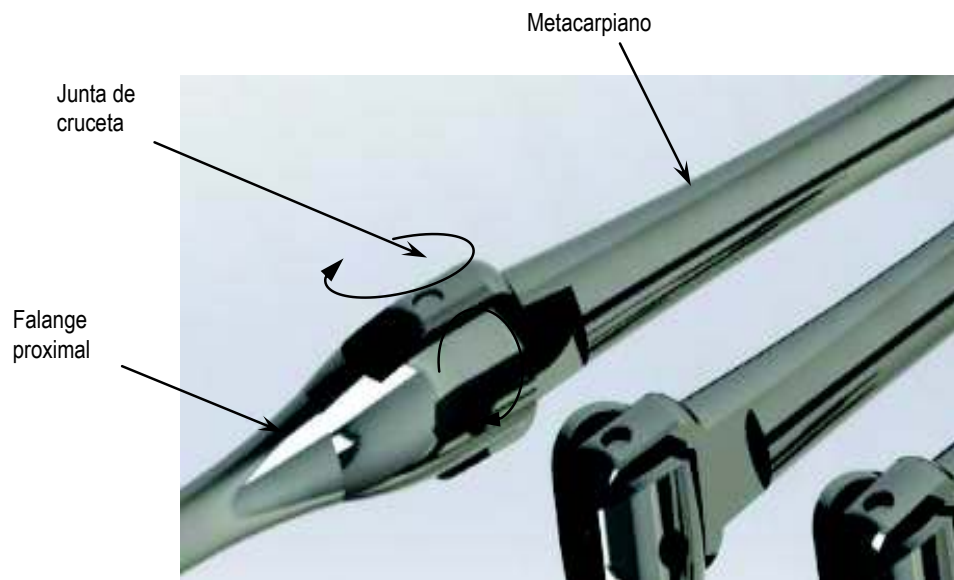


Fig. 2.8: Ensamblaje metacarpiano-falange proximal y grados de libertad del mismo
Fuente: Propia

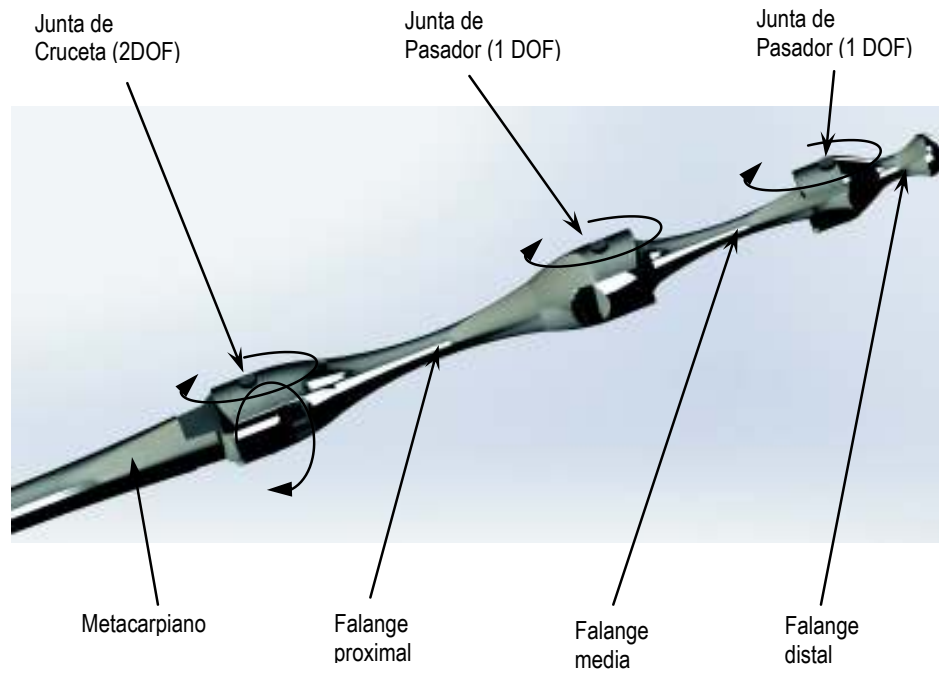
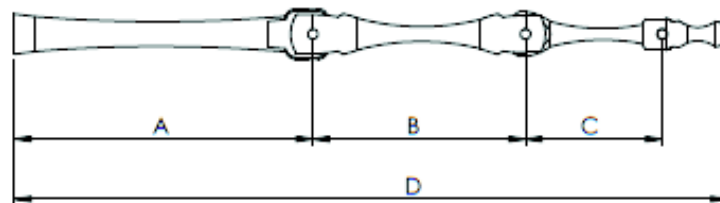


Fig. 2.9: Ensamble de los dedos y sus grados de libertad
Fuente: Propia



2.10: Dimensiones genéricas de los dedos
Fuente: Propia

Tabla 2.2: Dimensiones de los dedos para una longitud de mano estándar $L_m = 175$ mm
(Tomado del estudio antropomórfico de J. W. Garrett)

| Dedo | A | | B | | C | | D | |
|----------------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|-------|
| | % de L_m | (mm) | % de L_m | (mm) | % de L_m | (mm) | % de L_m | (mm) |
| Índice | 30,40 | 53,2 | 21,8 | 38,0 | 14,1 | 24,5 | 76,6 | 133,2 |
| Medio | 31,89 | 55,8 | 24,5 | 42,7 | 15,8 | 27,5 | 82,2 | 143,1 |
| Anular | 31,38 | 54,6 | 22,2 | 39,0 | 15,3 | 26,7 | 78,9 | 137,3 |
| Meñique | 24,14 | 42,0 | 17,2 | 30,0 | 10,8 | 19,0 | 60,9 | 106,0 |

Elaboración: Alfonso Boada

El ensamble final de los 4 dedos con cada uno de los metacarpianos se ilustra en las figuras 2.11-a y 2.11-b, en donde se puede observar la mano en un estado de distensión natural.



Fig. 2.11-a: Ensamble de los 4 dedos con el carpo y el metacarpo
Fuente: Propia



Fig. 2.11-b: Simulación del ensamble metálico
Fuente: Propia

El ensamble construido permite visualizar los 4 dedos “paralelos” y la movilidad que se ha asignado a todos ellos, con lo cual ya es posible generar posibles movimientos del dispositivo robótico. En las figuras 2.12 se observa el ensamble completo del

carpo con los 4 dedos en varias posiciones determinadas por la rotación de las falanges.



a) Posición de puño



b) Señalando con el índice



c) Contando. El número 2



d) El número 3

Fig. 2.12: Varias posiciones del dispositivo
Fuente: Propia

El dedo pulgar, a diferencia de los otros cuatro, tiene una movilidad diferente y un anclaje contrario a todos los otros dedos, lo cual proporciona a la mano la capacidad de agarre. Una diferencia fundamental es que el metacarpiano del pulgar no está fijo al carpo, sino que posee libertad de rotación al menos en dos direcciones diferentes. Para este dedo se propone el diseño indicado en la figura 2.13, en el cual el metacarpiano tiene dos grados de libertad proporcionados por dos pares cinemáticos de pasador ligeramente desalineados.

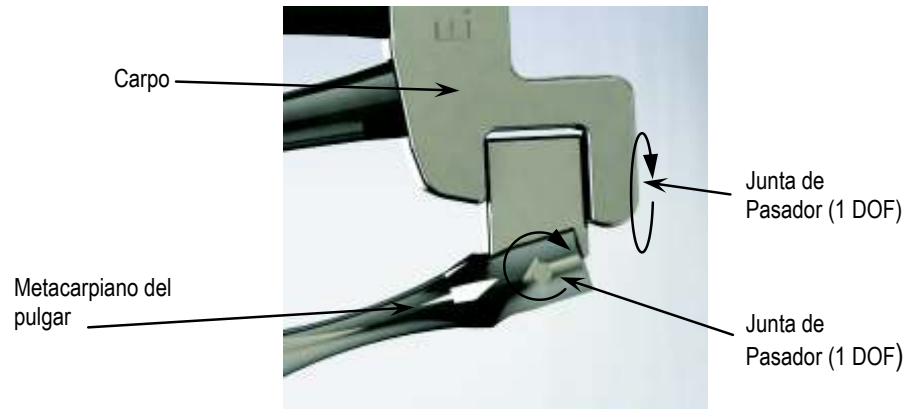


Fig. 2.14: Ensamble del metacarpiano del pulgar con el carpo y sus grados de libertad.

Fuente: Propia

Otra característica del pulgar es la de ser el único dedo que solo tiene dos falanges: proximal y distal. La longitud de la proximal, según el estudio de Garrett, es del 16,4% de la longitud total de la mano, es decir de 28,7 mm, y la distal tiene una longitud del 7,6% de la longitud total, lo que corresponde a 13,2 mm. Para completar la movilidad del pulgar, la falange proximal se acopla con el metacarpiano mediante una junta de cruceta que proporciona dos grados de libertad, y las dos falanges se acoplan entre sí con una junta de pasador, que proporciona un grado de libertad, como se aprecia en la figura 2.14:

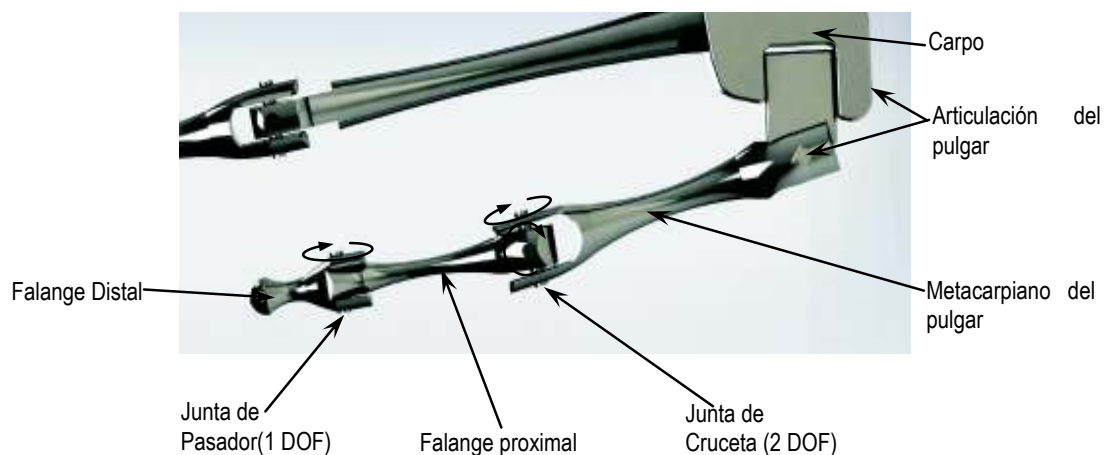


Fig. 2.14: Ensamble del dedo pulgar

Fuente: Propia

Una vez concluido el diseño y ensamble de la mano con todos los dedos montados y el soporte, se obtiene el diseño geométrico indicado en las figuras 2.15



Fig. 2.15-a: Mano completa distendida
Fuente: Propia



Fig. 2.15-b: Mano distendida, vista inferior
Fuente: Propia



Fig. 2.16-c: Vista superior de la mano completa
Fuente: Propia



Fig. 2.16-d: Ensamble completo de la mano con el eslabón fijo
Fuente: Propia

El diseño geométrico ha sido desarrollado en su totalidad en el software “SolidWorks”, dando como resultado lo descrito en el actual capítulo. A continuación se hará el análisis cinemático y la simulación, para lo que se utilizará el software Matlab, específicamente la herramienta “robot” del toolbox, la misma que ha venido siendo desarrollada desde su creación en 1999 por Peter I. Corke. Gracias a esta herramienta es posible realizar la simulación de brazos robóticos de hasta seis grados de libertad. En los siguientes capítulos se muestran diversas capturas de pantalla en las que se puede observar parte de los códigos de programación utilizados en la simulación de cada uno de los dedos. En el anexo 1 sin embargo, se encuentran todos los códigos de programación completos de manera que se puede re escribirlos en cualquier momento y utilizarlos para simulación de este dispositivo.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SIMULACIÓN DE LA CINEMÁTICA DIRECTA DEL DISPOSITIVO

3.1. GENERALIDADES

Completado el diseño geométrico del dispositivo en cuanto a las dimensiones y configuración de la movilidad de cada uno de sus elementos, se procede en este capítulo a realizar un análisis geométrico-dimensional de cada uno de los dedos que arroja como resultado la obtención de los parámetros Denavit-Hartenberg necesarios para proceder con la simulación de la cinemática directa de ellos. Se entiende como cinemática directa a la determinación de la posición que alcanzan el efector final, al proporcionar ciertos desplazamientos angulares o lineales a cada una de las juntas que conforman la totalidad del mecanismo. Para el efecto, en el presente trabajo se utilizará el método Denavit-Hartenberg estándar (DHS) con la ayuda informática del software Matlab. Lo primero que debe hacerse es seguir el algoritmo desarrollado y utilizado por el método, que se resume en los siguientes pasos²⁹:

- a. Numerar los eslabones.
- b. Localizar el eje de cada junta (rotacional o traslacional)
- c. Situar los ejes “ z_i ” de cada junta
- d. Ubicar el sistema de referencia “O” en el origen de coordenadas
- e. Ubicar el eje “ x_i ” en la perpendicular común a “ z_{i-1} ” y “ z_i ”. Si no existe tal perpendicular, el eje “ x_i ” se situará en el mismo “ x_{i-1} ”.
- f. Llenar el cuadro de parámetros DH

²⁹ GRANJA ORAMAS M.V.; Modelación y análisis de la cinemática directa e inversa del manipulador Stanford de 6 grados de libertad; Tesis EPN, octubre 2014

- g. Determinar las matrices de transformación de coordenadas de cada junta
- h. Determinar la matriz global homogénea de transformación

Es necesario indicar que en el caso que se estudia en este trabajo, todas las juntas que son de tipo rotacional. Ninguno de los eslabones cuenta con juntas traslacionales.

Para iniciar el análisis y simulación de los eslabones que conforman el dispositivo, es necesario realizar algunas puntualizaciones: en primer lugar, los dedos de la mano tienen un nombre técnico por el que se los identifica anatómicamente, así: el dedo pulgar se denomina Primer dedo, el índice es el Segundo dedo, dedo medio se llama Tercer dedo, el anular se denomina Cuarto dedo y el meñique se conoce como Quinto dedo.

En segundo término, debido a que los dedos desde el segundo al quinto tienen una movilidad similar, su análisis es repetitivo, variando únicamente sus coordenadas de inicio y la longitud de las falanges. El análisis de este grupo de dedos se trata en el subcapítulo 3.2.

En tercer lugar, el dedo pulgar tiene una orientación y movilidad contrarias a los demás dedos, por lo que su análisis se hace en el subcapítulo 3.3 en forma individual.

Por último, debido a que el carpo y el metacarpo no poseen movilidad relativa entre ellos, se considera en el análisis que estas estructuras forman un solo cuerpo rígido, el mismo que será reemplazado por un nuevo eslabón para cada dedo, el mismo que va desde la cruceta que une el carpo con el brazo hasta la que une el metacarpo con la falange proximal como se observa en la figura 3.1. La longitud y orientación de este nuevo eslabón se obtienen por simple geometría de triángulos, tomando en cuenta las dimensiones de cada parte obtenidas en el capítulo 2.

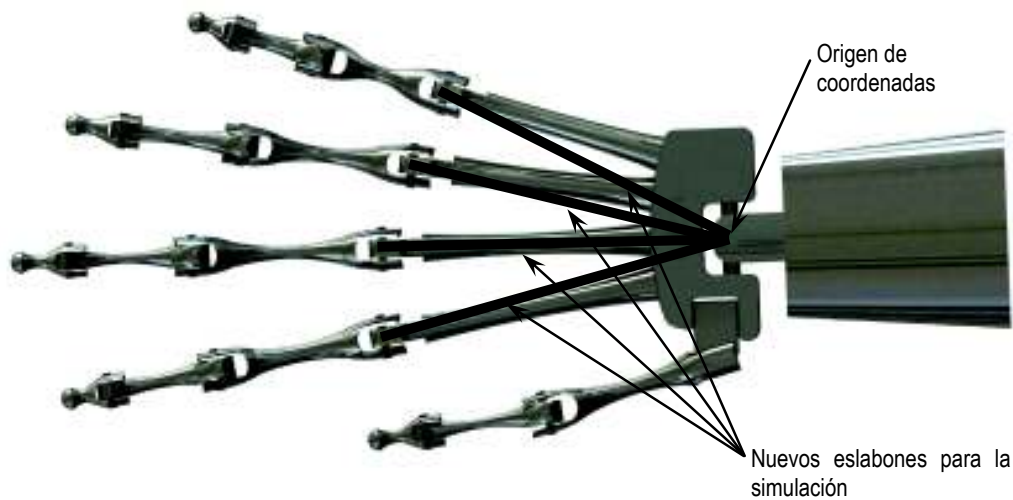


Figura 3.1. Asignación de nuevos eslabones para simulación
Fuente: Propia

3.2. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL SEGUNDO AL QUINTO DEDO

Debido a su configuración anatómica, el análisis de la geometría y la simulación de los dedos segundo al quinto es similar, variando para cada uno la posición inicial de cada una de las falanges proximales y la longitud de todas las falanges. La movilidad de cada dedo es idéntica, por lo que su análisis cinemático también lo es, debiéndose, por supuesto, variar los parámetros Denavit-Hartenberg (DH) para cada dedo.

3.2.1. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DEDO ÍNDICE (SEGUNDO DEDO)

El proceso de análisis inicia con el establecimiento de un diagrama esquelético del dedo, que representa su configuración geométrica y en el cual se puede observar la numeración de cada eslabón y su dimensionamiento, que en el caso del segundo dedo se indica en la figura 3.2.

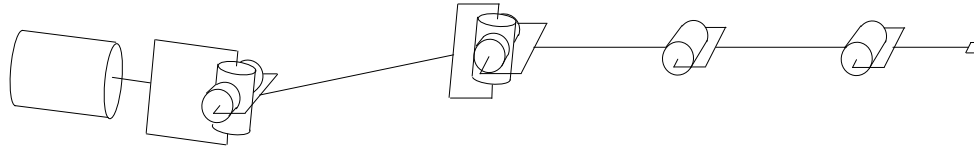


Figura 3.2. Configuración esquelética del segundo dedo
Fuente: Propia

A continuación se debe asignar los ejes z_i de cada articulación, comenzando con z_0 que pertenece al eslabón número 1 (bastidor). La numeración de los eslabones y la asignación de los ejes z_i del segundo dedo se observan en la figura 3.3.

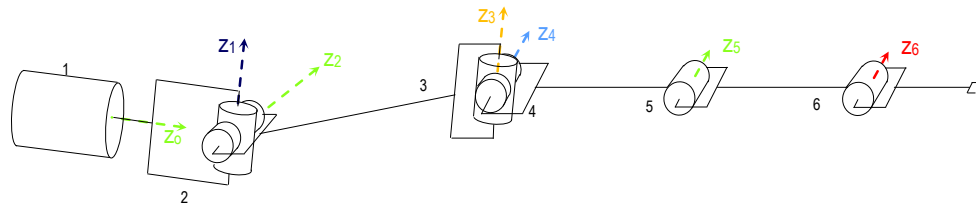


Figura 3.3. Numeración de eslabones y asignación de ejes z_i
Fuente: Propia

Luego, se procede a completar los respectivos sistemas de coordenadas de acuerdo con los siguientes lineamientos:

1. El eje x_i se ubica en la perpendicular común a los ejes z_{i-1} y z_i . Si la misma no existe, entonces el eje x_i se ubica en la misma dirección que x_{i-1} .
2. Los ejes “y” se colocan de tal manera que el sistema de coordenadas formado sea dextrógiro.

En la figura 3.4 se indican los sistemas de coordenadas obtenidos y el dimensionamiento del segundo dedo. Las dimensiones de las falanges se obtienen del diseño geométrico realizado en el capítulo 2, específicamente de la tabla 2.2, mientras que las dimensiones del nuevo eslabón metacarpiano para este dedo se determinan geoméricamente de acuerdo con lo observado en la figura 3.5.

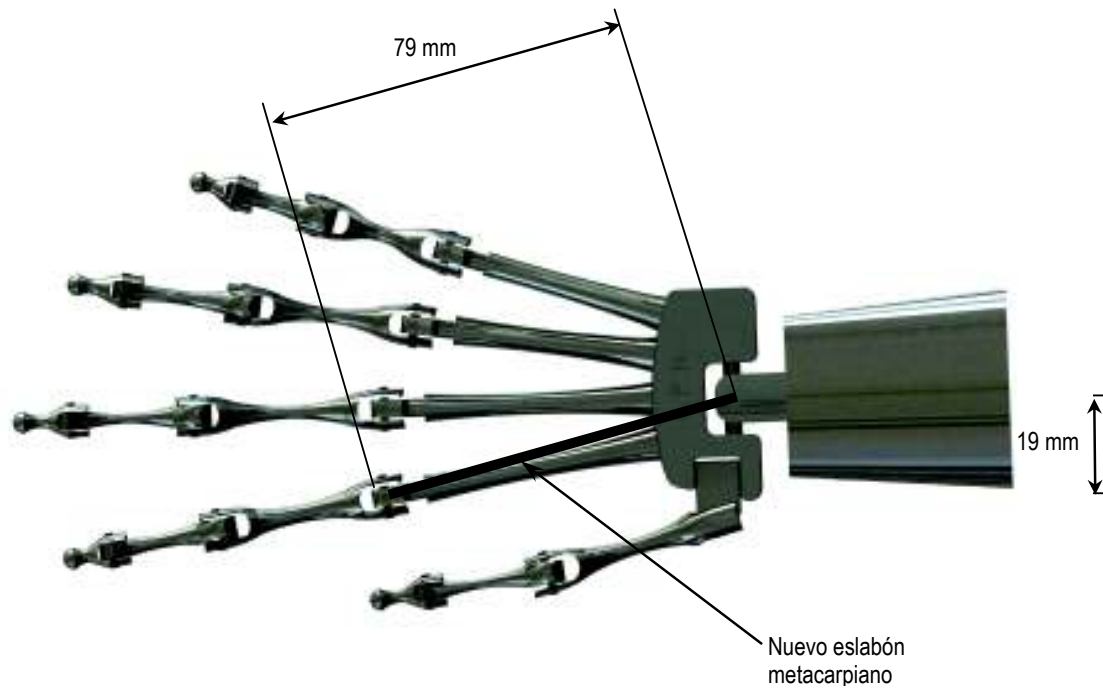


Fig. 3.4: Determinación del nuevo eslabón metacarpiano
Fuente: Propia

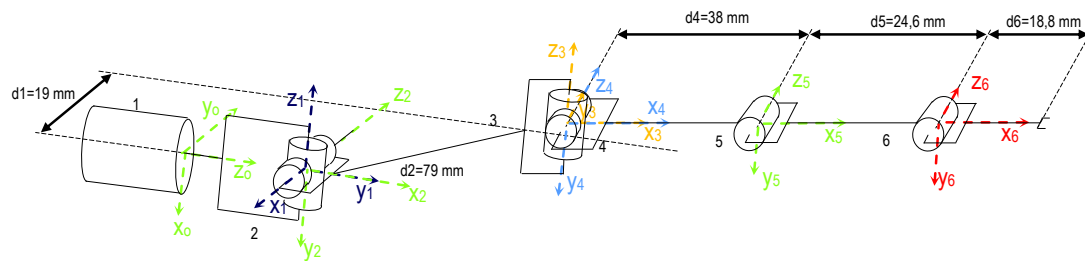


Fig. 3.5: Sistemas de coordenadas y dimensionamiento del segundo dedo
Fuente: Propia

A continuación se establecen los parámetros Denavit-Hartenberg para el conjunto de articulaciones desarrollado. La definición y significación de cada uno de estos parámetros es la siguiente:

- α_i es el ángulo entre los ejes z_i y z_{i-1}
- a_i es la distancia entre los ejes z_i y z_{i-1} , medida a lo largo del eje x

- θ_i es el ángulo entre los ejes x_i y x_{i-1}
- d_i es la distancia entre los ejes x_i y x_{i-1} , medida a lo largo del eje z

La tabla 3.1 muestra los parámetros Denavit-Hartenberg para el segundo dedo.

Tabla 3.1: Parámetros Denavit-Hartenberg para el segundo dedo

| Eslabón | θ_i ($^\circ$) | d_i (mm) | a_i (mm) | α_i ($^\circ$) |
|---------|----------------------------|---------------|---------------|----------------------------|
| 1 | θ_1 | 0.0 | 0.0 | -90 |
| 2 | θ_2 | 19 | 79.0 | -90 |
| 3 | θ_3 | 0.0 | 0.0 | 90 |
| 4 | θ_4 | 0.0 | 38.0 | 0 |
| 5 | θ_5 | 0.0 | 24.6 | 0 |
| 6 | θ_6 | 0.0 | 18.8 | 0 |

Elaboración: Alfonso Boada

El algoritmo Denavit-Hartenberg establece la siguiente secuencia de movimientos para cada articulación: Primero, una rotación alrededor del eje “z”, a continuación una traslación sobre el eje “z”, luego una traslación sobre el eje “x” y por último una rotación alrededor del eje “x”. Esta secuencia debe mantenerse para cada articulación, puesto que el producto de matrices no es conmutativo. La secuencia genera una matriz de transformación de coordenadas para cada articulación, como se estableció en [1.4]. Es decir, en el caso de cada dedo, se tienen 6 matrices, puesto que existen 6 articulaciones. La matriz de transformación de la articulación “i” se determina por:

$$A_i = R_{z,\theta_i} T_{z,d_i} T_{x,a_i} R_{x,\alpha_i} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

A_i es la matriz de transformación de coordenadas de la articulación i

R_{z,θ_i} es la matriz de rotación alrededor del eje z_i .

T_{z,d_i} es la matriz de traslación en el eje z_i . En este caso, es constante pues no existe tal traslación.

T_{x,a_i} es la matriz de traslación en el eje x_i , que para el caso también se mantiene constante.

R_{x,α_i} es la matriz de rotación alrededor del eje x_i

Dada la naturaleza del dispositivo, las matrices de traslación se mantienen constantes. Las matrices de rotación y traslación fueron analizadas en [1.4]. En general, cada matriz de transformación A_i se obtiene mediante:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

A fin de simplificar la escritura de las matrices se utiliza el símbolo “C” para denotar a la función “coseno”, y el “S” para la función “seno”. Para este dedo, además se utilizarán las siguientes equivalencias:

$C1 = \cos \theta_1$; $C2 = \cos \theta_2$; $C3 = \cos \theta_3$; $C4 = \cos \theta_4$; $C5 = \cos \theta_5$; $C6 = \cos \theta_6$

$S1 = \sin \theta_1$; $S2 = \sin \theta_2$; $S3 = \sin \theta_3$; $S4 = \sin \theta_4$; $S5 = \sin \theta_5$; $S6 = \sin \theta_6$

Reemplazando los valores de α_i indicados en la tabla 3.1 para las funciones coseno y seno de la matriz genérica A_i se obtienen 6 matrices de transformación generadas para el segundo dedo, signadas desde A_1 hasta A_6 :

$$A_1 = \begin{bmatrix} C1 & 0 & -S1 & 0 \\ S1 & 0 & C1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C2 & 0 & -S2 & 0.79 C2 \\ S2 & 0 & C2 & 0.79 S2 \\ 0 & -1 & 0 & 0.19 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C3 & 0 & -S3 & 0 \\ S3 & 0 & C3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 A_4 &= \begin{bmatrix} C4 & 0 & -S4 & 0.38 C4 \\ S4 & 0 & C4 & 0.38 S4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_5 &= \begin{bmatrix} C5 & -S5 & 0 & 0.24 C5 \\ S5 & C5 & 0 & 0.24 S5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_6 &= \begin{bmatrix} C6 & -S6 & 0 & 0.18 C6 \\ S6 & C6 & 0 & 0.18 S6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ecs. 3.3})
 \end{aligned}$$

La matriz global de transformación T_2 para este sistema es:

$$T_2 = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Cuya solución genérica es:

$$T_2 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde las componentes rotacionales globales (R_{11} , R_{12} , R_{13} , R_{21} , R_{22} , R_{23} , R_{31} , R_{32} , R_{33}) son:

$$\begin{aligned}
 R_{11} = & C6\{C5[C4(S1*S3 + C1*C2*C3)+C1*S2*S4]-S5[S4*(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*C4*S2]\} - \\
 & S6\{C5[S4(S1*S3 + C1*C2*C3) - C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*S2*S4]\} \\
 & \quad (\text{Ec. 3.6})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{12} = & - C6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*S2*S4]\} - \\
 & S6\{C5[C4(S1*S3 + C1*C2*C3)+C1*S2*S4]-S5[S4(S1*S3 + C1*C2*C3)-C1*C4*S2]\} \\
 & \quad (\text{Ec. 3.7})
 \end{aligned}$$

$$R_{13} = C3*S1 - C1*C2*S3 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$\begin{aligned}
 R_{21} = & S6\{C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)+C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3 - C2*C3*S1)-S1*S2*S4]\} - \\
 & C6\{C5[C4(C1*S3 - C2*C3*S1)-S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)+C4*S1*S2]\} \\
 & \quad (\text{Ec. 3.9})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{22} = & C6\{C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)+C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3 - C2*C3*S1)-S1*S2*S4]\} + \\
 & S6\{C5[C4(C1*S3 - C2*C3*S1)-S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3 - C2*C3*S1)+C4*S1*S2]\} \\
 & \quad (\text{Ec. 3.10})
 \end{aligned}$$

$$R_{23} = -C1*C3 - C2*S1*S3 \quad (\text{Ec. 3.11})$$

$$R_{31} = C6[C5(C2*S4-C3*C4*S2)+S5(C2*C4+C3*S2*S4)] + S6[C5(C2*C4+C3*S2*S4) - S5(C2*S4-C3*C4*S2)] \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$R_{32} = C6[C5(C2*C4+C3*S2*S4)-S5(C2*S4 - C3*C4*S2)] - S6[C5(C2*S4-C3*C4*S2)+ S5(C2*C4 + C3*S2*S4)] \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$R_{33}=S2*S3 \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Y las componentes rectangulares de la posición del efector final (P_x , P_y , P_z) son:

$$P_x = \{9*C6*\{C5*[C4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*S2*S4]-S5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*C4*S2]\}/50 - \{9*S6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*S2*S4]\}/50 + [19*C4(S1*S3+C1*C2*C3)]/50 + \{6*C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*S2*S4]\}/25 - \{6*S5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*C4*S2]\}/25 + (79*C1*C2)/100 + (19*C1*S2*S4)/50 - (19*S1)/100 \quad (\text{Ec. 3.15})$$

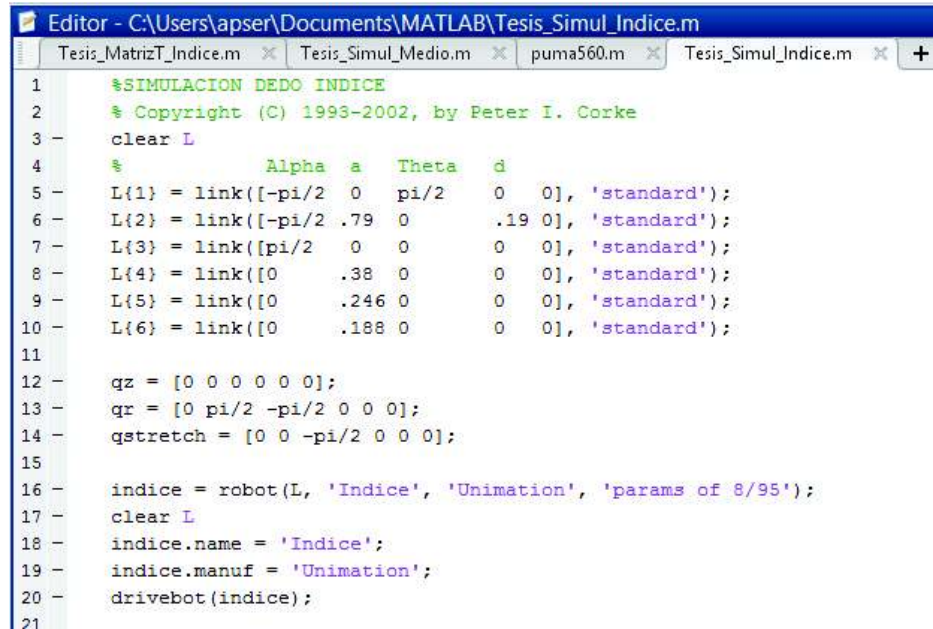
$$P_y = -\{9*C6\{C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)-S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)+C4*S1*S2]\}/50 - [19*C4(C1*S3 - C2*C3*S1)]/50 + \{9*S6\{C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)+C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)-S1*S2*S4]\}/50 - \{6*C5[C4(C1*S3 - C2*C3*S1)-S1*S2*S4]\}/25 + \{6*S5[S4(C1*S3 - C2*C3*S1)+C4*S1*S2]\}/25 + (79*C2*S1)/100 + (19*S1*S2*S4)/50 + (19*C1)/100 \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$P_z = [6*C5(C2*S4-C3*C4*S2)]/25 - (79*S2)/100 + [6*S5(C2*C4 + C3*S2*S4)]/25 + \{9*C6[C5(C2*S4 - C3*C4*S2) + S5*(C2*C4 + C3*S2*S4)]\}/50 + \{9*S6[C5(C2*C4 + C3*S2*S4) - S5(C2*S4 - C3*C4*S2)]\}/50 + (19*C2*S4)/50 - (19*C3*C4*S2)/50 \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Las ecuaciones 3.15 a 3.17 permiten determinar la posición que alcanzará el extremo del dedo (efector final) al dar un desplazamiento angular θ_i a cada una de las articulaciones, mediante la evaluación de P_x , P_y y P_z .

El proceso de simulación utiliza la herramienta “robot” del toolbox de Matlab para robótica. Para ello, se ingresan en la programación los parámetros DH indicados en la tabla 3.1. Adicionalmente, se coloca el valor “0” en la última coordenada de cada

vector “L”, para indicar que se trata de una junta rotatoria. La programación utilizada se observa en la captura de pantalla de la figura 3.6. El comando “drivebot” genera las pantallas de simulación en las que se podrá visualizar el movimiento del conjunto robótico, como se observa en las figuras 3.7 a) y b).



```

1  %SIMULACION DEDO INDICE
2  % Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
3  clear L
4  %           Alpha  a  Theta  d
5  L{1} = link([-pi/2  0  pi/2  0  0], 'standard');
6  L{2} = link([-pi/2  .79  0  .19  0], 'standard');
7  L{3} = link([pi/2  0  0  0  0], 'standard');
8  L{4} = link([0  .38  0  0  0], 'standard');
9  L{5} = link([0  .246  0  0  0], 'standard');
10 L{6} = link([0  .188  0  0  0], 'standard');
11
12 qz = [0 0 0 0 0 0];
13 qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
14 qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];
15
16 indice = robot(L, 'Indice', 'Unimation', 'params of 8/95');
17 clear L
18 indice.name = 'Indice';
19 indice.manuf = 'Unimation';
20 drivebot(indice);
21

```

Fig. 3.6: Programación en Matlab para el segundo dedo
Fuente: Propia

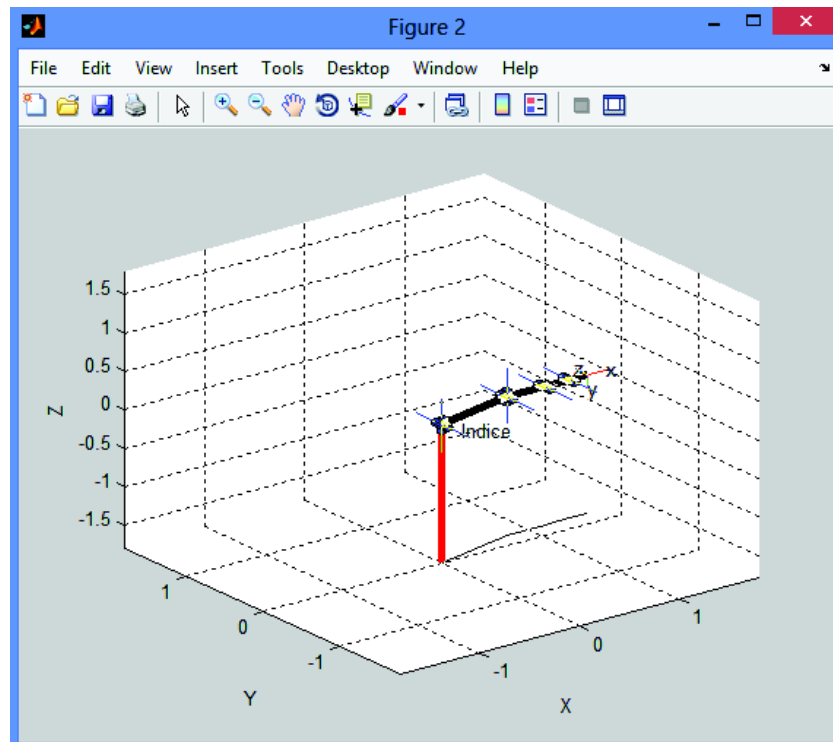


Fig. 3.7-a: Pantalla de simulación cinemática
Fuente: Propia

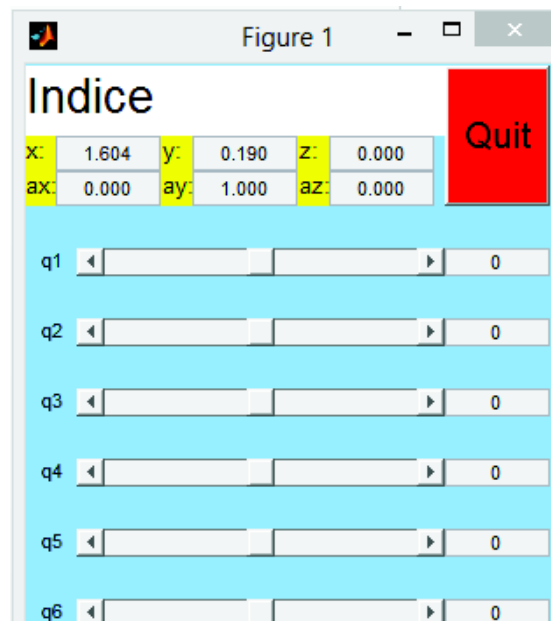


Fig. 3.7-b: Pantalla de desplazamientos angulares
Fuente: Propia

Nótese la presencia de las dos articulaciones de cruceta que se diseñaron en el capítulo 2 y el desplazamiento angular inicial entre ellas. Adicionalmente, se observa la posición inicial extendida del mecanismo, lo que representa al segundo dedo también en forma extendida. Además, en la pantalla de desplazamientos angulares se puede ver que el valor inicial del vector “q” es cero en todas sus celdas.

Al ingresar en esta pantalla valores de desplazamiento angular “q” (en radianes) para cada articulación, se obtienen las coordenadas finales del extremo del dedo, las cuales deben coincidir con los valores calculados en el vector de traslación (P_x , P_y , P_z).

El proceso descrito para el segundo dedo es similar para los dedos tercero al quinto, variando únicamente el valor de los parámetros Denavit-Hartenberg, como se verá a continuación.

3.2.2. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DEDO MEDIO (TERCER DEDO)

Al igual que en el dedo anterior, el proceso inicia con la determinación del nuevo eslabón metacarpiano y su dimensionamiento, lo que se observa en la figura 3.8.

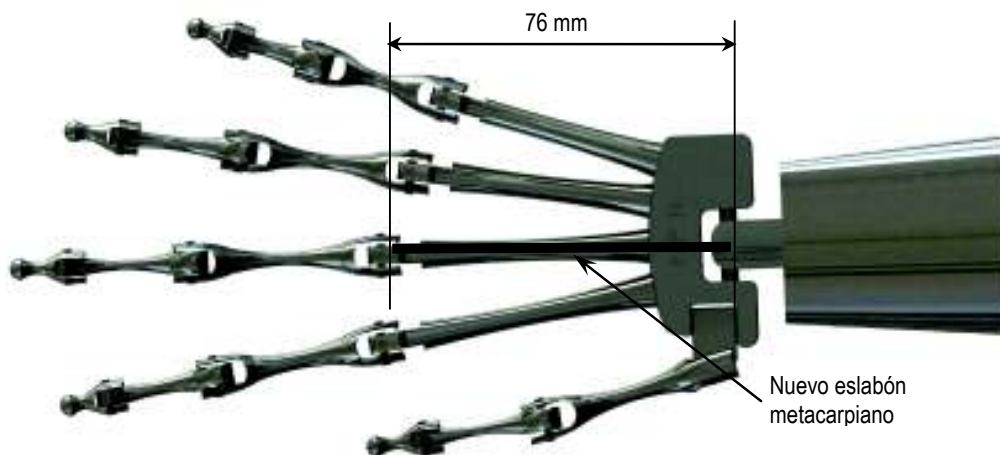


Fig. 3.8: Determinación del nuevo eslabón metacarpiano
Fuente: Propia

A continuación se determinan las dimensiones de las falanges de acuerdo con lo establecido en la tabla 2.2, lo que se indica en la figura 3.9.

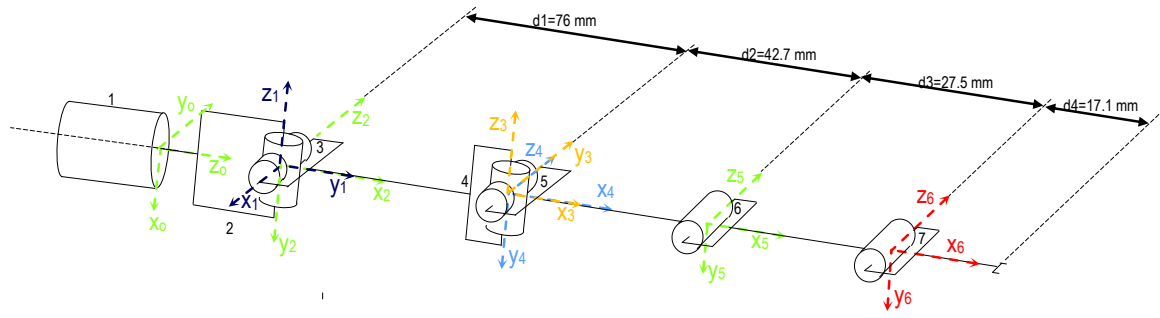


Fig. 3.9: Sistemas de coordenadas y dimensionamiento del tercer dedo
Fuente: Propia

La configuración geométrica de este dedo presenta una alineación entre todas las juntas, por lo que no existe desplazamiento angular inicial entre los eslabones. En la tabla 3.2 se observan los parámetros DH obtenidos de la figura 3.9

Tabla 3.2: Parámetros Denavit-Hartenberg para el tercer dedo

| Eslabón | θ_i ($^\circ$) | d_i (mm) | a_i (mm) | α_i ($^\circ$) |
|---------|----------------------------|---------------|---------------|----------------------------|
| 1 | θ_1 | 0 | 0 | -90 |
| 2 | θ_2 | 0 | 76 | -90 |
| 3 | θ_3 | 0 | 0 | 90 |
| 4 | θ_4 | 0 | 42.7 | 0 |
| 5 | θ_5 | 0 | 27.5 | 0 |
| 6 | θ_6 | 0 | 17.1 | 0 |

Elaboración: Alfonso Boada

Para este dedo se utilizará la siguiente nomenclatura:

$$C1=\cos \theta_1; C2=\cos \theta_2; C3=\cos \theta_3; C4=\cos \theta_4; C5=\cos \theta_5; C6=\cos \theta_6$$

$$S1=\sin \theta_1; S2=\sin \theta_2; S3=\sin \theta_3; S4=\sin \theta_4; S5=\sin \theta_5; S6=\sin \theta_6$$

Consecuentemente, las matrices de transformación de coordenadas para el tercer dedo son las siguientes:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C1 & 0 & -S1 & 0 \\ S1 & 0 & C1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C2 & 0 & -S2 & 0.76 C2 \\ S2 & 0 & C2 & 0.76 S2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C3 & 0 & S3 & 0 \\ S3 & 0 & -C3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & 0.427 C4 \\ S4 & C4 & 0 & 0.427 S4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} C5 & -S5 & 0 & 0.275 C5 \\ S5 & C5 & 0 & 0.275 S5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} C6 & -S6 & 0 & 0.171 C6 \\ S6 & C6 & 0 & 0.171 S6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ecs. 3.18})$$

La matriz de transformación global obtenida con Matlab para este dedo es:

$$T_3 = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Donde las componentes rotacionales son:

$$R_{11} = C6\{C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3) - C1*S2*S4] - S5[S4(S1*S3 + C1*C2*C3)+C1*C4*S2]\} - S6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3) + C1*C4*S2] + S5[C4(S1*S3 + C1*C2*C3) - C1*S2*S4]\} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$R_{12} = -C6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]\} - S6\{C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4] - S5[S4(S1*S3 + C1*C2*C3) + C1*C4*S2]\} \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$R_{13} = C1*C2*S3 - C3*S1 \quad (\text{Ec. 3.22})$$

$$R_{21} = S6\{C5[(S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2)+S5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]]\} - C6\{C5[C4(C1*S3 - C2*C3*S1)+S1*S2*S4] - S5[S4(C1*S3 - C2*C3*S1)-C4*S1*S2]\} \quad (\text{Ec. 3.23})$$

$$R_{22} = C6\{C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]\} + S6\{C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]\} \quad (\text{Ec. 3.24})$$

$$R_{23} = C1*C3+C2*S1*S3 \quad (\text{Ec. 3.25})$$

$$R_{31} = -C6\{C5(C2*S4+C3*C4*S2)+S5(C2*C4-C3*S2*S4)\} - S6\{C5*(C2*C4 - C3*S2*S4) - S5*(C2*S4 + C3*C4*S2)\} \quad (\text{Ec. 3.26})$$

$$R_{32} = S6\{C5(C2*S4+C3*C4*S2)+S5*(C2*C4-C3*S2*S4)\} - C6\{C5*(C2*C4 - C3*S2*S4) - S5*(C2*S4 + C3*C4*S2)\} \quad (\text{Ec. 3.27})$$

$$R_{33} = -S2*S3 \quad (\text{Ec. 3.28})$$

Y las componentes rectangulares de la posición son:

$$P_x = \{171*C6\{C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]-S5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]\}\}/1000 - \{171*S6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]\}\}/1000 + [427*C4(S1*S3 + C1*C2*C3)]/1000 + \{11*C5[C4(S1*S3 + C1*C2*C3) - C1*S2*S4]\}/40 - \{11*S5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]\}/40 + (19*C1*C2)/25 - (427*C1*S2*S4)/1000 \quad (\text{Ec. 3.29})$$

$$P_y = \{171*S6\{C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]\}\}/1000 - \{171*C6\{C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]\}\}\}/1000 - \{11*C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]\}/40 + \{11*S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]\}/40 - [427*C4*(C1*S3-C2*C3*S1)]/1000 + (19*C2*S1)/25 - (427*S1*S2*S4)/1000 \quad (\text{Ec. 3.30})$$

$$P_z = - (19*S2)/25 - [11*C5*(C2*S4+C3*C4*S2)]/40 - [11*S5*(C2*C4 - C3*S2*S4)]/40 - \{171*C6\{C5(C2*S4+C3*C4*S2)+S5(C2*C4-C3*S2*S4)\}\}/1000 - \{171*S6\{C5(C2*C4-C3*S2*S4)-S5(C2*S4 + C3*C4*S2)\}\}\}/1000 - (427*C2*S4)/1000 - (427*C3*C4*S2)/1000 \quad (\text{Ec. 3.31})$$

La programación para el tercer dedo en el Toolbox “robot” de Matlab se observa en la figura 3.10. La pantalla de simulación se muestra en la figura 3.11.

```

Editor - C:\Users\apser\Documents\MATLAB\Simulacion_Medio.m
puma560.m x MatrizT_Indice.m x Simulacion_Indice.m x MatrizT_Medio.m x Simulacion_Medio.m x
1  %SIMULACION DEDO MEDIO
2  % Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
3 - clear L
4  %      Alpha  a  Theta  d
5 - L{1} = link([-pi/2  0  0      0  0], 'standard');
6 - L{2} = link([-pi/2  .76  0      0  0], 'standard');
7 - L{3} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
8 - L{4} = link([0   .427  0      0  0], 'standard');
9 - L{5} = link([0   .275  0      0  0], 'standard');
10 - L{6} = link([0   .171  0      0  0], 'standard');
11
12 - qz = [0 0 0 0 0 0];
13 - qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
14 - qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];
15
16 - medio = robot(L, 'Medio', 'Unimation', 'params of 8/95');
17 - clear L
18 - medio.name = 'Medio';
19 - medio.manuf = 'Unimation';
20 - drivebot(medio);
21

```

Fig. 3.10: Programación MATLAB para simulación del tercer dedo
Fuente: Propia

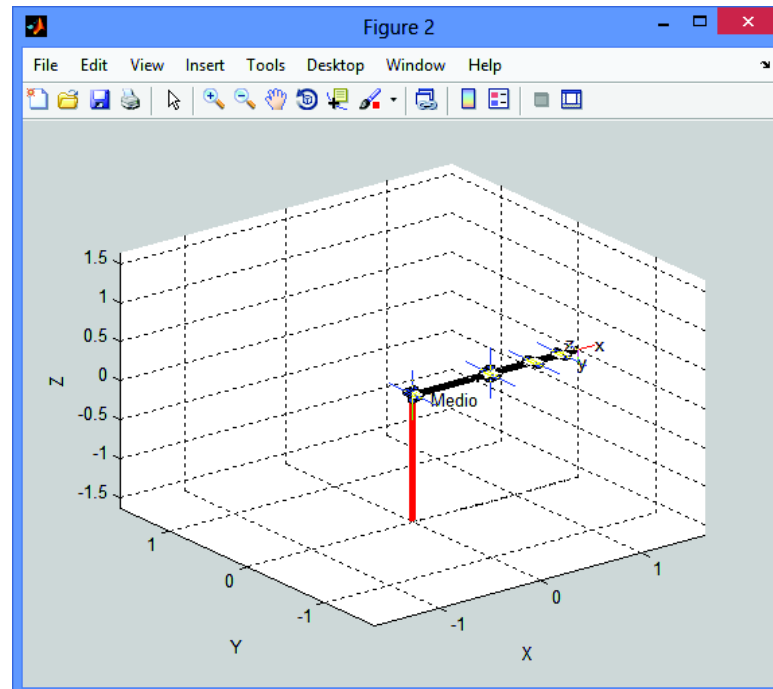


Fig. 3.11: Pantalla de simulación del tercer dedo
Fuente: Propia

3.2.3. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL DEDO ANULAR (CUARTO DEDO)

En la figura 3.12 se observa el diagrama esquelético del cuarto dedo, con su dimensionamiento. El dimensionamiento del nuevo metacarpiano así como de las falanges se obtienen de idéntica manera que en los casos anteriores. Nótese la doble desalineación angular entre la muñeca y la cruceta metacarpiana. Los parámetros DH se listan en la tabla 3.3.

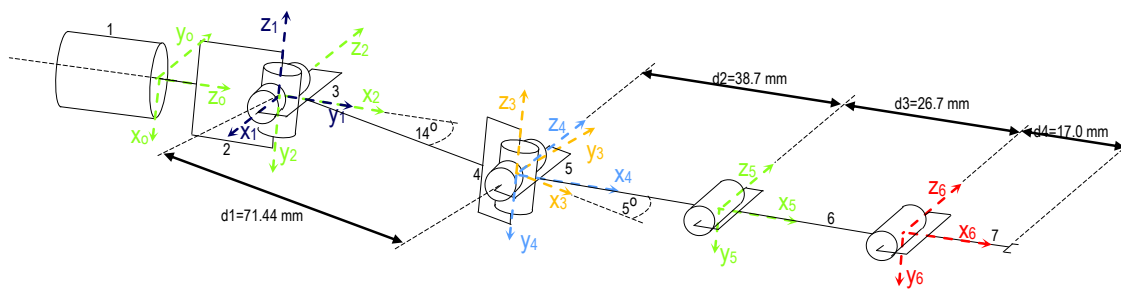


Fig. 3.12: Diagrama esquelético y dimensional del cuarto dedo
Fuente: Propia

Tabla 3.3: Parámetros Denavit-Hartenberg para el cuarto dedo

| Eslabón | θ_i ($^\circ$) | d_i (mm) | a_i (mm) | α_i ($^\circ$) |
|---------|----------------------------|---------------|---------------|----------------------------|
| 1 | θ_1 | 0 | 0.0 | -90 |
| 2 | θ_2 | -17 | 71.0 | -90 |
| 3 | θ_3 | 0 | 0.0 | 90 |
| 4 | θ_4 | 0 | 39.0 | 0 |
| 5 | θ_5 | 0 | 26.7 | 0 |
| 6 | θ_6 | 0 | 17.0 | 0 |

Elaboración: Alfonso Boada

Las equivalencias para las funciones seno y coseno son iguales que las establecidas en 3.2.2. Las matrices de transformación para el cuarto dedo son las siguientes:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C1 & 0 & -S1 & 0 \\ S1 & 0 & C1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C2 & 0 & -S2 & 0.71 C2 \\ S2 & 0 & C2 & 0.71 S2 \\ 0 & -1 & 0 & -0.17 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C3 & 0 & S3 & 0 \\ S3 & 0 & -C3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & 0.39 C4 \\ S4 & C4 & 0 & 0.39 S4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} C5 & -S5 & 0 & 0.267 C5 \\ S5 & C5 & 0 & 0.267 S5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} C6 & -S6 & 0 & 0.17 C6 \\ S6 & C6 & 0 & 0.17 S6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(Ecs. 3.32)

La matriz global de transformación T_4 para este dedo es:

$$T_4 = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.33})$$

Donde:

$$R_{11} = C6\{C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]-S5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]\} - S6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]\} \quad (\text{Ec. 3.34})$$

$$R_{12} = - C6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]\} - S6\{C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]-S5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]\} \quad (\text{Ec. 3.35})$$

$$R_{13} = C1*C2*S3 - C3*S1 \quad (\text{Ec. 3.36})$$

$$R_{21} = S6\{C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]\} - C6\{C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]\} \quad (\text{Ec. 3.37})$$

$$R_{22} = C6\{C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]\} + S6\{C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]\} \quad (\text{Ec. 3.38})$$

$$R_{23} = C1*C3 + C2*S1*S3 \quad (\text{Ec. 3.39})$$

$$R_{31} = - C6[C5(C2*S4+C3*C4*S2)+S5(C2*C4-C3*S2*S4)] - S6[C5(C2*C4-C3*S2*S4)-S5(C2*S4+C3*C4*S2)] \quad (\text{Ec. 3.40})$$

$$R_{32} = S6[C5(C2*S4 + C3*C4*S2) + S5*(C2*C4 - C3*S2*S4)] - C6[C5(C2*C4 - C3*S2*S4) - S5*(C2*S4 + C3*C4*S2)] \quad (\text{Ec. 3.41})$$

$$R_{33} = - S2*S3 \quad (\text{Ec. 3.42})$$

$$P_x = \{17*C6\{C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3) - C1*S2*S4]-S5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]\}/100 - \{17*S6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]\}/100 + [39*C4(S1*S3+C1*C2*C3)]/100 + \{267*C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]\}/1000 - \{267*S5\{S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2\}\}/1000+(71*C1*C2)/100-(39*C1*S2*S4)/100+(17*S1)/100 \quad (\text{Ec. 3.43})$$

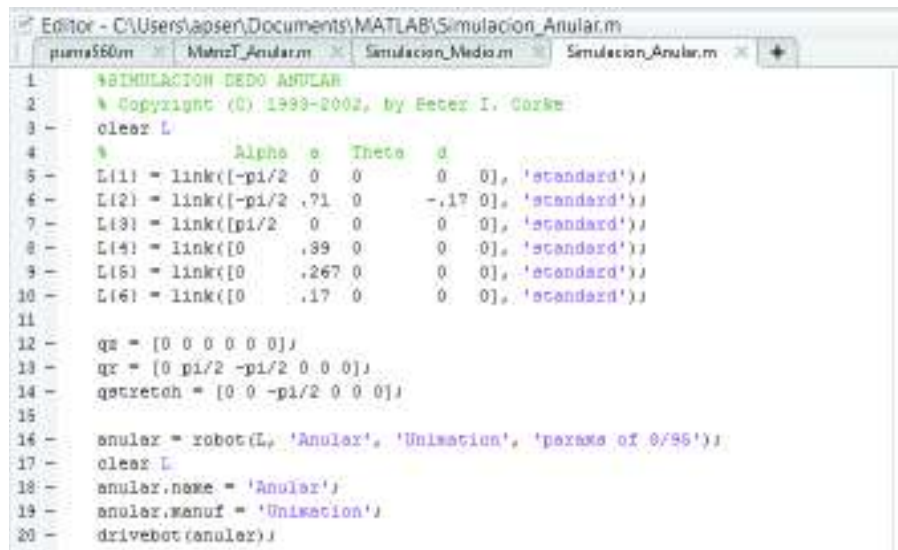
$$P_y = \{17*S6[C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]]\}/100 - \{17*C6[C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]]\}/100 - [39*C4(C1*S3-C2*C3*S1)]/100 - (17*C1)/100 - \{267*C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]\}/1000 + \{267*S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]\}/1000 + (71*C2*S1)/100 - (39*S1*S2*S4)/100$$

(Ec. 3.44)

$$P_z = (71*S2)/100 - [267*C5*(C2*S4 + C3*C4*S2)]/1000 - [267*S5*(C2*C4 - C3*S2*S4)]/1000 - \{17*C6[C5(C2*S4 + C3*C4*S2) + S5*(C2*C4 - C3*S2*S4)]\}/100 - \{17*S6[C5(C2*C4-C3*S2*S4)-S5(C2*S4 + C3*C4*S2)]\}/100 - (39*C2*S4)/100 - (39*C3*C4*S2)/100$$

(Ec. 3.45)

La programación en Matlab para el cuarto dedo se observa en la figura 3.13 y la pantalla de simulación en la 3.14.



```

Editor - C:\Users\taosen\Documents\MATLAB\Simulacion_Anular.m
puma560m  Matlab_Anular.m  Simulacion_Medio.m  Simulacion_Anular.m  +
1  %SIMULACION DEDO ANULAR
2  % Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
3  clear L
4  %      Alpha  o  Theta  d
5  L{1} = link([-pi/2 0 0 0 0], 'standard');
6  L{2} = link([-pi/2 .71 0 -.17 0], 'standard');
7  L{3} = link([pi/2 0 0 0 0], 'standard');
8  L{4} = link([0 .99 0 0 0], 'standard');
9  L{5} = link([0 .267 0 0 0], 'standard');
10 L{6} = link([0 .17 0 0 0], 'standard');
11
12 qz = [0 0 0 0 0 0];
13 qx = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
14 qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];
15
16 anular = robot(L, 'Anular', 'Uniseccion', 'peraxe of 0/95');
17 clear L
18 anular.name = 'Anular';
19 anular.manuf = 'Uniseccion';
20 drivebot(anular);

```

Fig. 3.13: Programación MATLAB para simulación del cuarto dedo
Fuente: Propia

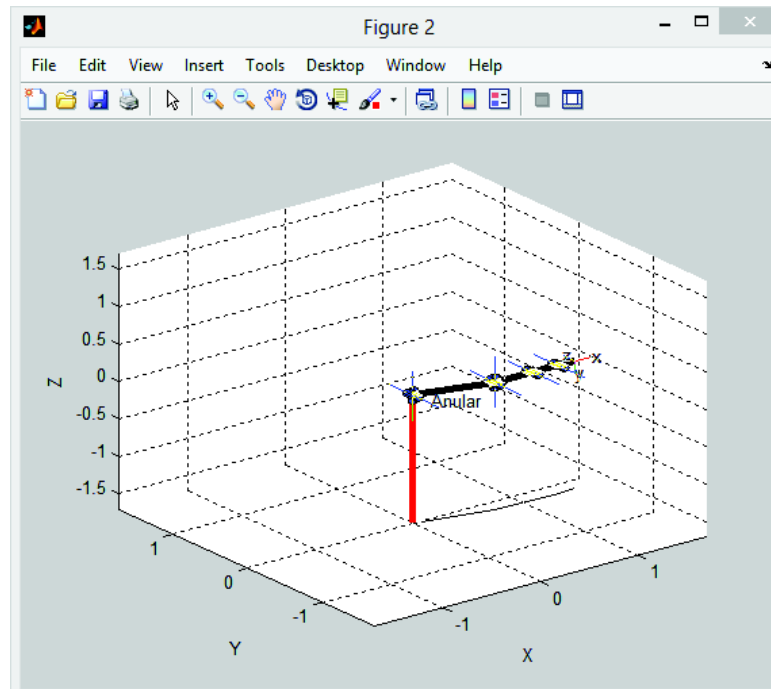


Fig. 3.14: Pantalla de simulación del cuarto dedo
Fuente: Propia

3.2.4. SIMULACIÓN DEL DEDO MEÑIQUE (QUINTO DEDO)

La figura 3.15 presenta el diagrama esquelético del quinto dedo, con su dimensionamiento. Nótese la similitud casi total con el cuarto dedo, exceptuando las dimensiones geométricas. Los parámetros DH se listan en la tabla 3.4:

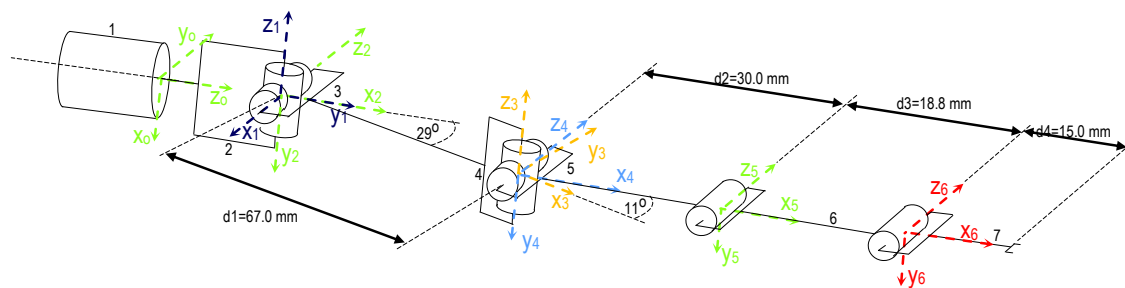


Fig. 3.15: Diagrama esquelético y dimensional del quinto dedo
Fuente: Propia

Tabla 3.4. Parámetros Denavit-Hartenberg para el quinto dedo

| Eslabón | θ_i ($^\circ$) | d_i (mm) | a_i (mm) | α_i ($^\circ$) |
|---------|----------------------------|---------------|---------------|----------------------------|
| 1 | θ_1 | 0 | 0.0 | -90 |
| 2 | θ_2 | -34 | 67.0 | -90 |
| 3 | θ_3 | 0 | 0.0 | 90 |
| 4 | θ_4 | 0 | 30.0 | 0 |
| 5 | θ_5 | 0 | 19.0 | 0 |
| 6 | θ_6 | 0 | 15.0 | 0 |

Elaboración: Alfonso Boada

Con las mismas equivalencias manejadas anteriormente para las funciones “seno” y “coseno” y los datos de la tabla 3.4, se obtienen para el quinto dedo las siguientes matrices de transformación:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C1 & 0 & -S1 & 0 \\ S1 & 0 & C1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C2 & 0 & -S2 & 0.67 C2 \\ S2 & 0 & C2 & 0.67 S2 \\ 0 & -1 & 0 & -.34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C3 & 0 & S3 & 0 \\ S3 & 0 & -C3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & 0.3 C4 \\ S4 & C4 & 0 & 0.3 S4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} C5 & -S5 & 0 & 0.19 C5 \\ S5 & C5 & 0 & 0.19 S5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} C6 & -S6 & 0 & 0.15 C6 \\ S6 & C6 & 0 & 0.15 S6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ecs. 3.46})$$

La matriz global de transformación T_5 para este dedo es:

$$T_5 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.47})$$

Donde:

$$R_{11} = C6\{C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]-S5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]\} - S6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]\} \quad (\text{Ec. 3.48})$$

$$R_{12} = -C6\{C5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]+S5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]\} - S6\{C5[C4(S1*S3+C1*C2*C3)-C1*S2*S4]-S5[S4(S1*S3+C1*C2*C3)+C1*C4*S2]\} \quad (\text{Ec. 3.49})$$

$$R_{13} = C1*C2*S3 - C3*S1 \quad (\text{Ec. 3.50})$$

$$R_{21} = S6\{C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]\} - C6\{C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]\} \quad (\text{Ec. 3.51})$$

$$R_{22} = C6\{C5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]+S5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]\} + S6\{C5[C4(C1*S3-C2*C3*S1)+S1*S2*S4]-S5[S4(C1*S3-C2*C3*S1)-C4*S1*S2]\} \quad (\text{Ec. 3.52})$$

$$R_{23} = C1*C3 + C2*S1*S3 \quad (\text{Ec. 3.53})$$

$$R_{31} = -C6[C5(C2*S4+C3*C4*S2) + S5(C2*C4 - C3*S2*S4)] - S6[C5(C2*C4 - C3*S2*S4) - S5(C2*S4 + C3*C4*S2)] \quad (\text{Ec. 3.54})$$

$$R_{32} = S6[C5(C2*S4 + C3*C4*S2) + S5(C2*C4 - C3*S2*S4)] - C6[C5(C2*C4 - C3*S2*S4) - S5(C2*S4 + C3*C4*S2)] \quad (\text{Ec. 3.55})$$

$$R_{33} = -S2*S3 \quad (\text{Ec. 3.56})$$

$$P_x = \{3^*C6\{C5\{C4\{S1^*S3+C1^*C2^*C3\}-C1^*S2^*S4\}-S5\{S4\{S1^*S3+C1^*C2^*C3\}+C1^*C4^*S2\}\}\}/20 - \\ \{3^*S6\{C5\{S4\{S1^*S3+C1^*C2^*C3\}+C1^*C4^*S2\}+S5\{C4\{S1^*S3+C1^*C2^*C3\}-C1^*S2^*S4\}\}\}/20 + \\ [3^*C4\{S1^*S3+C1^*C2^*C3\}]/10+\{19^*C5\{C4\{S1^*S3+C1^*C2^*C3\}-C1^*S2^*S4\}\}/100 - \\ \{19^*S5\{S4\{S1^*S3+C1^*C2^*C3\}+C1^*C4^*S2\}\}/100 + (67^*C1^*C2)/100 - (3^*C1^*S2^*S4)/10 + (17^*S1)/50$$

(Ec. 3.57)

$$P_y = \{3^*S6\{C5\{S4\{C1^*S3-C2^*C3^*S1\}-C4^*S1^*S2\}+S5\{C4\{C1^*S3-C2^*C3^*S1\}+S1^*S2^*S4\}\}\}/20 - \\ \{3^*C6\{C5\{C4\{C1^*S3-C2^*C3^*S1\}+S1^*S2^*S4\}-S5\{S4\{C1^*S3-C2^*C3^*S1\}-C4^*S1^*S2\}\}\}/20 - \\ [3^*C4^*(C1^*S3 - C2^*C3^*S1)]/10 - (17^*C1)/50 - \{19^*C5\{C4\{C1^*S3 - C2^*C3^*S1\} + S1^*S2^*S4\}\}/100 + \\ \{19^*S5\{S4\{C1^*S3-C2^*C3^*S1\}-C4^*S1^*S2\}\}/100 + (67^*C2^*S1)/100 - (3^*S1^*S2^*S4)/10$$

(Ec. 3.58)

$$P_z = - (67^*S2)/100 - [19^*C5\{C2^*S4 + C3^*C4^*S2\}]/100 - [19^*S5^*(C2^*C4 - C3^*S2^*S4)]/100 - \\ \{3^*C6\{C5\{C2^*S4+C3^*C4^*S2\}+S5\{C2^*C4-C3^*S2^*S4\}\}\}/20 - \\ \{3^*S6\{C5\{C2^*C4-C3^*S2^*S4\}-S5^*(C2^*S4 + C3^*C4^*S2)\}\}/20 - (3^*C2^*S4)/10 - (3^*C3^*C4^*S2)/10$$

(Ec. 3.59)

La programación Matlab para el quinto dedo se observa en la figura 3.16 y la pantalla de simulación en la 3.17.

```

Editor - C:\Users\apser\Documents\MATLAB\Simulacion_Menique.m
puma560.m  MatrizT_Menique.m  Simulacion_Medio.m  Simulacion_Anular.m  Simulacion_Menique.m
1  %SIMULACION DEDO MENIQUE
2  % Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
3  clear L
4  %           Alpha  a  Theta  d
5  L{1} = link([-pi/2  0  0      0  0], 'standard');
6  L{2} = link([-pi/2 .67  0     -.34 0], 'standard');
7  L{3} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
8  L{4} = link([0     .30  0      0  0], 'standard');
9  L{5} = link([0     .19  0      0  0], 'standard');
10 L{6} = link([0     .15  0      0  0], 'standard');
11
12 qz = [0 0 0 0 0 0];
13 qx = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
14 qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];
15
16 menique = robot(L, 'Menique', 'Unimation', 'params of 8/95');
17 clear L
18 menique.name = 'Menique';
19 menique.manuf = 'Unimation';
20 drivebot(menique);

```

Fig. 3.16: Programación MATLAB para simulación del quinto dedo
Fuente: Propia

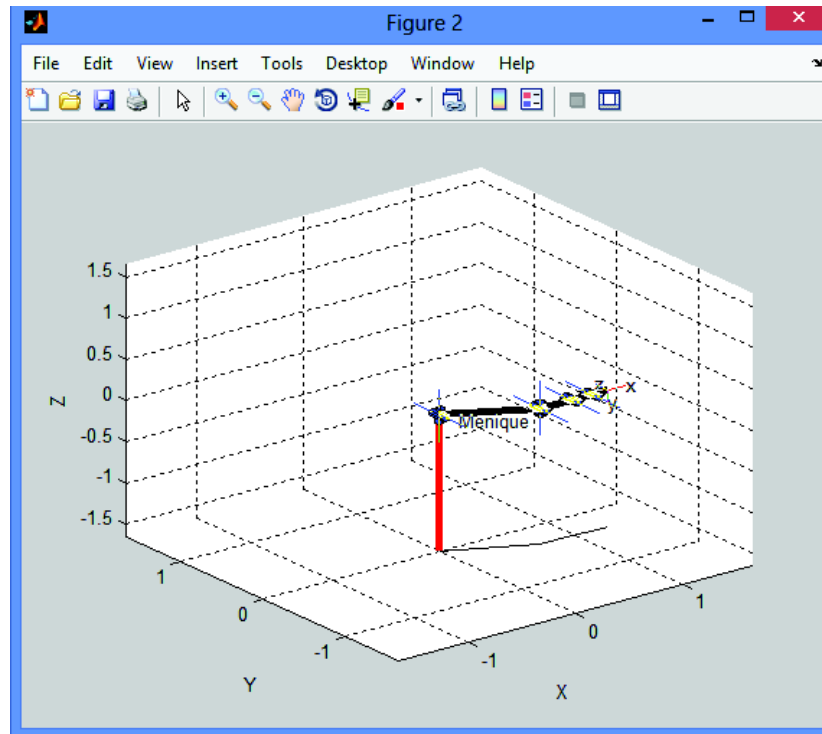


Fig. 3.17: Pantalla de simulación del quinto dedo
Fuente: Propia

3.3. SIMULACIÓN DEL PRIMER DEDO

El primer dedo (pulgár) tiene una movilidad diferente y una orientación opuesta a todos los demás, lo que confiere a la mano humana la capacidad de agarre. El procedimiento para la simulación de este dedo es esencialmente igual al seguido para los otros dedos. La configuración geométrica dimensional del dedo se representa en la figura 3.18 y los parámetros Denavit-Hartenberg para este mecanismo se indican en la tabla 3.5.

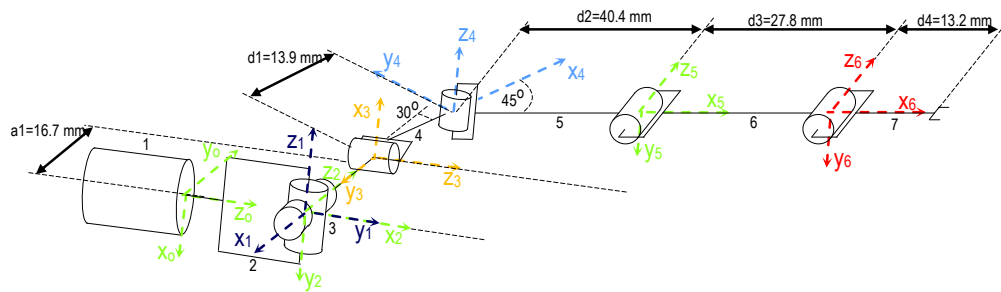


Fig. 3.18: Diagrama esquelético y dimensional del primer dedo
Fuente: Propia

Tabla 3.5. Parámetros Denavit-Hartenberg para el primer dedo

| Eslabón | θ_i ($^\circ$) | d_i (mm) | a_i (mm) | α_i ($^\circ$) |
|---------|----------------------------|---------------|---------------|----------------------------|
| 1 | θ_1 | 0 | 0 | 90 |
| 2 | θ_2 | 0 | 16.7 | 0 |
| 3 | θ_3 | 6.95 | 13.9 | 90 |
| 4 | θ_4 | 0 | 30.0 | -90 |
| 5 | θ_5 | 0 | 27.8 | 0 |
| 6 | θ_6 | 0 | 13.2 | 0 |

Elaboración: Alfonso Boada

Considerando, al igual que en los casos anteriores, las mismas equivalencias para las funciones “seno” y “coseno” y los datos de la tabla 3.5, se obtienen las siguientes matrices de transformación:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C1 & 0 & S1 & 0 \\ S1 & 0 & -C1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & 0.167 C2 \\ S2 & C2 & 0 & 0.167 S2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 A_3 &= \begin{bmatrix} C3 & 0 & S3 & 0.139 C3 \\ S3 & 0 & -C3 & 0.139 S3 \\ 0 & 1 & 0 & 0.139 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_4 &= \begin{bmatrix} C4 & 0 & -S4 & 0.3 C4 \\ S4 & 0 & C4 & 0.3 S4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_5 &= \begin{bmatrix} C5 & -S5 & 0 & 0.278 C5 \\ S5 & C5 & 0 & 0.278 S5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_6 &= \begin{bmatrix} C6 & -S6 & 0 & 0.132 C6 \\ S6 & C6 & 0 & 0.132 S6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ecs. 3.60})
 \end{aligned}$$

La matriz global de transformación T_1 para este dedo es:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6 \\
 T_1 &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.61})
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 R_{11} &= C6\{C5[S1*S4+C4(C1*C2*C3-C1*S2*S3)]-S5(C1*C2*S3+C1*C3*S2)\} - \\
 &S6\{C5(C1*C2*S3+C1*C3*S2)+S5[S1*S4+C4(C1*C2*C3-C1*S2*S3)]\} \quad (\text{Ec. 3.62})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{12} &= -S6\{C5[S1*S4+C4(C1*C2*C3-C1*S2*S3)]-S5(C1*C2*S3+C1*C3*S2)\} - \\
 &C6\{C5(C1*C2*S3+C1*C3*S2)+S5[S1*S4+C4(C1*C2*C3-C1*S2*S3)]\} \quad (\text{Ec. 3.63})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{13} &= C4*S1 - S4*(C1*C2*C3 - C1*S2*S3) \quad (\text{Ec. 3.64})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{21} &= C6\{C5[C4(C2*C3*S1-S1*S2*S3)-C1*S4] - S5(C2*S1*S3 + C3*S1*S2)\} - \\
 &S6\{C5(C2*S1*S3 + C3*S1*S2) + S5[C4(C2*C3*S1 - S1*S2*S3) - C1*S4]\} \quad (\text{Ec. 3.65})
 \end{aligned}$$

$$R_{22} = -C_6\{C_5(C_2^*S_1^*S_3 + C_3^*S_1^*S_2) + S_5[C_4(C_2^*C_3^*S_1 - S_1^*S_2^*S_3) - C_1^*S_4]\} - S_6\{C_5[C_4(C_2^*C_3^*S_1 - S_1^*S_2^*S_3) - C_1^*S_4] - S_5(C_2^*S_1^*S_3 + C_3^*S_1^*S_2)\} \quad (\text{Ec. 3.66})$$

$$R_{23} = -S_4(C_2^*C_3^*S_1 - S_1^*S_2^*S_3) - C_1^*C_4 \quad (\text{Ec. 3.67})$$

$$R_{31} = -C_6[S_5(S_2^*S_3 - C_2^*C_3) - C_4^*C_5(C_2^*S_3 + C_3^*S_2)] - S_6[C_5(S_2^*S_3 - C_2^*C_3) + C_4^*S_5(C_2^*S_3 + C_3^*S_2)] \quad (\text{Ec. 3.68})$$

$$R_{32} = S_6[(S_5^*(S_2^*S_3 - C_2^*C_3) - C_4^*C_5(C_2^*S_3 + C_3^*S_2))] - C_6[C_5(S_2^*S_3 - C_2^*C_3) + C_4^*S_5(C_2^*S_3 + C_3^*S_2)] \quad (\text{Ec. 3.69})$$

$$R_{33} = -S_4(C_2^*S_3 + C_3^*S_2) \quad (\text{Ec. 3.70})$$

$$P_x = -\{33^*S_6\{C_5(C_1^*C_2^*S_3 + C_1^*C_3^*S_2) + S_5[S_1^*S_4 + C_4(C_1^*C_2^*C_3 - C_1^*S_2^*S_3)]\}\}/250 + [3^*C_4(C_1^*C_2^*C_3 - C_1^*S_2^*S_3)]/10 + \{139^*C_5[S_1^*S_4 + C_4(C_1^*C_2^*C_3 - C_1^*S_2^*S_3)]\}/500 + \{33^*C_6\{C_5[S_1^*S_4 + C_4(C_1^*C_2^*C_3 - C_1^*S_2^*S_3)] - S_5^*(C_1^*C_2^*S_3 + C_1^*C_3^*S_2)\}\}/250 - [139^*S_5(C_1^*C_2^*S_3 + C_1^*C_3^*S_2)]/500 + (167^*C_1^*C_2)/1000 + (139^*C_1^*C_2^*C_3)/1000 - (139^*C_1^*S_2^*S_3)/1000 + (139^*S_1)/2000 + (3^*S_1^*S_4)/10 \quad (\text{Ec. 3.71})$$

$$P_y = \{33^*C_6\{C_5[C_4(C_2^*C_3^*S_1 - S_1^*S_2^*S_3) - C_1^*S_4] - S_5(C_2^*S_1^*S_3 + C_3^*S_1^*S_2)\}\}/250 - \{33^*S_6\{C_5(C_2^*S_1^*S_3 + C_3^*S_1^*S_2) + S_5[C_4(C_2^*C_3^*S_1 - S_1^*S_2^*S_3) - C_1^*S_4]\}\}/250 + \{139^*C_5[C_4(C_2^*C_3^*S_1 - S_1^*S_2^*S_3) - C_1^*S_4]\}/500 + [3^*C_4(C_2^*C_3^*S_1 - S_1^*S_2^*S_3)]/10 - [139^*S_5(C_2^*S_1^*S_3 + C_3^*S_1^*S_2)]/500 + (167^*C_2^*S_1)/1000 - (3^*C_1^*S_4)/10 + (139^*C_2^*C_3^*S_1)/1000 - (139^*S_1^*S_2^*S_3)/1000 - (139^*C_1)/2000 \quad (\text{Ec. 3.72})$$

$$P_z = (167^*S_2)/1000 - \{33^*C_6[S_5(S_2^*S_3 - C_2^*C_3) - C_4^*C_5(C_2^*S_3 + C_3^*S_2)]\}/250 - \{33^*S_6[C_5(S_2^*S_3 - C_2^*C_3) + C_4^*S_5(C_2^*S_3 + C_3^*S_2)]\}/250 + [3^*C_4(C_2^*S_3 + C_3^*S_2)]/10 + (139^*C_2^*S_3)/1000 + (139^*C_3^*S_2)/1000 - [139^*S_5(S_2^*S_3 - C_2^*C_3)]/500 + [139^*C_4^*C_5^*(C_2^*S_3 + C_3^*S_2)]/500 \quad (\text{Ec. 3.73})$$

La programación Matlab para el primer dedo se observa en la figura 3.19 y la pantalla de simulación en la 3.20.

```

Editor - C:\Users\apser\Documents\MATLAB\Simulacion_Pulgar.m
puma560.m x Simulacion_Anular.m x PruebaTrayectoria.m x Simulacion_Pulgar.m x MatrizT_Pulgar.m x
1 %SIMULACION DEDO PULGAR
2 % Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
3 clear L
4 %      Alpha  a  Theta  d
5 L{1} = link([pi/2  0  0  0  0], 'standard');
6 L{2} = link([0  .167  0  0  0], 'standard');
7 L{3} = link([pi/2  .139  0  .0695  0], 'standard');
8 L{4} = link([-pi/2  .30  0  0  0], 'standard');
9 L{5} = link([0  .278  0  0  0], 'standard');
10 L{6} = link([0  .132  0  0  0], 'standard');
11
12 qz = [0 0 0 0 0];
13 qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0];
14 qstretch = [0 0 -pi/2 0 0];
15
16 pulgar = robot(L, 'Pulgar', 'Unimation', 'params of 8/95');
17 clear L
18 pulgar.name = 'Pulgar';
19 pulgar.manuf = 'Unimation';
20 drivebot(pulgar);
21

```

Fig. 3.19: Programación MATLAB para simulación del primer dedo
Fuente: Propia

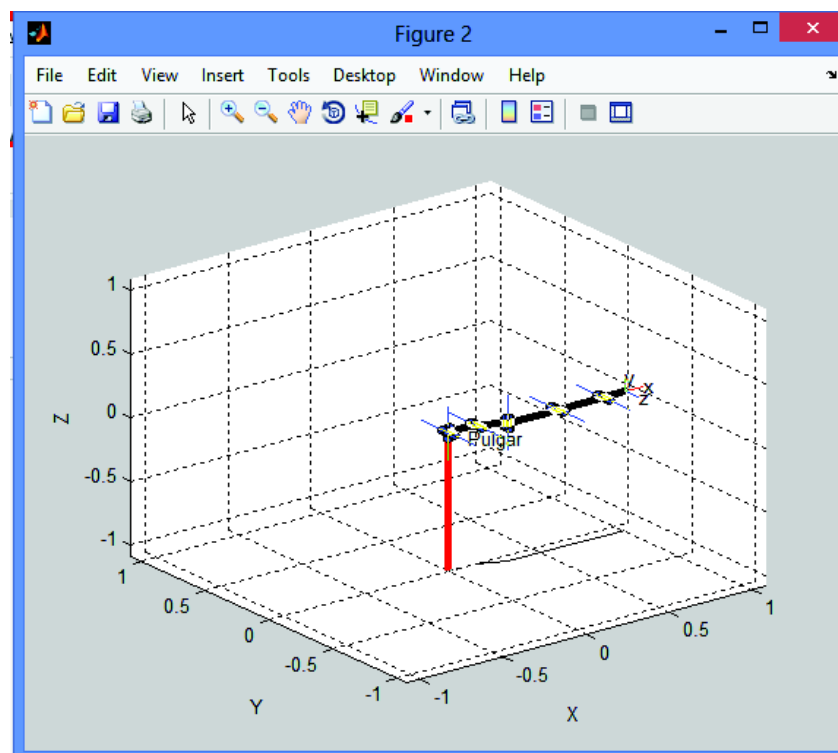


Fig. 3.20: Pantalla de simulación del primer dedo
Fuente: Propia

En esta última pantalla se obtiene el primer dedo con una orientación inicial alineada con los otros dedos, lo que ocurre debido a la forma en la que se han ingresado los parámetros Denavit-Hartenberg en el software. La configuración inicial real que debe tener este dedo se obtiene dando un ángulo inicial de $\pi/2$ rad a la articulación q_1 y de $\pi/4$ rad a la articulación q_4 , como se verá más adelante.

Lo realizado hasta el momento concluye la programación individual de cada dedo, resultados que debe validarse ya en el proceso propiamente dicho de simulación. En el capítulo 4 se procederá a validar los resultados obtenidos, así como enunciar las conclusiones y recomendaciones que arroja el presente trabajo.

Una vez que se ha concluido con la programación individual de cada dedo, se procede al ensamble de la mano, para lo que se establece el código de programación global que se encuentra en el anexo 1. La simulación del movimiento de la mano se realiza aplicando el comando “jtraj”, para el cual deben signarse en primer lugar los vectores “q” que determinan los puntos inicial y final de los giros que se da a cada articulación. El estado inicial de cada uno de los dedos de la mano se observa en la figura 3.21

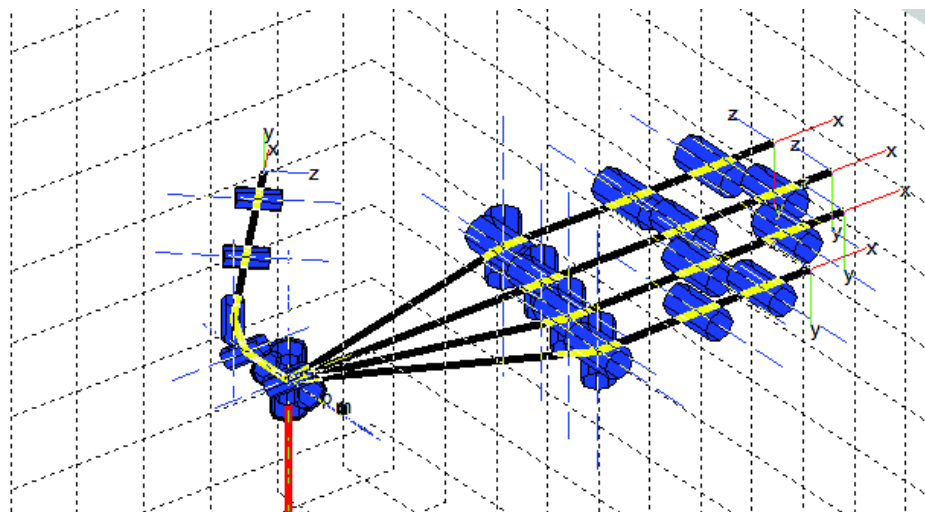


Fig. 3.21: Simulación de la mano completa
Fuente: Propia

La sintaxis del comando “jtraj” es la siguiente:

```
T=jtraj(q1,q2,25);
```

Donde: “T” es el nombre de la función de trayectoria que se genera en el software

“q1” y “q2” son los vectores inicial y final de desplazamientos angulares que se proporciona a cada articulación

25 es el número de pasos intermedios que se proporciona a cada articulación para la generación de la trayectoria. En el caso de este software definen la velocidad a la que se produce el movimiento. Si este valor aumenta, la velocidad disminuye.

Una vez que se definen los desplazamientos angulares, el comando “plot” permite ejecutar la simulación. La sintaxis de este comando es:

```
plot(pulgar,T3)
```

Donde: “pulgar” es el nombre del robot individual, en esta caso el nombre de cada dedo

“T3” es el nombre de la trayectoria definida mediante el comando “jtraj”

A manera de ejemplo, se procede a continuación a configurar una trayectoria que proporcione a la mano la forma de un puño cerrado. Para ello, se genera una trayectoria común, en la cual cada una de las articulaciones de los dedos segundo al quinto, gire un ángulo determinado. Para que el puño quede totalmente cerrado, el pulgar debe tener también una trayectoria definida. Los vectores “q” que permiten este movimiento son los siguientes:

Para los dedos índice, medio, anular y meñique:

```
q1=[0 0 0 0 0 0];
    %(posición angular inicial de cada articulación)
q2=[0 0 .1745 .5239 1.3963 .6981];
    %(posición angular final de cada articulación)
T=jtraj(q1,q2,25);
    %(definición de trayectoria)
```

Para el dedo pulgar:

```

q3=[1.5708 0 0 .7584 0 0];
    %(posición angular inicial de cada articulación del
    pulgar)
q4=[1.5784 .0873 -.8981 1.6581 -.6981 .5236];
    %(posición angular final de cada articulación del pulgar)
T3=jtraj(q3,q4,25);
    %(definición de trayectoria)

```

Simulación del movimiento de la mano:

```

plot(indice,T);
plot(medio,T);
plot(anular,T);
plot(menique,T);
plot(pulgar,T3);

```

En la figura 3.22 se observan varias vistas de la configuración final alcanzada por la mano para las trayectorias definidas:

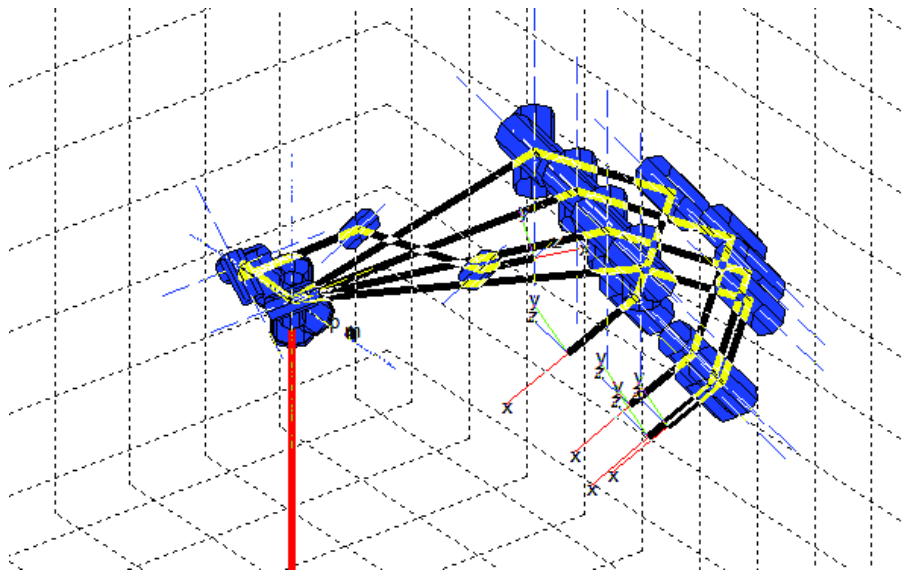


Fig. 3.22: Vistas de la posición alcanzada por la mano luego de la simulación Fuente: Propia

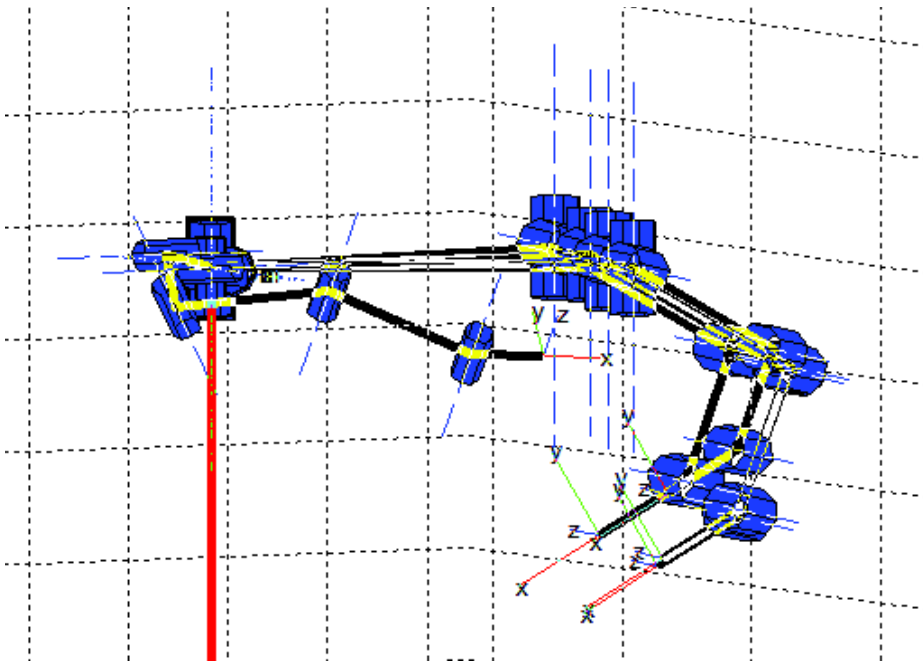
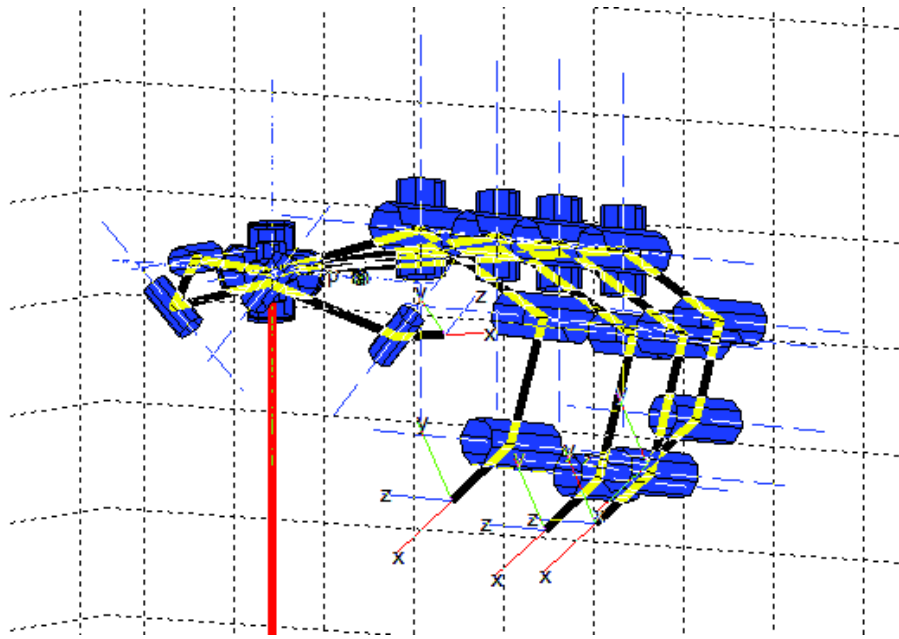


Fig. 3.22: Vistas de la posición alcanzada por la mano luego de la simulación
Fuente: Propia

CAPÍTULO 4

RESULTADOS FINALES

4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO

El trabajo realizado hasta el momento genera como resultado un modelo cinemático independiente para cada uno de los dedos que conforman la mano humana. Luego de realizarse el análisis en el capítulo 3, en el presente se validará el proceso de simulación mediante la aplicación de las ecuaciones obtenidas teóricamente para diversos valores de ángulo girado por cada una de las articulaciones en cada dedo, a fin de comprobar las coordenadas de la posición final obtenidas en la simulación.

Debe para ello, aclararse lo siguiente: en el diseño geométrico se estableció una única estructura rígida como carpo, unida a 4 estructuras metacarpianas. El carpo se une al antebrazo mediante una junta de cruceta que proporciona dos grados de libertad. A su vez, el metacarpo se une a la primera falange de cada dedo mediante otra cruceta, donde se producen otros dos grados de libertad adicionales. En definitiva, el carpo y el metacarpo forman una sola estructura rígida, individual para cada dedo, por lo que en la simulación se ha tomado esta estructura como un único eslabón que va desde una cruceta a la otra. La orientación y longitud de este único eslabón son los valores que se han ingresado en Matlab para la simulación.

Con esta explicación, a continuación se procede a validar cada uno de los cinco mecanismos que conforman los dedos de la mano robótica. Para cada uno de los dedos desde el segundo al quinto, las variables de articulación son las siguientes:

θ_1 es el ángulo que gira la cruceta de la muñeca alrededor de un eje vertical (Yaw), cuyos valores varían entre -20° y 20° (-0.349 rad y $0,349$ rad)³⁰(Fig. 4.a).

θ_2 es el ángulo que gira la cruceta de la muñeca alrededor de un eje horizontal (Pitch), cuyos valores varían entre -70° y 80° (-1.222 rad y 1.396 rad)³¹(Fig. 4.b).

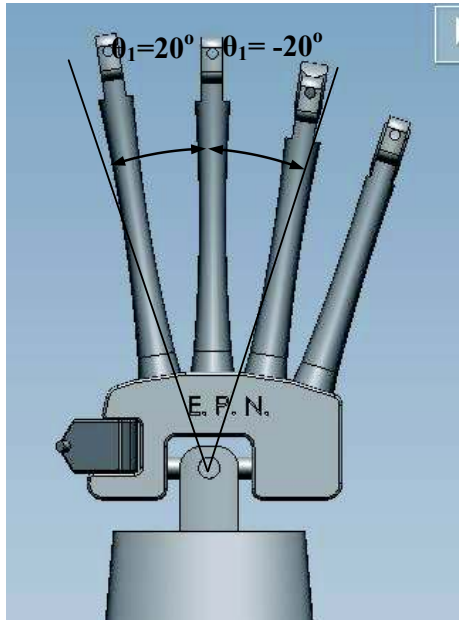


Fig. 4.a: Determinación del ángulo θ_1
Fuente: Propia

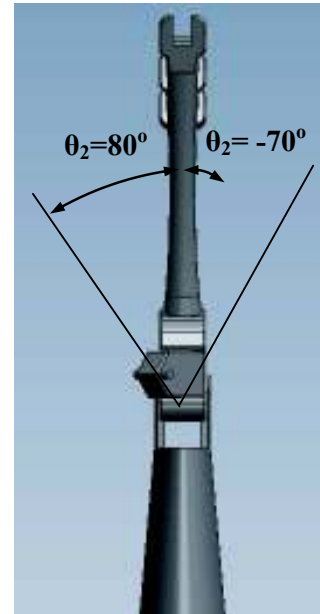


Fig. 4.b: Determinación del ángulo θ_2
Fuente: Propia

θ_3 es el ángulo que gira la cruceta del metacarpo alrededor del eje vertical, cuyos valores absolutos varían entre -20° y 20° (-0.349 rad y 0.349 rad) (Fig. 4.c).

θ_4 es el ángulo que gira la cruceta del metacarpo alrededor del eje horizontal, cuyos valores varían entre -90° y 30° (-1.571 rad y 0.524 rad) (Fig. 4.d).

³⁰ Garrett J.W. (1971). "The adult human hand: some anthropometric and biomechanical considerations." Recuperado en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5550584>

³¹ Garrett J.W. (1971). "The adult human hand: some anthropometric and biomechanical considerations." Recuperado en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5550584>

θ_5 es el ángulo que gira la articulación revoluta formada entre la falange proximal y la media en el plano horizontal, cuyos valores varían entre -100° y 0° (-1.745 rad y 0 rad)³² (Fig. 4.e).

θ_6 es el ángulo que gira la articulación revoluta formada entre la falange media y la distal, cuyos valores varían entre -90° y 0° (-1.571 rad y 0 rad)³³ (Fig. 4.f).

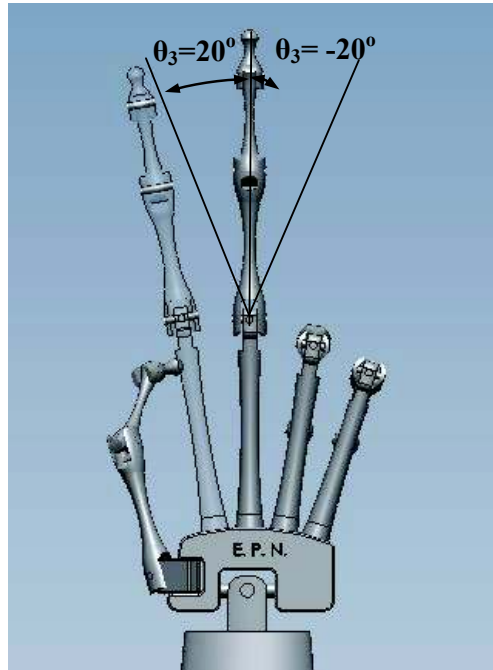


Fig. 4.a: Determinación del ángulo θ_3
Fuente: Propia

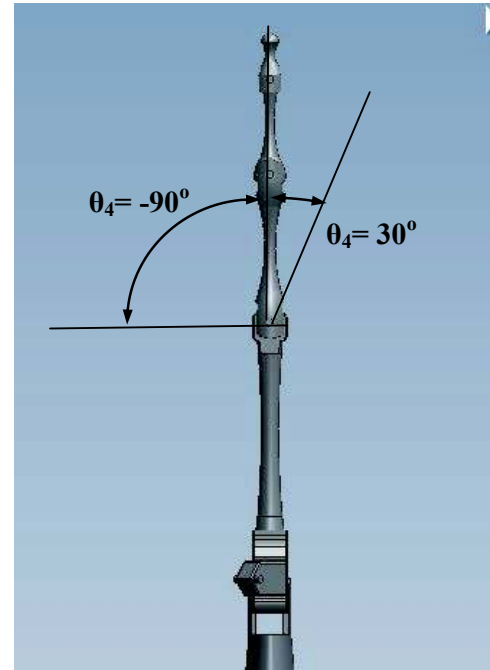


Fig. 4.d: Determinación del ángulo θ_4
Fuente: Propia

³² Garrett J.W. (1971). "The adult human hand: some anthropometric and biomechanical considerations." Recuperado en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5550584>

³³ Garrett J.W. (1971). "The adult human hand: some anthropometric and biomechanical considerations." Recuperado en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5550584>

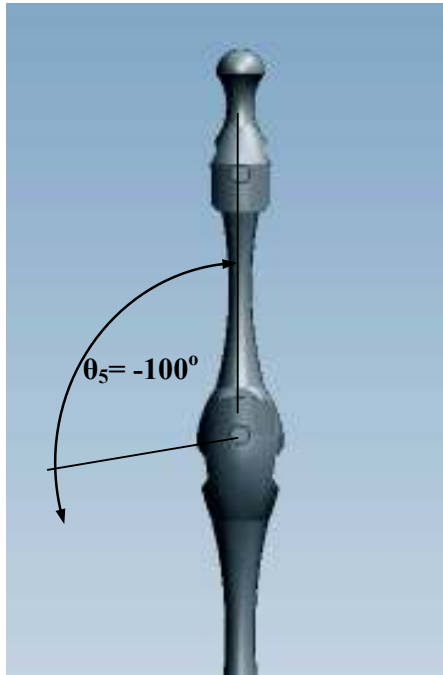


Fig. 4.e: Determinación del ángulo θ_5
Fuente: Propia

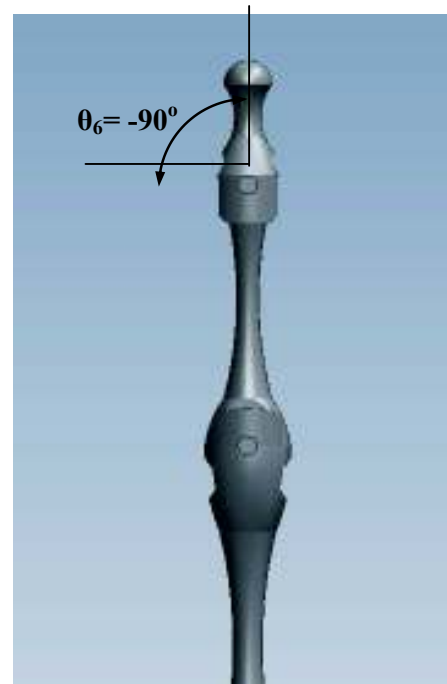


Fig. 4.f: Determinación del ángulo θ_6
Fuente: Propia

Para el primer dedo la movilidad difiere de los otros. En primer lugar, este dedo (pulgár) no tiene tres falanges sino solamente dos: la proximal y la distal. En segundo lugar, el metacarpiano posee dos grados de libertad cuyos centros de rotación no se encuentran en el mismo lugar geométrico, por lo que su movilidad no puede ser reemplazada por una cruceta, sino por dos revolutas normales entre sí y desfasadas cierta distancia. En tercer lugar, la cruceta que representa la movilidad del carpo tiene para este dedo idéntica movilidad que para los otros. Para el primer dedo se consideran los siguientes desplazamientos angulares³⁴:

θ_1 es el ángulo que gira la cruceta de la muñeca alrededor de un eje vertical (Yaw), cuyos valores varían entre -20° y 20° (-0.349 rad y $0,349$ rad). A estos valores se debe añadir el ángulo de 90° que determina su posición angular inicial.

θ_2 es el ángulo que gira la cruceta de la muñeca alrededor de un eje horizontal (Pitch), cuyos valores varían entre -70° y 80° (-1.222 rad y 1.396 rad).

³⁴ Garrett J.W. (1971). "The adult human hand: some anthropometric and biomechanical considerations." Recuperado en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5550584>

θ_3 es el ángulo que gira la primera revoluta del metacarpiano alrededor del eje horizontal, cuyos valores varían entre 0° y 70° (0 rad y 1.222 rad).

θ_4 es el ángulo que gira la segunda revoluta del metacarpiano alrededor del eje vertical, cuyos valores varían entre 0° y 90° (0 rad y 1.571 rad). A este ángulo debe añadirse uno de 45° debido a la posición inicial del metacarpiano.

θ_5 es el ángulo que gira la articulación revoluta formada entre el metacarpo y la falange proximal, cuyos valores varían entre 0° y 90° (0 rad y 1.571 rad).

θ_6 es el ángulo que gira la articulación revoluta formada entre la falange proximal y la distal, cuyos valores varían entre 0° y 90° (0 rad y 1.571 rad).

Adicionalmente debe tomarse en cuenta que cada uno de los dedos tiene un posicionamiento angular inicial con respecto a la muñeca debido a la disposición natural distendida de la mano, lo que ocasiona que sea necesario hacer un ajuste en los valores de ángulo permitidos para cada dedo. Con estos antecedentes, en la tabla 4.1 se presentan los rangos de valores de ángulos (en grados) permitidos para ser ingresados en cada una de las articulaciones de cada dedo.

Tabla 4.1. Valores permitidos de ángulos de articulaciones

| θ_i ($^\circ$) | Índice | | Medio | | Anular | | Meñique | | Pulgar | |
|----------------------------|--------|-----|-------|-----|--------|-----|---------|-----|--------|-----|
| | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx |
| θ_1 | -20 | 20 | -20 | 20 | -20 | 20 | -20 | 20 | -20 | 20 |
| θ_2 | -70 | 80 | -70 | 80 | -70 | 80 | -70 | 80 | -70 | 80 |
| θ_3 | -20 | 20 | -20 | 20 | -20 | 20 | -20 | 20 | 0 | 70 |
| θ_4 | -90 | 30 | -90 | 30 | -90 | 30 | -90 | 30 | 0 | 90 |
| θ_5 | -100 | 0 | -100 | 0 | -100 | 0 | -100 | 0 | 0 | 90 |
| θ_6 | -90 | 0 | -90 | 0 | -90 | 0 | -90 | 0 | 0 | 90 |

Elaboración: Alfonso Boada

Bajo estos parámetros, se procede a validar la simulación de cada uno de los dedos con la programación realizada en el simulador de Matlab y los resultados teóricos obtenidos para la cinemática directa. El proceso consiste en proporcionar en la

pantalla de simulación varios valores de ángulo para cada articulación de cada dedo y correr la simulación. A continuación se ingresa dichos ángulos en el programa de cálculo de matrices elaborado en Matlab y se verifica que las coordenadas obtenidas en la simulación sean esencialmente iguales a las calculadas. Si esto es así, el modelo quedará validado, de lo contrario habrá que revisarlo y ajustarlo. A efectos demostrativos, en el presente texto se procede de la siguiente manera: Se asignan arbitrariamente los valores de ángulos para cada una de las articulaciones de cada dedo signados en la tabla 4.2; luego se procede a calcular el valor que debe ser ingresado tanto en la pantalla de simulación como en el programa de cálculo, tomando en cuenta las desalineaciones angulares iniciales, para lo cual se utiliza la tabla dinámica desarrollada en la hoja electrónica de cálculo que se indica en la tabla 4.3. Por último se verifica la concordancia entre las coordenadas finales obtenidas en la pantalla de simulación y en el cálculo matricial. Debe tomarse en cuenta que, al ser el carpo un solo elemento común, los valores ingresados de θ_1 y θ_2 deben ser iguales para todos los dedos.

Tabla 4.2. Desplazamientos angulares asignados a las articulaciones

| θ_i ($^\circ$) | Índice | Medio | Anular | Meñique | Pulgar |
|----------------------------|--------|-------|--------|---------|--------|
| θ_1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| θ_2 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| θ_3 | 10 | 5 | -5 | -10 | 40 |
| θ_4 | -40 | -30 | 10 | 20 | 50 |
| θ_5 | -80 | -70 | -50 | -40 | 40 |
| θ_6 | -40 | -40 | -30 | -30 | 30 |

Elaboración: Alfonso Boada

4.1.1. VALIDACIÓN DEL DEDO ÍNDICE

Los valores de desplazamiento angular (en radianes) obtenidos en la tabla dinámica 4.3 se ingresan en la pantalla de simulación (figura 4.1) y en el programa desarrollado en Matlab (figura 4.2). Se verifica que las coordenadas de la pantalla de simulación coinciden con las coordenadas de cálculo, con un error máximo de 7% para la coordenada “z”, pero menor que 1% para las otras dos, con lo cual el modelo queda validado para este dedo.

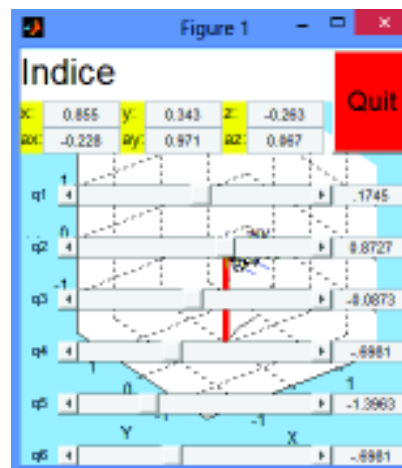


Fig. 4.1: Pantalla de simulación del dedo índice para validación
Fuente: Propia

```

Editor - C:\Users\vapser\Documents\MATLAB\Validation_Indice.m
Simulacion_Pulgar.m  Matriz_Pulgar.m  Simulacion_Indice.m  Simulacion_Mediano.m  Simulacion_Menqu
17 - C4=.77184--.64
18 - C6=.17186--.98
19 - C6=.77186--.64
20
21 - A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1/S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1/0 SA1 CA1 D1/0 0 0 1]
22 - A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2/S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2/0 SA2 CA2 D2/0 0 0 1]
23 - A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3/S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3/0 SA3 CA3 D3/0 0 0 1]
24 - A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4/S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4/0 SA4 CA4 D4/0 0 0 1]
25 - A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5/S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5/0 SA5 CA5 D5/0 0 0 1]
26 - A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6/S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6/0 SA6 CA6 D6/0 0 0 1]
27
28 - T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
29

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

T1 =

-0.3100    0.9178   -0.2264    0.8534
-0.1387    0.1908    0.9702    0.3403
 0.9419    0.3309    0.0693   -0.2841
         0         0         0         1.0000

>> Simulacion_Indice
fx >>
<

```

Fig. 4.2: Cálculo de coordenadas finales del dedo índice para validación
Fuente: Propia

4.1.2. VALIDACIÓN DEL DEDO MEDIO

Con los desplazamientos angulares (en radianes) obtenidos en la tabla dinámica 4.3 se realiza el mismo proceso indicado en 4.1.1. La pantalla de simulación se indica en la figura 4.3 y los valores calculados en la 4.4. Las coordenadas de la pantalla de simulación coinciden con las coordenadas de cálculo, con un error de 3.2% para la coordenada “z”, 2,3% para la “y” y 0.3% para la “x”.

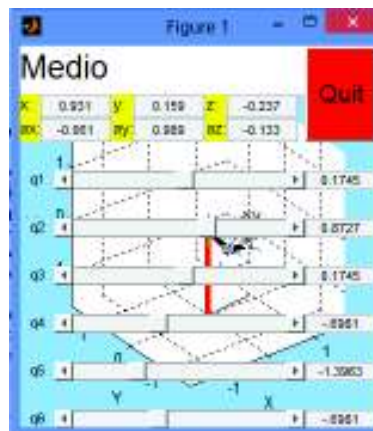


Fig. 4.3: Pantalla de simulación del dedo medio para validación
Fuente: Propia

```

Editor - C:\Users\apser\Documents\MATLAB\Validacion_Medio.m
Matriz_Pulgarm  x Simulacion_Indice.m  x Simulacion_Medio.m  x Simulacion_Menique.m  x Val
18 - C4=.77;S4=-.64
19 - C5=.17;S5=-.98
20 - C6=.77;S6=-.64
21
22 - A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
23 - A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
24 - A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
25 - A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
26 - A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
27 - A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]
28
29 - T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
30

Command Window
New to MATLAB! Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

T1 =

-0.9396    0.9288    -0.0600    0.9278
 0.1015    0.1015    0.9789    0.1554
 0.9275    0.9362    -0.1309    -0.2448
         0         0         0         1.0000

>> Simulacion_Medio
fr >>

```

Fig. 4.4: Cálculo de coordenadas finales del dedo medio para validación
Fuente: Propia

4.1.3. VALIDACIÓN DEL DEDO ANULAR

Ingresándose los desplazamientos angulares obtenidos en la tabla 4.3 en la pantalla de simulación (figura 4.5) y en el programa de Matlab (figura 4.6), se verifica que las coordenadas de la pantalla de simulación coinciden con las coordenadas de cálculo, con un error de 0,8% para la coordenada “x”, 9.4% para la “y” y 0.18% para la “z”.

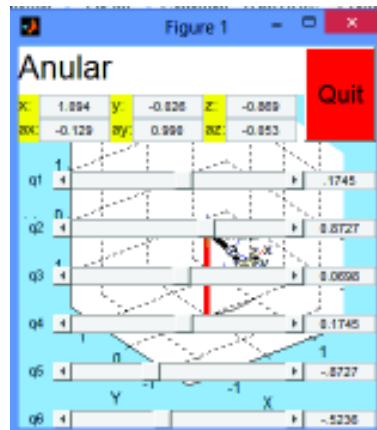


Fig. 4.5: Pantalla de simulación del dedo anular para validación
Fuente: Propia

```

Editor - C:\Users\apser\Documents\MATLAB\Validacion_Anular.m
Validacion_Anular.m  Simulacion_Anular.m
12 - D5=0; a5=.267; CA5=1; SA5=0
13 - D6=0; a6=.17; CA6=1; SA6=0
14
15 - C1=.98; S1=.17
16 - C2=.64; S2=.77
17 - C3=1; S3=0.07
18 - C4=.98; S4=.17
19 - C5=.64; S5=-.77
20 - C6=.87; S6=-.5
21
22 - A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
23 - A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
24 - A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]

Command Window
New to MATLAB! Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

T1 =
    0.9252    0.9473   -0.1261    1.0852
    0.1367   -0.0062    0.9876   -0.0287
    0.3430   -0.9999   -0.0639   -0.8706
         0         0         0         1.0000
  
```

Fig. 4.6: Cálculo de coordenadas finales del dedo anular para validación
Fuente: Propia

4.1.4. VALIDACIÓN DEL DEDO MEÑIQUE

En la figura 4.7 se observa la pantalla de simulación y en la 4.8 el programa de Matlab para este dedo, verificándose que las coordenadas de la pantalla de simulación coinciden con las coordenadas de cálculo, con un error de 0.8% para la coordenadas “x”, 0.6% para la “y” y 0.65% para la “z”.

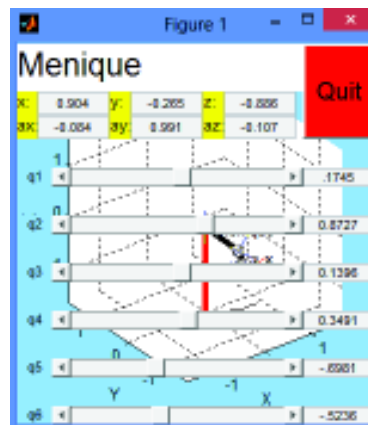


Fig. 4.7: Pantalla de simulación del dedo meñique para validación
Fuente: Propia

```

Editor - C:\Users\apser\Documents\MATLAB\Validation_Menique.m
puma500m  Validation_Anularm  Simulacion_Anularm  Validation_Menique.m  Simulacion_M
19  C5=.77;S5=-.64
20  C6=.87;S6=-.5
21
22
23  A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
24  A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
25  A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
26  A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
27  A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
28  A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]
29
30  T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
31
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

T1 =
    0.9968    0.0042   -0.0805    0.8964
    0.0812   -0.1076    0.9854   -0.2666
   -0.0044   -0.9996   -0.1078   -0.8918
         0         0         0         1.0000

```

Fig. 4.8: Cálculo de coordenadas finales del dedo meñique para validación
Fuente: Propia

4.1.5. VALIDACIÓN DEL DEDO PULGAR

La figura 4.9 muestra la pantalla de simulación y la 4.10 el programa de Matlab para este dedo, verificándose que las coordenadas de la pantalla de simulación coinciden con las coordenadas de cálculo, con un error de ,08% para la coordenada “x”, 1.5% para la “y” y 0.6% para la “z”.



Fig. 4.9: Pantalla de simulación del dedo pulgar para validación
Fuente: Propia

```

Editor - C:\Users\apser\Documents\MATLAB\Validation_Pulgar.m
+! puma500.m Validation_Anularm Simulacion_Anularm Validation_Meniquem Simulacion_Men
13 - D6=0.166; S2=C2&6=1;S&6=0
14
15 - C1=-.17;S1=.98
16 - C2=-.64;S2=.77
17 - C3=-.77;S3=0.64
18 - C4=-.09;S4=1
19 - C5=-.77;S5=-.64
20 - C6=-.87;S6=-.5
21
22 - A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1/S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1/0 SA1 CA1 D1/0 0 0 1]
23 - A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2/S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2/0 SA2 CA2 D2/0 0 0 1]
24 - A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3/S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3/0 SA3 CA3 D3/0 0 0 1]
25 - A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4/S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4/0 SA4 CA4 D4/0 0 0 1]

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.

T1 =
    0.5084    -0.8638    -0.0882     0.6505
   -0.8658    -0.5039    -0.0153    -0.0851
   -0.0816     0.0850    -1.0025     0.2174
         0         0         0     1.0000
  
```

Fig. 4.10: Cálculo de coordenadas finales del dedo pulgar para validación
Fuente: Propia

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Validado el proceso de simulación, se procederá a continuación a analizar el comportamiento del modelo bajo diferentes condiciones de entrada. Para ello, se considerará lo siguiente:

La posición del extremo de cada dedo se ha calculado en términos de tres coordenadas rectangulares utilizando un único sistema de referencia para todos los dedos.

Se ha determinado que cada una de las coordenadas de posición final de cada dedo (un total de 15 coordenadas) está expresada como una función de seis variables independientes, mismas que corresponden a los desplazamientos angulares que sufre cada falange en la mano. Estas expresiones vienen dadas por las ecuaciones 3.15, 3.16 y 3.17 (pág. 55) para el dedo índice; 3.29, 3.30 y 3.31 (pág. 61) para el dedo medio, 3.43, 3.44 y 3.45 (pág. 65) para el anular; 3.57, 3.58 y 3.59 (pág. 70) para el dedo meñique; y 3.71, 3.72 y 3.73 (pág. 74) para el dedo pulgar. Dichas expresiones son de la forma:

$$x = f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$$

$$y = f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$$

$$z = f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$$

Lo cual complica un análisis gráfico. En consecuencia, se procede a realizar un análisis numérico, bajo las siguientes consideraciones:

1. Para cada dedo y dentro de él para cada articulación existe un rango de valores permitidos de desplazamiento angular de cada falange que viene determinado por la anatomía propia de la mano y que se encuentra especificado en la tabla 4.1 (pág. 84).
2. Cada uno de los rangos arriba mencionados se divide en cinco intervalos regulares de manera que se obtengan, para cada articulación de cada dedo, un total de 5 valores equiangulares de las variables independientes. Como los

rangos permitidos son diferentes, los valores de ángulos permitidos son también diferentes entre sí.

3. Los valores de las variables así calculados se ingresan en la herramienta Excel de transformación de grados a radianes, que no sólo hace la conversión de unidades sino que además calcula los valores del ángulo que debe ser ingresado al software, tomando en cuenta los ajustes que, en virtud de la geometría del dispositivo, es necesario hacer en algunos casos. Además la herramienta arroja el valor de los cosenos y senos que deben ingresarse al software Matlab para el cálculo de la posición.
4. Toda la información así generada, para cinco valores de ángulo en cada articulación de cada dedo, se utiliza para el cálculo de la posición en el software Matlab y también para las pantallas de simulación, las que entregan el valor “medido” de cada coordenada de posición. El resultado de este cálculo se indica en la tabla 4.4.

Dicha tabla contiene los valores de la variable de articulación para cinco posiciones diferentes (signados con el símbolo “Q”) para cada dedo. Estos valores son ingresados al programa desarrollado en Matlab, con lo que se obtiene la fila de valores “calculados”. Los desplazamientos angulares también se ingresan en las pantallas de simulación de cada dedo, con lo que se obtiene la fila de valores “medidos”. El comparar ambos valores se obtiene la fila “error”, con la que se evaluará el comportamiento del modelo.

De la tabla obtenida se encuentra que cada medición arroja un error diferente, lo cual indica que el modelo efectivamente hace una diferenciación entre el valor medido y el calculado. El valor medido se obtiene directamente de mediciones de posición hechas por el software, en cambio el valor calculado se obtiene de reemplazar valores de la variable de articulación en las ecuaciones cinemáticas encontradas.

Tabla 4.4. Resultados comparativos entre valores Calculados y Medidos

| | INDICE | | | | | | MEDIO | | | | | | ANULAR | | | | | | MEÑIQUE | | | | | | PULGAR | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|----|----|
| | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 |
| Q1 (grados) | 0,088 | 0,331 | 1,092 | 1,219 | -0,19 | 0,063 | 0,047 | 0,026 | 0,005 | 0,004 | 0,037 | 0,083 | 0,022 | 0,002 | 9E-04 | 0,047 | 0,08 | 0,006 | 0,007 | 0,016 | 0,013 | 0,001 | 0,632 | 0,758 | 0,566 | 0,393 | 0,221 | 0,633 | 0,748 | 0,567 | 0,385 | 0,22 | | | |
| Q2 (grados) | 0,091 | 0,005 | 0,008 | 0,01 | 0,063 | 0,01 | 0,042 | 0,067 | 0,258 | 0,472 | -0,05 | -0,24 | -0,23 | -0,22 | -0,21 | -0,45 | -0,39 | -0,41 | -0,34 | -0,25 | -0,54 | 0,064 | 0,064 | 0,442 | 0,062 | -0,16 | -0,06 | 0,064 | 0,438 | 0,061 | -0,14 | -0,05 | | | |
| Q3 (grados) | 0,043 | 0,071 | 0,26 | 0,467 | -0,04 | -0,04 | 0,043 | 0,071 | 0,26 | 0,467 | -0,04 | -0,07 | -0,07 | -0,07 | -0,07 | -0,59 | -0,36 | -0,38 | -0,39 | -0,27 | -0,59 | 0,064 | 0,064 | 0,438 | 0,061 | -0,14 | -0,05 | 0,064 | 0,438 | 0,061 | -0,14 | -0,05 | | | |
| Q4 (grados) | 0,024 | 0,066 | 0,006 | 0,011 | 0,08 | 0,019 | 0,019 | 0,025 | 0 | 0,01 | 0 | 0,059 | 0,109 | 0,019 | 0,027 | 0,085 | 0,075 | 0,054 | 0,159 | 0,071 | 0,096 | 0,002 | 0,002 | 0,01 | 0,015 | 0,115 | 0,018 | 0,002 | 0,01 | 0,015 | 0,115 | 0,018 | | | |
| Q5 (grados) | 0,633 | 0,711 | 0,493 | -0,85 | -1,54 | -1,52 | 0,573 | 0,756 | 0,528 | -0,86 | -1,52 | 0,521 | 0,691 | 0,508 | -0,8 | -1,43 | 0,528 | 0,579 | 0,382 | -0,69 | -1,23 | -0,76 | 0,003 | 0,356 | 0,101 | -0,07 | -0,76 | 0,003 | 0,356 | 0,101 | -0,07 | | | | |
| Q6 (grados) | 0,64 | 0,717 | 0,482 | -0,85 | -1,52 | -1,52 | 0,574 | 0,757 | 0,53 | -0,87 | -1,52 | 0,514 | 0,69 | 0,51 | -0,79 | -1,38 | 0,52 | 0,579 | 0,384 | -0,66 | -1,14 | -0,76 | 0,004 | 0,359 | 0,103 | -0,07 | -0,76 | 0,004 | 0,359 | 0,103 | -0,07 | | | | |
| Medido | 0,011 | 0,008 | 0,023 | 0,011 | 0,01 | 0,002 | 7E-04 | 0,003 | 0,006 | 0,003 | 0,014 | 0,001 | 0,004 | 0,012 | 0,038 | 0,016 | 5E-04 | 0,005 | 0,05 | 0,07 | 0,07 | 0,003 | 0,003 | 0,267 | 0,007 | 0,02 | 0,009 | 0,003 | 0,267 | 0,007 | 0,02 | 0,009 | | | |
| Calculado | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Error | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Elaboración: Alfonso Boda

De la tabla 4.4 se calcula el error promedio que entrega el modelo para cada dedo y cada coordenada, lo que se indica en la tabla 4.5

Tabla 4.5. Error promedio

| | Indice | Medio | Anular | Meñique | Pulgar | TOTAL |
|-------|--------|-------|--------|---------|--------|-------|
| X | 3,55% | 2,36% | 3,1% | 2,42% | 0,8% | 2,45% |
| Y | 3,74% | 1,1% | 6,0% | 9,11% | 3,19% | 6,84% |
| Z | 1,26% | 0,31% | 1,41% | 2,82% | 6,12% | 2,38% |
| TOTAL | 2,85% | 2,81% | 3,5% | 4,78% | 3,37% | |

Elaboración: Alfonso Boada

Del examen de estos resultados se infiere lo siguiente:

La coordenada “Y” presenta el menor grado de exactitud, en cambio la “Z” es la más exacta. A su vez, el dedo medio presenta el mayor grado de exactitud y el meñique el menor.

Estos resultados indican que si bien el margen de error en general es bajo, y aunque el modelo se generó siguiendo la fundamentación teórica correspondiente, el mismo es susceptible de ser mejorado utilizando posiblemente otras herramientas o proporcionando mayor nivel de exactitud en los cálculos. Otro factor incidente pueden ser las singularidades puntuales que podrían presentar las ecuaciones cinemáticas encontradas. Sin embargo, puede decirse que este modelo proporciona buenos resultados en cuanto a la exactitud y a futuro puede desarrollarse más profundamente para dar lugar a las siguientes etapas de desarrollo, como son la determinación de la cinemática inversa y de la dinámica. Un trabajo ulterior también debe considerar un análisis económico que permita determinar la viabilidad financiera y de marketing para propender a su distribución a nivel nacional y posiblemente regional.

4.3. CONCLUSIONES

Finalizado el presente trabajo y una vez validados los resultados teóricos planteados inicialmente, se concluye lo siguiente:

Se ha cumplido con el objetivo propuesto al inicio de este trabajo, de desarrollar el diseño geométrico del dispositivo, simularlo y validarlo, dando con ello un primer paso en el desarrollo de este tipo de elementos que sin duda contribuyen a la transformación de la matriz productiva del Estado Ecuatoriano.

Se ha conseguido formular exitosamente los códigos de programación en Matlab para el análisis de la cinemática directa del dispositivo robótico de prótesis de mano humana, así como los cálculos teóricos necesarios para la determinación de la posición final de cada dedo cuando sobre las distintas articulaciones (incluyendo la muñeca) se efectúe cualquier giro.

Si bien se demostró la plena validez del método DenavitHartenberg estándar en la formulación teórica de la cinemática directa, se evidenció una pequeña desviación en los resultados obtenidos en la simulación. Este problema puede deberse a inexactitudes de orden matemático en cuanto a cifras significativas manejadas por el software o a falta de exactitud del algoritmo D-H. En todo caso, este inconveniente debe ser superado en trabajos posteriores, puesto que un dispositivo que pretenda sustituir a un miembro anatómico como una mano, necesariamente debe procurar una mayor precisión en cuanto a su posicionamiento. Adicionalmente, debe tomarse en cuenta que el alto grado de movilidad que presenta el dispositivo implica por sí solo un alto gasto computacional, el cual podría disminuirse si se realiza un estudio cinemático desde el punto de vista de lógica difusa, por ejemplo.

Por otro lado, dada la altísima complejidad de la movilidad real de la mano humana, fue menester realizar muchas simplificaciones al respecto, puesto que la herramienta tecnológica utilizada únicamente permite incorporar robots con seis grados de libertad. Por ejemplo, se observa que el carpo real está formado por 8 huesos, cuya funcionalidad principal es precisamente aumentar la movilidad de la mano, y que en este trabajo tuvo que ser sustituido por un solo eslabón con características de sólido rígido. Otro ejemplo son las articulaciones de los dedos, que en realidad presentan tres grados de libertad cada una, y en el presente trabajo únicamente se dotó a cada una de ellas de un grado de libertad. Estas simplificaciones, que se ha hecho en todas las articulaciones, pueden haber influido también en la exactitud del modelo.

El planteamiento teórico utilizado en el presente trabajo es adecuado y correcto, puesto que los resultados fueron exitosamente validados. Pese a la aparente inexactitud, los resultados obtenidos han sido satisfactorios y se ha logrado visualizar el comportamiento correcto de cada uno de los dedos habiéndose realizado sobre ellos la simulación del movimiento, cuyo resultado fue también satisfactorio.

La diferente movilidad del dedo pulgar respecto a los otros dedos, rasgo evolutivo presente únicamente en los homínidos y simios antropomorfos, implica directamente el desarrollo de habilidades conducentes a aumentar la inteligencia de la especie. La movilidad de este dedo es además mucho más compleja que la de los demás, por lo que debe concentrarse la atención en simular con mayor exactitud y fidelidad la movilidad de este dedo a fin de procurar un dispositivo robótico más exacto, útil y versátil.

En el presente trabajo no se consideró uno de los tres giros que debería tener la muñeca (roll), puesto que el mismo podría ser efectuado por el antebrazo. La principal razón para ello fue el ahorro de un grado de libertad necesario para el movimiento de las articulaciones de los dedos, en razón de que el software utilizado sólo permite 6 grados de libertad por cada dedo.

En general, este trabajo se constituye en un punto de partida para, eventualmente, llegar a construir el dispositivo robótico como prótesis humana incursionándose de esta manera en el área de la biónica, campo de investigación extremadamente extenso e interesante por la aplicabilidad que se le puede dar, el cual en conjunción con otros aspectos de la inteligencia artificial, puede proporcionar grandes beneficios a la colectividad y en consecuencia a la Universidad ecuatoriana.

4.4. RECOMENDACIONES

A fin de continuar con el desarrollo de este tipo de prótesis, se recomienda llevar a cabo las siguientes acciones para posteriores trabajos de investigación:

En primer lugar debe procederse con la determinación de la cinemática inversa, a fin de conocer ahora los valores angulares que debe proporcionarse a cada articulación para alcanzar una posición determinada. Al respecto, sería importante trabajar en una optimización de la secuencia de movimientos articulares que procuren proporcionar soluciones convergentes de una manera más rápida.

Seguidamente es necesario realizar los análisis dinámicos que permitan conocer los torques que hay que dar a cada motor o articulación para producir las fuerzas necesarias en el dispositivo. Aquí se podría potenciar la acción de la mano humana para producir fuerzas mayores al rango normal natural, si se demuestra su utilidad práctica.

Este último análisis debe ir de la mano con el estudio de materiales que debería usarse en una prótesis real, tomando en cuenta que factores tales como la corrosión deberían ser completamente erradicados de un modelo de aplicabilidad humana.

Aparejado a lo anterior, podrían desarrollarse estudios anatómico-biológicos que permitan determinar la manera en que las señales provenientes del cerebro pueden activar el movimiento de la prótesis, a fin de aprovechando el potencial que este tipo de dispositivos genera, incursionar en el estudio de prótesis para otros órganos tal vez de menor complejidad.

Dado el elevado costo computacional que se deriva de la alta complejidad de los movimientos que hace la mano humana, un campo de trabajo eficaz en cuanto a la optimización de dicho costo es la lógica difusa. Trabajos ulteriores deberían desarrollar este esquema de cálculo a fin de, disminuyendo el gasto informático, atacar problemas de movilidad más complejos, con mayor número de grados de libertad, a fin de incursionar en estudios más avanzados sobre prótesis humanas.

Finalmente, se plantea la posibilidad de desarrollar un modelo alternativo al algoritmo Denavit-Hartenberg que, utilizando también lógica difusa, permita obtener una modelación matemática más sencilla, más precisa y con un menor costo computacional a fin de propender a un desarrollo científico y comercial de este tipo de dispositivos.

4.5. BIBLIOGRAFÍA

1. CORKE P.; Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB. Consultado en: <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-20144-8>
2. CRAIG J.; Robótica; Pearson Educación, 3ª edición, México, 2006
3. GRANJA M.V.; Modelación y Análisis de la Cinemática Directa e Inversa del Manipulador Stanford de seis grados de libertad; EPN, Quito, 2014
4. KUMAR SAHA S.; Introducción a la Robótica; McGraw Hill Editores, S.A. de C.V.; 1ª edición en español; México, 2010
5. LATARJET M., RUIZ A.; Anatomía Humana; Editorial Médica Panamericana, 4ª edición; Argentina, 2004
6. McMINN R.M.H, HUTCHINGS R.T.; Color Atlas of Human Anatomy: Wolfe Medical Publications, England, 1977
7. REYES F.; MATLAB aplicado a robótica y mecatrónica; Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V., 1ª edición, México 2012;
8. SHIGLEY E., UICKER J.; Teoría de Máquinas y Mecanismos; McGraw Hill Editores, S.A. de C.V.; 1ª edición en español; México, 1983
9. ZÚÑIGA D., ANDRADE D.; Diseño y Construcción de una Mano Robótica; Ed. Universitaria Abya Yala; Ecuador, 2013
10. Convención Internacional sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad. Consultado en: https://es.wikipedia.org/wiki/Convenci%C3%B3n_Internacional_sobre_los_Derechos_de_las_Personas_con_Discapacidad
11. Convención sobre los derechos de las personas con capacidad. Consultado en: <http://www.un.org/esa/socdev/enable/documents/tccconvs.pdf>

12. Normativa legal que ampara los derechos de las personas con discapacidad. Consultado en: <http://www.discapacidadesecuador.org/portal/images/stories/File/leyes%20y%20ordenanzas/NORMATIVALEGALQUEAMPARALOSDERECHOSDELASPERSONASCONDISCAPACIDAD.pdf>
13. Convención sobre los derechos de las personas con capacidad. Consultado en: <http://www.un.org/spanish/disabilities/convention/convention.html>
14. Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad y su Protocolo Facultativo de las Naciones Unidas. Consultado en: https://es.wikisource.org/wiki/Convenci%C3%B3n_sobre_los_Derechos_de_las_Personas_con_Discapacidad_y_su_Protocolo_Facultativo_de_las_Naciones_Unidas
15. INEC. Consultado en: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/?s=discapacidad>
16. Registro Nacional de Discapacidades. Consultado en: http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/registro_nacional_discapacidades.pdf
17. Duelo y pérdida corporal. Lillo J. (2000). Consultado en http://www.revistahospitalarias.org/info_2001/01_163_04.htm
18. El sufrimiento de las personas amputadas. Un enfoque etnográfico con aplicaciones psicoterapéuticas. Díaz J.L., Leal C, Gómez M. (2013). Consultado en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4611576>
19. La pérdida de la cinestesia. Impacto de las amputaciones en la adolescencia. García Rodríguez G., León M., Abreu R., Peralta M., Pérez E. (2008). Consultado en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-212
20. La discapacidad por amputación traumática y la educación emocional, Retana Jorge (2007). Consultado en: <http://www.ts.ucr.ac.cr/binarios/tfglic/tfg-l-2007-15.pdf>

21. Efectos psicológicos de los trabajadores con incapacidad permanente parcial, como consecuencia de accidentes laborales, en los afiliados reportados en Riesgos del Trabajo del IESS. Tapia M. (2011). UCE, Quito.
22. Diseño de un programa fisioterapéutico para pacientes con miembros amputados que acuden a la fundación Prótesis para la Vida de la ciudad de Ibarra durante el periodo julio 2012 (2013). Cevallos C.; Hidrobo V. Consultado en <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/4303/1/06%20TEF%20036%20TESIS.pdf>

ANEXO 1

Códigos de programación en Matlab

```

% Cálculo de Matriz de Transformación
% Dedo Índice
% Alfonso Boada Zurita

syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6

D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=-1
D2=.19;a2=.79;CA2=0;SA2=-1
D3=0;a3=0;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.38;CA4=1;SA4=0
D5=0;a5=.24;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.18;CA6=1;SA6=0

A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]

T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6

% Cálculo de Matriz de Transformación
% Dedo Medio
% Alfonso Boada Zurita

syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6

D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=-1
D2=0;a2=.76;CA2=0;SA2=-1
D3=0;a3=0;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.427;CA4=1;SA4=0
D5=0;a5=.275;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.171;CA6=1;SA6=0

A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]

```

```
T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
```

```
% Cálculo de Matriz de Transformación
% Dedo Anular
% Alfonso Boada Zurita
```

```
syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6
```

```
D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=-1
D2=-.17;a2=.71;CA2=0;SA2=-1
D3=0;a3=0;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.39;CA4=1;SA4=0
D5=0;a5=.267;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.17;CA6=1;SA6=0
```

```
A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]
```

```
T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
```

```
% Cálculo de Matriz de Transformación
% Dedo Meñique
% Alfonso Boada Zurita
```

```
syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6
```

```
D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=-1
D2=-.34;a2=.67;CA2=0;SA2=-1
D3=0;a3=0;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.3;CA4=1;SA4=0
D5=0;a5=.19;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.15;CA6=1;SA6=0
```

```
A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]
```

```
T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
```

```

% Cálculo de Matriz de Transformación
% Dedo Pulgar
% Alfonso Boada Zurita

syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6

D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=1
D2=0;a2=.167;CA2=1;SA2=0
D3=0.0695;a3=.139;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.3;CA4=0;SA4=-1
D5=0;a5=.278;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.132;CA6=1;SA6=0

A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]

T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6

```



```

%SIMULACION DEDO INDICE
% Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
clear L
%           Alpha  a   Theta  d
L{1} = link([-pi/2  0  0      0  0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2  .79  0     .19 0], 'standard');
L{3} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
L{4} = link([0     .38  0      0  0], 'standard');
L{5} = link([0     .246 0      0  0], 'standard');
L{6} = link([0     .188 0      0  0], 'standard');

qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

indice = robot(L, 'Indice', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
indice.name = 'Indice';
indice.manuf = 'Unimation';
drivebot(indice);

```

```

%SIMULACION DEDO MEDIO
% Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
clear L
%           Alpha  a   Theta  d
L{1} = link([-pi/2  0  0      0  0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2  .76  0      0  0], 'standard');
L{3} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
L{4} = link([0     .427 0      0  0], 'standard');
L{5} = link([0     .275 0      0  0], 'standard');
L{6} = link([0     .171 0      0  0], 'standard');

qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

medio = robot(L, 'Medio', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
medio.name = 'Medio';
medio.manuf = 'Unimation';
drivebot(medio);

```

```

%SIMULACION DEDO ANULAR
% Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
clear L
%           Alpha  a   Theta  d
L{1} = link([-pi/2  0  0      0  0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2  .71  0     -.17 0], 'standard');
L{3} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
L{4} = link([0     .39  0      0  0], 'standard');
L{5} = link([0     .267 0      0  0], 'standard');
L{6} = link([0     .17  0      0  0], 'standard');

qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

```

```

anular = robot(L, 'Anular', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
anular.name = 'Anular';
anular.manuf = 'Unimation';
drivebot(anular);

```

```

%SIMULACION DEDO MEÑIQUE
% Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
clear L
%
%      Alpha  a  Theta  d
L{1} = link([-pi/2  0  0      0  0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2  .67  0     -.34 0], 'standard');
L{3} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
L{4} = link([0     .30  0      0  0], 'standard');
L{5} = link([0     .19  0      0  0], 'standard');
L{6} = link([0     .15  0      0  0], 'standard');

```

```

qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

```

```

menique = robot(L, 'Menique', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
menique.name = 'Menique';
menique.manuf = 'Unimation';
drivebot(menique);

```

```

%SIMULACION DEDO PULGAR
% Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
clear L
%
%      Alpha  a  Theta  d
L{1} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
L{2} = link([0     .167  0      0  0], 'standard');
L{3} = link([pi/2  .139  0     .0695 0], 'standard');
L{4} = link([-pi/2 .30  0      0  0], 'standard');
L{5} = link([0     .278  0      0  0], 'standard');
L{6} = link([0     .132  0      0  0], 'standard');

```

```

qz = [0 0 0 0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

```

```

pulgar = robot(L, 'Pulgar', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
pulgar.name = 'Pulgar';
pulgar.manuf = 'Unimation';
drivebot(pulgar);

```

```
% VALIDACION DEDO INDICE
% ALFONSO BOADA ZURITA
```

```
syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6
```

```
D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=-1
D2=.19;a2=.79;CA2=0;SA2=-1
D3=0;a3=0;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.38;CA4=1;SA4=0
D5=0;a5=.24;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.18;CA6=1;SA6=0
C1=.98;S1=.17
C2=.64;S2=.77
C3=1.0;S3=-0.09
C4=.77;S4=-.64
C5=.17;S5=-.98
C6=.77;S6=-.64
```

```
A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]
```

```
T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
```

```
% VALIDACION DEDO MEDIO
% ALFONSO BOADA ZURITA
```

```
syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6
```

```
D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=-1
D2=0;a2=.76;CA2=0;SA2=-1
D3=0;a3=0;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.427;CA4=1;SA4=0
D5=0;a5=.275;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.171;CA6=1;SA6=0
```

```
C1=.98;S1=.17
C2=.64;S2=.77
C3=0.98;S3=0.17
C4=.77;S4=-.64
C5=.17;S5=-.98
C6=.77;S6=-.64
```

```
A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
```

```

A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]

```

```
T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
```

```

% VALIDACION DEDO ANULAR
% ALFONSO BOADA ZURITA

```

```

syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6

```

```

D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=-1
D2=-.17;a2=.71;CA2=0;SA2=-1
D3=0;a3=0;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.39;CA4=1;SA4=0
D5=0;a5=.267;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.17;CA6=1;SA6=0

```

```

C1=.98;S1=.17
C2=.64;S2=.77
C3=1;S3=0.07
C4=.98;S4=.17
C5=.64;S5=-.77
C6=.87;S6=-.5

```

```

A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]

```

```
T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
```

```

% VALIDACION DEDO MEÑIQUE
% ALFONSO BOADA ZURITA

```

```

syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6

```

```

D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=-1
D2=-.34;a2=.67;CA2=0;SA2=-1
D3=0;a3=0;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.3;CA4=1;SA4=0
D5=0;a5=.19;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.15;CA6=1;SA6=0

```

```

C1=.98;S1=.17
C2=.64;S2=.77
C3=.99;S3=0.14
C4=.94;S4=.34
C5=.77;S5=-.64
C6=.87;S6=-.5

```

```

A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]

```

```
T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
```

```

% VALIDACION DEDO PULGAR
% ALFONSO BOADA ZURITA

```

```

syms C1 C2 C3 C4 C5 C6
syms S1 S2 S3 S4 S5 S6
syms CA1 CA2 CA3 CA4 CA5 CA6
syms SA1 SA2 SA3 SA4 SA5 SA6
syms a1 a2 a3 a4 a5 a6
syms D1 D2 D3 D4 D5 D6

```

```

D1=0;a1=0;CA1=0;SA1=1
D2=0;a2=.167;CA2=1;SA2=0
D3=0.0695;a3=.139;CA3=0;SA3=1
D4=0;a4=.3;CA4=0;SA4=-1
D5=0;a5=.278;CA5=1;SA5=0
D6=0;a6=.132;CA6=1;SA6=0

```

```

C1=-.17;S1=.98
C2=.64;S2=.77
C3=.77;S3=0.64
C4=-.09;S4=1
C5=.77;S5=.64
C6=.87;S6=.5

```

```

A1=[C1 -S1*CA1 S1*SA1 a1*C1;S1 C1*CA1 -C1*SA1 a1*S1;0 SA1 CA1 D1;0 0 0 1]
A2=[C2 -S2*CA2 S2*SA2 a2*C2;S2 C2*CA2 -C2*SA2 a2*S2;0 SA2 CA2 D2;0 0 0 1]
A3=[C3 -S3*CA3 S3*SA3 a3*C3;S3 C3*CA3 -C3*SA3 a3*S3;0 SA3 CA3 D3;0 0 0 1]
A4=[C4 -S4*CA4 S4*SA4 a4*C4;S4 C4*CA4 -C4*SA4 a4*S4;0 SA4 CA4 D4;0 0 0 1]
A5=[C5 -S5*CA5 S5*SA5 a5*C5;S5 C5*CA5 -C5*SA5 a5*S5;0 SA5 CA5 D5;0 0 0 1]
A6=[C6 -S6*CA6 S6*SA6 a6*C6;S6 C6*CA6 -C6*SA6 a6*S6;0 SA6 CA6 D6;0 0 0 1]

```

```
T1=A1*A2*A3*A4*A5*A6
```

```

%SIMULACION DEDO ANULAR
% PRUEBA DE TRAYECTORIA
% Copyright (C) 1993-2002, by Peter I. Corke
clear L
%
%      Alpha  a  Theta  d
L{1} = link([-pi/2  0  0      0  0], 'standard');
L{2} = link([-pi/2  .71  0     -.17  0], 'standard');
L{3} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
L{4} = link([0     .39  0      0  0], 'standard');
L{5} = link([0     .267 0      0  0], 'standard');
L{6} = link([0     .17  0      0  0], 'standard');

qz = [0 -pi/2 pi/4  0 0 0];
qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

anular = robot(L, 'Anular', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
anular.name = 'Anular';
anular.manuf = 'Unimation';
drivebot(anular);
q1=[0 -pi/2 pi/4 0 0 0]
q2=[pi/4 pi/4 pi/4 pi/4 pi/4 pi/4]
%T=fkine(anular,q1)
%[q,qd,qdd] = jtraj(q1, q2, 20)

T = jtraj(q1, q2, 200)
plot(anular,T)

```

```

%SIMULACION MANO ROBOTICA
%ALFONSO BOADA ZURITA
%QUITO JULIO-2016

%DEDO INDICE

clear LI
%           Alpha  a   Theta   d
LI{1} = link([-pi/2  0  0           0  0], 'standard');
LI{2} = link([-pi/2  .79  0           .19  0], 'standard');
LI{3} = link([pi/2   0  0           0  0], 'standard');
LI{4} = link([0     .38  0           0  0], 'standard');
LI{5} = link([0     .246  0           0  0], 'standard');
LI{6} = link([0     .188  0           0  0], 'standard');

indice = robot(LI, 'indice', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
indice.name = 'i';
indice.manuf = 'Unimation';
%drivebot(indice)

%DEDO MEDIO

clear LM

LM{1} = link([-pi/2  0  0           0  0], 'standard');
LM{2} = link([-pi/2  .76  0           0  0], 'standard');
LM{3} = link([pi/2   0  0           0  0], 'standard');
LM{4} = link([0     .427  0           0  0], 'standard');
LM{5} = link([0     .275  0           0  0], 'standard');
LM{6} = link([0     .171  0           0  0], 'standard');

%qz = [0 0 0 0 0 0];
%qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
%qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

medio = robot(LM, 'Medio', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LM
medio.name = 'm';
medio.manuf = 'Unimation';
%drivebot(medio);

%DEDO ANULAR

clear LA
%           Alpha  a   Theta   d
LA{1} = link([-pi/2  0  0           0  0], 'standard');
LA{2} = link([-pi/2  .71  0           -.17  0], 'standard');
LA{3} = link([pi/2   0  0           0  0], 'standard');
LA{4} = link([0     .39  0           0  0], 'standard');
LA{5} = link([0     .267  0           0  0], 'standard');
LA{6} = link([0     .17  0           0  0], 'standard');

%qz = [0 0 0 0 0 0];
%qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
%qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

anular = robot(LA, 'Anular', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LA

```

```

anular.name = 'a';
anular.manuf = 'Unimation';
%drivebot(anular);

%DEDO MENIQUE

clear LN
%      Alpha  a  Theta  d
LN{1} = link([-pi/2  0  0      0  0], 'standard');
LN{2} = link([-pi/2  .67  0     -.34  0], 'standard');
LN{3} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
LN{4} = link([0     .30  0      0  0], 'standard');
LN{5} = link([0     .19  0      0  0], 'standard');
LN{6} = link([0     .15  0      0  0], 'standard');

%qz = [0 0 0 0 0 0];
%qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
%qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

menique = robot(LN, 'Menique', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LN
menique.name = 'n';
menique.manuf = 'Unimation';
%drivebot(menique);

%DEDO PULGAR

clear LP
%      Alpha  a  Theta  d
LP{1} = link([pi/2   0  0      0  0], 'standard');
LP{2} = link([0     .167  0      0  0], 'standard');
LP{3} = link([pi/2  .139  0     .0695  0], 'standard');
LP{4} = link([-pi/2  .30   0      0  0], 'standard');
LP{5} = link([0     .278  0      0  0], 'standard');
LP{6} = link([0     .132  0      0  0], 'standard');

%qz = [0 0 0 0 0 0];
%qr = [0 pi/2 -pi/2 0 0 0];
%qstretch = [0 0 -pi/2 0 0 0];

pulgar = robot(LP, 'Pulgar', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear LP
pulgar.name = 'p';
pulgar.manuf = 'Unimation';
%drivebot(pulgar);

q1=[0 0 0 0 0 0];
q2=[0 0 .1745 .5239 1.3963 .6981];

q3=[1.5708 0 0 .7584 0 0];
q4=[1.5784 .0873 -.8981 1.6581 -.6981 .5236];

%hold off;
T=jtraj(q1,q2,25);
T3=jtraj(q3,q4,25);

plot(indice,T);

```

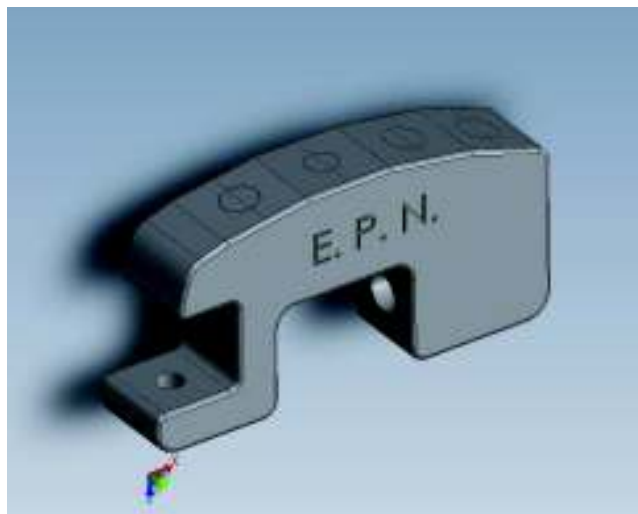


```
plot(medio,T);  
plot(anular,T);  
plot(menique,T);  
plot(pulgar,T3);  
cla  
  
T1=jtraj(q2,q1,25);  
T4=jtraj(q4,q3,25);  
  
plot(indice,T1);  
plot(medio,T1);  
plot(anular,T1);  
plot(menique,T1);  
plot(pulgar,T4);
```

ANEXO 2

Diseño geométrico del dispositivo Diagramas esquemáticos en Solid Works de los elementos constitutivos

1. CARPO



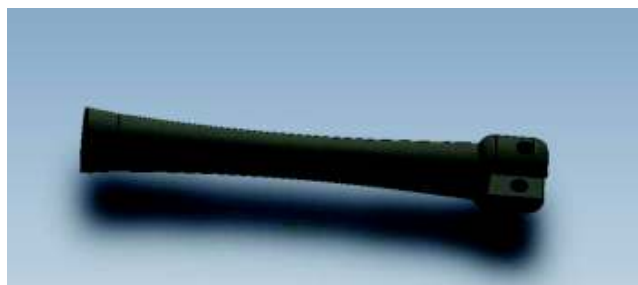
2. ARTICULACIÓN PULGAR



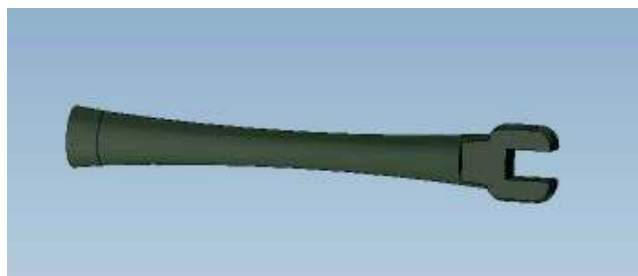
3. CRUCETA PARA JUNTAS DOBLE-ROTATORIAS



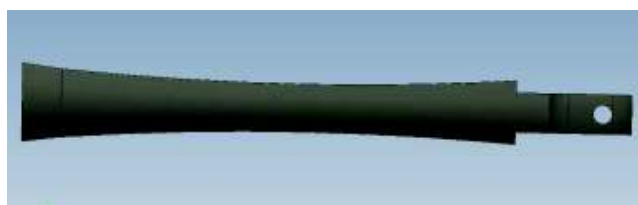
4. METACARPIANO ANULAR

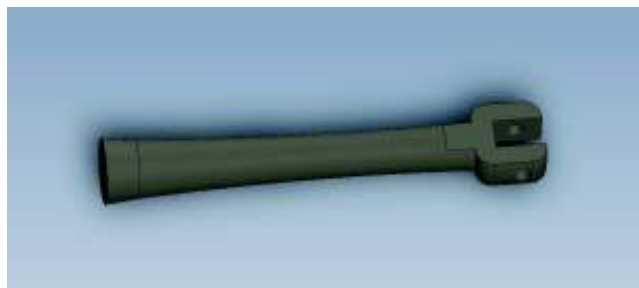


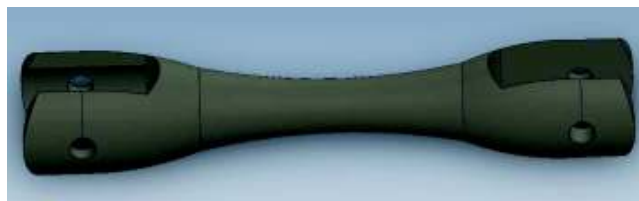
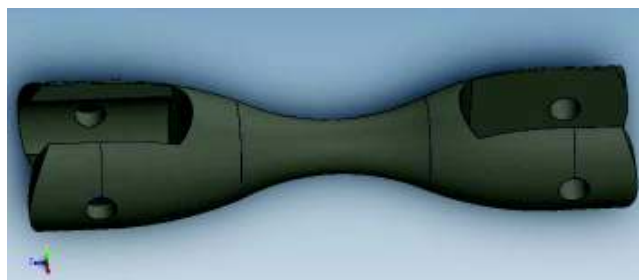
5. METACARPIANO INDICE



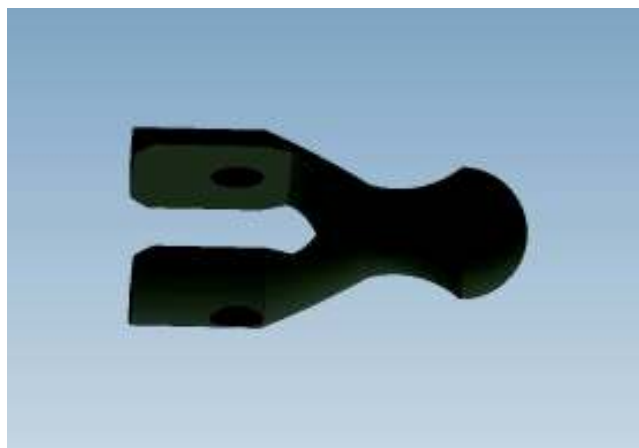
6. METACARPIANO MEDIO

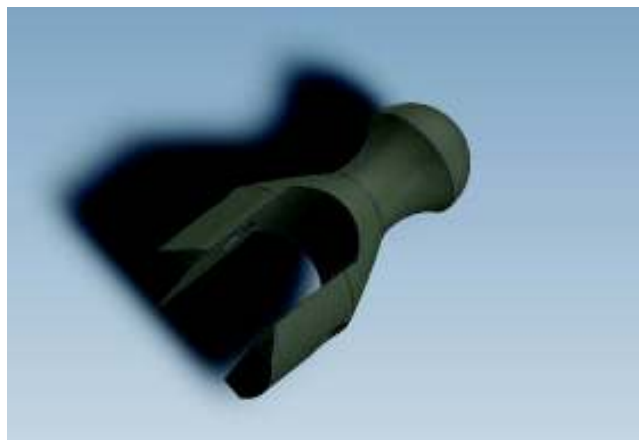


7. METACARPIANO MEÑIQUE**8. METACARPIANO PULGAR****9. BASTIDOR****10. FALANGE PROXIMAL ANULAR**

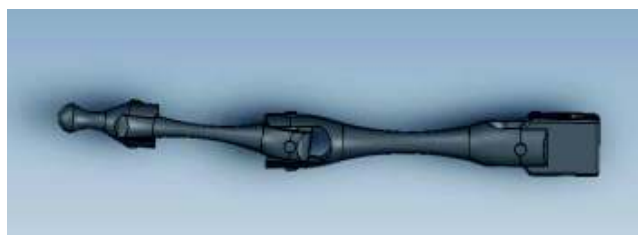
11. FALANGE PROXIMAL INDICE**12. FALANGE PROXIMAL MEDIO****13. FALANGE PROXIMAL MEÑIQUE****14. FALANGE PROXIMAL PULGAR**

15. FALANGE MEDIA ANULAR**16. FALANGE MEDIA INDICE****17. FALANGE MEDIA MEDIO****18. FALANGE MEDIA MEÑIQUE**

19. FALANGE DISTAL ANULAR**20. FALANGE DISTAL INDICE****21. FALANGE DISTAL MEDIO**

22. FALANGE DISTAL MEÑIQUE**23. FALANGE DISTAL PULGAR****24. ENSAMBLE DEDO ANULAR**

25. ENSAMBLE DEDO INDICE**26. ENSAMBLE DEDO MEDIO****27. ENSAMBLE DEDO MEÑIQUE**

28. ENSAMBLE DEDO PULGAR**29. ENSAMBLE MANO**