

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



Proyecto de trabajo de diploma

“Robot Paralelo de tres grados de libertad para Rehabilitación del Tobillo”.

Autor: Eduardo Díaz Rodríguez.

Tutor: DrC. José Abreu García.

Santa clara

2014

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



Proyecto de trabajo de diploma

“Robot Paralelo de tres grados de libertad para Rehabilitación del Tobillo”.

Autor: Eduardo Díaz Rodríguez.

Tutor: DrC. José Abreu García.

Santa clara

2014



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

Pensamiento

“Un robot no puede actuar contra un ser humano o, mediante inacción, que un ser humano sufra daños”.

Primera ley de la robótica de Isaac Asimov.

Dedicatoria

- ✓ En primer lugar a mis padres, por brindarme por su apoyo incondicional y ser mi guía y ejemplo durante toda la vida para ser cada día mejor. Por estar siempre ahí, en los buenos momentos y también en los malos. Por enseñarme que todo en la vida es posible si las personas se lo proponen. En fin, por ser los únicos y los mejores.
- ✓ A mis abuelos, que siempre han estado pendiente de mí y de mi formación como estudiante y persona, gracias y los quiero con la vida.
- ✓ A mi hermano menor, que también de una u otra forma ha contribuido en la realización de este sueño.
- ✓ A mi novia, que ha visto de punta a cabo el desarrollo de este sueño y siempre ha estado ahí para brindarme su ayuda y apoyo.
- ✓ A mi familia por estar siempre atenta de mis resultados docentes a lo largo de estos cinco años y preocuparse por el desempeño de este trabajo.

Agradecimientos

- ✓ A mi tutor José Rafael Abreu García por el incondicional apoyo brindado, que con su conocimiento hizo posible la realización de este trabajo y me guió correctamente para el adecuado desarrollo del documento.
- ✓ A mi padre y mi madre por haberme guiado siempre por el camino correcto en la vida.
- ✓ A mis compañeros de aula Homero, Ana Ilis, Carreño, Sammy, que me brindaron todo su apoyo y conocimiento a lo largo de estos cinco años, gracias. A otros amigos que aunque ya no están, me ayudaron mucho, incluso antes de empezar la universidad y saben que los estimo cantidad.
- ✓ A Yidier Pérez de Alejo, gracias por tu ayuda sin límites a lo largo de estos cinco años, y aún más por el aporte hecho a la metodología y organización de esta investigación.
- ✓ A aquellos profesores que aportaron su conocimiento y me ayudaron a lo largo de estos cinco años: Luis Mariano, Pablo Prieto. A ese técnico del 117 que ha sido de gran ayuda en toda esta carrera y me ayudado en cada situación en que lo he necesitado.
- ✓ A los profesores de la facultad de Mecánica, el Dr. Jorge Laureano Moya Rodríguez y Dr. Feliberto Fernández Castañeda que brindaron su apoyo al desarrollo de esta tesis.

Tareas técnicas

Para la realización del presente trabajo de diploma se desarrollaron las siguientes tareas:

1. Revisión bibliográfica del tema de Robots Paralelos y sus aplicaciones en la medicina, sobre todo en la rama de la rehabilitación.
2. Análisis y estudio para determinar los actuadores lineales a utilizar en la construcción del prototipo de robot rehabilitador.
3. Obtención del modelo cinemático inverso del robot dedicado a la rehabilitación.
4. Diseño y simulación del prototipo utilizando el software Inventor.
5. Redacción del informe.

Resumen

Los seres humanos están sujetos a presentar accidentes traumáticos los cuales le impiden realizar actividades de la vida cotidiana.

Según criterios de especialistas de rehabilitación, las lesiones del tobillo son de las más frecuentes en el país, por lo que existe gran cantidad de pacientes necesitados de tratamientos.

Para mejorar la rehabilitación en lesiones de tobillo se han propuesto acciones que permiten mover y estirar los músculos suavemente, manualmente o con la ayuda de rehabilitadores. En el presente trabajo se presenta un prototipo virtual de un robot paralelo orientado a la rehabilitación asistida del tobillo.

El robot paralelo propuesto para la rehabilitación de tobillo ha sido diseñado con la idea de ofrecer ejercitación pasiva de dos movimientos básicos y utilizados en los procesos de rehabilitación como son el de dorsi/plantarflexión y eversión/inversión.

También se presenta la obtención de la cinemática inversa, basada en modelos geométricos, así como sus variaciones cuando se añaden al prototipo elementos rotacionales. Por otra parte, se realiza un análisis y valoración de los diferentes actuadores a utilizar, tomando como solución a emplear la que resulte más factible desde el punto de su economía y posible construcción en el país. Por último, se realiza la presentación del prototipo virtual así como su simulación, mediante la utilización del software Inventor.

Índice

Pensamiento	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos.....	iv
Tareas técnicas	v
Resumen	vi
Introducción.....	1
Capítulo 1: Estado del Arte.....	1
1.1. Origen y desarrollo de la robótica.	1
1.2. Clasificación de los robots de acuerdo a la estructura.....	3
1.2.1. Robots tipo serie.	3
1.2.2. Robots paralelos.	4
1.3. Aplicaciones de los robots paralelos en la medicina.....	8
1.3.1. Robots asistenciales.	9
1.3.2. Robótica quirúrgica.	11
1.3.3. Robótica en rehabilitación.	13
1.4. Rehabilitación del tobillo.	15
1.4.1. Movimientos del tobillo.....	15
1.4.2. El tobillo humano.....	17
1.4.3. Técnicas de rehabilitación del tobillo.....	18
1.4.4. Rehabilitadores de tobillo comerciales.	19
1.5 Consideraciones finales del capítulo.	22
Capítulo 2: Selección y diseño de la estructura y actuadores de la plataforma.	23
2.1. Introducción al capítulo.	23
2.2 Cinemática Inversa.	24
2.2.1 Longitud del miembro i:.....	29

2.3 Actuadores en la robótica paralela.	30
2.3.1 Actuadores neumáticos:.....	30
2.3.2 Actuadores hidráulicos:	32
2.3.3 Accionamientos electromecánicos clásicos:	33
2.4 Análisis dinámico de un mecanismo Manivela-Biela-Pistón.	38
2.5 Consideraciones finales del capítulo.	40
Capítulo 3: Diseño y Simulación del Prototipo.....	41
3.1 Introducción al capítulo.....	41
3.2 Análisis geométrico.....	41
3.3 Análisis de velocidades.....	42
3.4 Análisis de aceleraciones.	44
3.4.1 Cálculo de las aceleraciones del centro de masa de la biela:	47
3.5 Cálculo de la masa de los elementos.	49
3.5.1 Para la manivela:.....	49
3.5.2 Para la biela:	49
3.5.3 Para el pistón:	49
3.6 Cálculo de las fuerzas (análisis dinámico).	50
3.6.1 Manivela (elemento OA).....	50
3.6.2 Para la biela (elemento AP):	52
3.6.3 Para el pistón:	53
3.7 Cálculo de la potencia requerida P.	54
3.8 Propuesta del Sistema Mecánico.	55
3.8.1 Diseño de componentes.....	56
3.9 Prototipo Virtual del Robot Paralelo.....	56
Conclusiones.....	59
Recomendaciones.....	60
Referencias bibliográficas.	61

Anexos	64
Anexo A: Cinemática Inversa con elementos rotacionales.	64

Introducción

El impacto que ha tenido la robótica en sus inicios, podría ser comparado con el descubrimiento del transistor. Desde la década de los setenta, la robótica se ha convertido en una ciencia con territorio propio y ha cautivado el interés de innumerables grupos de investigación, que se embarcaron en la búsqueda de lo que para Isaac Asimov era ciencia ficción: el logro de la automatización de los sistemas dotados de inteligencia artificial.

Al igual que otras ramas de la ciencia y la tecnología, la robótica se ha desarrollado en los últimos años de una manera rápida e intensa. Es un campo relativamente nuevo de la tecnología moderna, y ha sido definida como la ciencia que estudia la conexión inteligente entre la percepción y la acción (Sciavicco, 1996). En el campo de la robótica convergen múltiples disciplinas como la ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica, ingeniería electrónica, ciencias computacionales, teoría de control, etc. A la robótica también se le asocia la diversión, la industria, la medicina, la investigación, la ciencia ficción, entre otras, produciendo una gran gama de innovaciones tecnológicas.

Varias son las definiciones que se conocen para el término robot, en el presente trabajo se empleará como concepto de robot: “mecanismo articulado multifuncional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos variados, programados para la ejecución de distintas tareas”. Estos pueden clasificarse de acuerdo a la composición de su estructura cinemática en tres categorías: robots series, paralelos e híbridos (Simaan, 1999, Tsai, 1999b).

Actualmente se ha evidenciado un alto grado de madurez con respecto a la robótica, y la adquisición e instalación de robots de todo tipo en variados entornos productivos ha dejado de ser una aventura para convertirse en una opción razonable en muchas esferas de la automatización.

Inicialmente la robótica surge para ser utilizada en medios industriales, sobre todo en la industria automovilística en procesos de pintura, soldadura, ensamblaje, etc. La medicina es una de las ciencias que ha visto de cerca los avances de la robótica, gracias a los adelantos que se han producido en

aspectos como la simulación de habilidades de decisión rápida, la manipulación mecánica con muchos grados de libertad, la experiencia y adaptación rápida al entorno y la integración y decisión sobre una enorme cantidad de datos provenientes de múltiples sensores y monitores conectados al enfermo, aunque se estima que este desarrollo ha sido más lento de lo imaginado tres décadas atrás.

Generalmente, muchos procedimientos en la medicina, se caracterizan por ser intensivos y repetitivos, con altos grados de precisión y exactitud, muy apropiados para ser llevados a cabo con la ayuda de robots. En la rama médica, la robótica se ha dirigido hacia tres campos específicos: los robots asistenciales, los robots quirúrgicos y los robots destinados a la rehabilitación de pacientes.

En los últimos años, la población con discapacidad es un grupo que ha llamado la atención desde diversas perspectivas a compañías de desarrollo tecnológico, instituciones privadas y universidades de varias partes del mundo. La discapacidad no sólo afecta a las personas con limitaciones físicas en la realización de sus actividades, sino que también muestran un desajuste psicológico, una limitación en el desarrollo socioeconómico, educativo y cultural (Nordin, 2001).

A pesar del impacto negativo de la recesión económica global en el mercado, diversos han sido los mecanismos desarrollados, capaces de rehabilitar y fortalecer completamente la parte afectada (por ejemplo: rodilla, tobillo, cadera, etc); con el único objetivo de recuperar la movilidad, disminuir el trabajo de un terapeuta, incrementar el número de servicios de terapias, reducir el tiempo de recuperación y ofrecer una mayor diversidad de terapias personalizadas con movimientos precisos y seguros, todo esto con el fin de aumentar en gran medida la calidad y eficiencia del proceso de rehabilitación. Con estas máquinas se puede iniciar el movimiento de la articulación tan pronto como sea posible después de la cirugía, reduciendo de esa forma el problema postoperatorio de rigidez en la articulación.

Es decir, en sentido general, la rehabilitación tiene como objetivo mantener, recuperar y desarrollar el movimiento corporal humano mediante la terapia física (Hamonet, 1990).

La rehabilitación puede ser llevada a cabo de dos maneras: activa y pasiva (Neiger, 1998). En la primera, el individuo puede realizar los ejercicios por sí mismo de forma voluntaria, y en cuanto a su clasificación se divide en: asistida, libre y resistida. En la segunda, el terapeuta es el que moviliza las extremidades sin ningún esfuerzo del paciente, es decir, la persona no tiene fuerza muscular; un ejemplo de este tipo son las personas con hemiplejía.

A partir de investigaciones realizadas (O'Discoll, 2000, Salter R., 1960), se observó que la inmovilización de las articulaciones que han sido sometidas a una cirugía podía ser dañina. Por otro lado, se supuso que si el movimiento intermitente era benéfico tanto para las articulaciones dañadas como para las saludables, entonces el movimiento continuo sería mucho más efectivo.

Otro elemento ventajoso de la terapia recuperativa asistida por robots es que posibilita aumentar las dosis de terapia, y provee motivación adicional a los pacientes a la hora de ejecutar determinados ejercicios, sobre todo cuando se emplean interfaces gráficas interactivas de usuario. Debido a la disponibilidad de sensores y facilidades computacionales, se puede incorporar como valores agregados a la aplicación, el manejo y procesamiento de datos, la evaluación computarizada de la evolución del paciente, reportes gráficos, etc.

En Cuba existen un gran número de salas de rehabilitación, distribuidas en todos los municipios del territorio nacional, donde a diario asisten cientos de pacientes, lo cual incide considerablemente en la demanda de las necesidades de rehabilitación.

Todo lo anterior, implica la factibilidad de efectuar investigaciones en aras de extrapolar el empleo de los robots rehabilitadores hacia el país, garantizando así que una persona que haya sido víctima de una lesión de esta naturaleza, se recupere de manera satisfactoria con un adecuado fortalecimiento del músculo o zona afectada, reincorporándose de forma segura a las actividades cotidianas.

Los robots rehabilitadores tienen un elevado costo en el mercado internacional, por lo que resultan inaccesibles para Cuba, sin embargo, al contar con una fuerte industria mecánica, será factible disponer de diseños de dispositivos robóticos de bajo costo que puedan ser fabricados en el país y de esta manera satisfacer las necesidades existentes.

Es por ello que se justifica desde el punto de vista científico el desarrollo de una investigación que tenga como finalidad el desarrollo de un robot paralelo de 3 grados de libertad para rehabilitación asistida del tobillo, pretendiendo incursionar en las posibilidades del empleo en nuestro país de los robots en aplicaciones médicas.

Situación del problema.

La demanda creciente de tratamientos de rehabilitación en las salas existentes en el país es un problema, lo cual conlleva un gran esfuerzo por parte de los técnicos dedicados a estas tareas. Otro elemento a tener en cuenta es lo relativo al tiempo en que son proporcionadas las citas para los pacientes, el cual se ha incrementado notablemente debido al creciente aumento del personal necesitado. Esto trae graves consecuencias ya que al recibir turnos en lapsos de tiempo relativamente prologados, no se garantiza una ejercitación y recuperación constante de la parte afectada, lo que conlleva a la disminución en la calidad del proceso de rehabilitación, todo esto a cambio de aumentar la cantidad de personas bonificadas.

Por otra parte la situación específica de cada paciente y su evolución, requieren de un tratamiento diferenciado y variable, que en muchos casos no puede ser ofrecido de manera manual, es por ello de gran importancia el desarrollo de robots, que a través de sensores, puedan tener en cuenta todas las especificaciones del tratamiento de un paciente indicado y la evolución de sus afectaciones.

Se ha mencionado la rehabilitación en sentido general porque estos equipos robóticos pueden ser empleados en diferentes tratamientos, pero en aras de sintetizar el desarrollo e implementación de la investigación, se ha determinado delimitar el caso específico del tobillo, que es una de las áreas más propensas a recibir lesiones.

Se determina como **problema científico**: la factibilidad y necesidad de desarrollar un prototipo de robot paralelo rehabilitador de 3 grados de libertad de bajo costo, destinado a la rehabilitación asistida de tobillo y su posible utilización en las salas de rehabilitación del país, dada la demanda creciente de pacientes necesitados y la necesidad de lograr tratamientos específicos conociendo la evolución de cada caso.

Por consiguiente, el presente proyecto de investigación se enmarca dentro del objeto de estudio de investigación relacionado con la robótica aplicada a la rehabilitación, formulándose la siguiente:

Hipótesis de investigación: la construcción de un prototipo de robot paralelo rehabilitador de 3 grados de libertad de bajo costo, dará la posibilidad de incursionar en la robótica aplicada a la medicina, particularmente en el campo de la rehabilitación.

Por lo tanto, se determina como **objetivo general**: Proponer un prototipo de un robot paralelo de 3 grados de libertad de bajo costo, orientado a la rehabilitación asistida del tobillo.

Como **objetivos específicos** se establecen los siguientes:

- Obtener el modelo cinemático del robot, teniendo en cuenta criterios del personal facultativo.
- Analizar diferentes prototipos de actuadores lineales a utilizar para el diseño del prototipo, seleccionando el más adecuado, desde el punto de vista de su economía y posible construcción en el país.
- Realizar el diseño y simulación del prototipo mediante la utilización del software Inventor.

Organización del informe.

El siguiente informe se divide en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

En el primer capítulo: se aborda el marco teórico acerca de los robots paralelos y sus aplicaciones en la medicina, fundamentalmente en la rama de la rehabilitación, y sobre todo aquellos destinados a la zona en estudio, el tobillo.

En el segundo capítulo: se realiza un análisis de la cinemática inversa del robot, incluyendo la variación que experimenta esta cuando se añaden elementos rotacionales. También se realiza una evaluación de los diferentes actuadores lineales que pueden ser utilizados para la construcción del prototipo, determinando el más factible a utilizar.

En el tercer capítulo: se realiza el diseño del mecanismo encargado de llevar a cabo los movimientos que debe ejecutar el robot, determinando así todos los parámetros necesarios, además, se presenta el diseño virtual del prototipo mediante el software Inventor y sus correspondientes simulaciones.

Capítulo 1: Estado del Arte.

A lo largo del presente capítulo se abordarán una serie de conocimientos básicos que se deben tener en cuenta en todo momento antes de avanzar hacia los demás epígrafes que componen la investigación. Dentro de estos aspectos se encuentran las características necesarias que debe cumplir un robot para ser utilizado en aplicaciones médicas, las distintas técnicas que pueden ser utilizadas con estos fines, así como algunos ejemplos de sistemas robóticos que se emplean tanto para la rehabilitación de miembros superiores como inferiores, haciendo hincapié en los que se han estado empleando para la zona en estudio, el tobillo, con diferentes conceptos necesarios para comprender de manera correcta su funcionamiento.

1.1. Origen y desarrollo de la robótica.

El inicio de la robótica actual puede fijarse en la industria textil del siglo XVIII, cuando Joseph Jacquard inventa en 1801 una máquina textil programable mediante tarjetas perforadas. Luego, la Revolución Industrial impulsó el desarrollo de estos agentes mecánicos. Además de esto, durante los siglos XVII y XVIII en Europa fueron construidos muñecos mecánicos muy ingeniosos que tenían algunas características de robots. Jacques de Vaucansos construyó varios músicos de tamaño humano a mediados del siglo XVIII. En 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que era capaz de hacer dibujos.

La palabra robot se utilizó por primera vez en 1921 en una obra llamada "Los Robots Universales de Rossum"(Capek, 1935, Capek, 1966), escrita por el dramaturgo checo Karel Capek. Su trama trataba sobre un hombre que fabricó un robot y luego este último mata al hombre. Su origen es la palabra eslava robota, que se refiere al trabajo realizado de manera forzada.

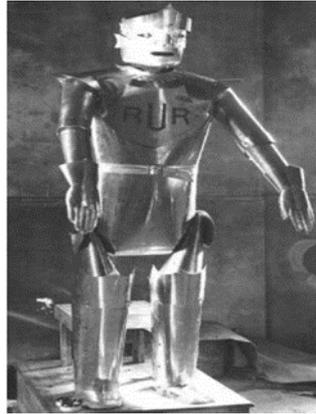


Figura 1.1: Rossum's Universal Robot.

Luego, Isaac Asimov (Isaac Asimov) comenzó en 1939 a contribuir con varias relaciones referidas a robots y a él se le atribuye el acuñamiento del término Robótica y con él surgen las denominadas "Tres Leyes de Robótica".

Son varios los factores que intervienen para que se desarrollaran los primeros robots en la década de los 50's. La investigación en inteligencia artificial desarrolló maneras de emular el procesamiento de información humana con computadoras electrónicas e inventó una variedad de mecanismos para probar sus teorías. Las primeras patentes aparecieron en 1946 con los muy primitivos robots para traslado de maquinaria de Devol. También en ese año aparecen las primeras computadoras.

En 1954, Devol diseña el primer robot programable. En 1960 se introdujo el primer robot "Unimate". En 1961 Un robot Unimate se instaló en la Ford Motors Company para atender una máquina de fundición de troquel. En 1966 Trallfa, una firma noruega, construyó e instaló un robot de pintura por pulverización. En 1971 El "Standford Arm", un pequeño brazo de robot de accionamiento eléctrico, se desarrolló en la Standford University. En 1978 Se introdujo el robot PUMA para tareas de montaje por Unimation, basándose en diseños obtenidos en un estudio de la General Motors.

En la actualidad, la robótica se debate entre modelos sumamente ambiciosos, como es el caso del IT, diseñado para expresar emociones, el COG, también conocido como el robot de cuatro sentidos, el famoso SOUJOURNER o el LUNAR ROVER, vehículo de turismo con control remoto, y otros mucho más específicos como el CYPHER, un helicóptero robot de uso militar, el guardia de tráfico japonés ANZEN TARO o los robots mascotas de Sony.

En general la historia de la robótica se puede clasificar en cinco generaciones: las dos primeras, ya alcanzadas en los ochenta, incluían la gestión de tareas repetitivas con autonomía muy limitada. La tercera generación incluiría visión artificial, en lo cual se avanzó mucho en los años ochenta y noventa. La cuarta incluye movilidad avanzada en exteriores e interiores y la quinta entraría en el dominio de la inteligencia artificial, en lo cual se trabaja actualmente.

1.2. Clasificación de los robots de acuerdo a la estructura.

1.2.1. Robots tipo serie.

Los robots serie se diseñan con base en los acoplamientos rígidos o empalmes prismáticos conformando una cadena cinemática en serie (abierta), actuada por motores generalmente. Tienen la característica que uno de sus extremos está fijado a una base y el otro se encuentra acoplado a un efectos final (Kuen, 2002).

Los mecanismos series también pueden ser clasificados como manipulador espacial o manipulador planar. Un ejemplo clásico del manipulador espacial lo constituye el Manipulador Puma (Kuen, 2002), que debido a su estructura serie, la carga útil está limitada por el esfuerzo mínimo de torsión del motor que actúa sobre la cadena cinemática, a lo cual hay que agregarle que los motores y articulaciones de la estructura forman parte de la carga de la misma, factor que desfavorece en gran medida la capacidad de carga útil y la aparición de grandes efectos inerciales.

Estos mecanismos de forma general, tienen cierta similitud al brazo humano (antropomórficos), en cuanto a su estructura. Dentro de sus ventajas, se destaca que son capaces de operar en un gran espacio de trabajo, en contraposición con limitaciones en cuanto a su capacidad de carga.



Figura 1.2: Robot tipo serie.

1.2.2. Robots paralelos.

El término “robot paralelo” se estableció para identificar a los robots de cadena cinemática cerrada de los robots de cadena cinemática abierta (robots serie) (Castellanos, 2012). Vale la pena destacar que el término paralelo significa que los actuadores accionan en conjunto o de manera paralela, pero no quiere decir que los elementos existentes estén alineados paralelamente (Wobbe et al., 2008). Un robot paralelo es aquel cuya estructura mecánica está formada por un mecanismo de cadena cinemática cerrada, en el que el efector final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes (Kuen, 2002).

Los robots paralelos son también conocidos como máquinas cinemáticas paralela o simplemente manipuladores paralelos (Merlet, 2006). Conceptualmente son estructuras mecánicas formadas por dos plataformas, una fija y una móvil, con múltiples e independientes cadenas cinemáticas cerradas, donde al menos una es actuada.

En los últimos años, los robots paralelos han marcado mucho interés en la comunidad de la robótica. Esto se evidencia en el aumento del número de artículos publicados en el tema, junto con la aplicación de los mismos con fines muy diversos.

Entre las ventajas de las arquitecturas paralelas se puede mencionar su elevada fuerza mecánica, ya que la carga en el efector final es soportada por múltiples articulaciones al mismo tiempo, resultando una menor fuerza por articulación. Otro elemento importante es que estos sistemas presentan elevadas velocidades de operación en comparación con cualquier otra estructura robótica, así como una alta exactitud.

Una de las desventajas de los mecanismos paralelos es lo relativo a su cinemática y dinámica (Gogu, 2010), ya que presentan gran complejidad, por lo que en algunas ocasiones se recurre al empleo de sensores redundantes para conformar el lazo de control (Kuen, 2002, Merlet, 1999). También es importante señalar que el análisis y diseño de estos robots resulta más complejo a medida que aumenta el número de grados de libertad, de forma tal que se puede cambiar de manera notable la movilidad de todo el mecanismo con solo efectuar pequeñas modificaciones articulares.

El primer robot paralelo del que se tiene conocimiento es una plataforma sobre la que estaban colocados los asientos de un teatro con el fin de introducir un movimiento que diese una apariencia más real al espectáculo. Esta plataforma denominada Amusement Device fue patentada en 1931 por J.E.Gwinnett (Gwinnett, 1931). Por la información existente, esta plataforma no llegó a construirse (Zabalza and Ros, 2007).

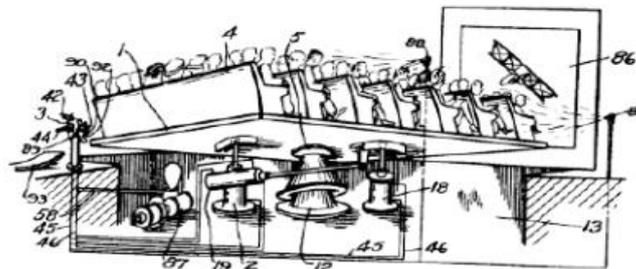


Figura 1.3: Plataforma de movimiento espacial patentada por J. E. Gwinnett.

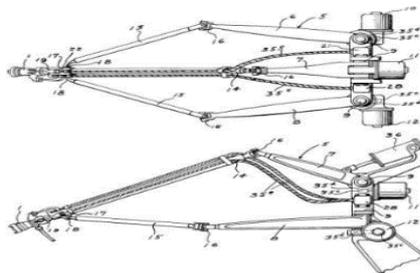


Figura 1.4: Robot paralelo patentado por W.L.V. Pollard.

En 1942 W.L.V Pollard patentó un robot paralelo llamado “ *Position-Controlling Apparatus*”; que se destinó para pintar automóviles (Pollard, 1942). Este sistema consistía en tres brazos de dos eslabones cada uno, unidos mediante juntas universales.

En 1947 V.E Gough ideó un robot paralelo con seis actuadores lineales formando una estructura de octaedro (Merlet, 2006, Aracil et al., 2006). Este robot de seis grados de libertad fue utilizado en la empresa Dunlop para el ensayo de neumáticos de aviación y se presentó en un Congreso de la Federación Internacional de Sociedades de Ingenieros y Técnicos del Automóvil (FISITA) en 1962 (Zabalza and Ros, 2007); y ha sido el que mayor éxito ha tenido.



Figura 1.5: Plataforma de Gough.

En 1965 Steward, presentó un artículo en el que describía una plataforma de movimiento de 6 grados de libertad, destinada a trabajar como simulador de vuelo. Contrario a la creencia general, el mecanismo de Steward es diferente a presentado por Gough. El artículo presentado por Steward tuvo y tiene gran influencia en el mundo académico, y es considerado como uno de los primeros trabajos que se han realizado, donde se aborda el tema del análisis de plataformas paralelas (Aracil et al., 2006).

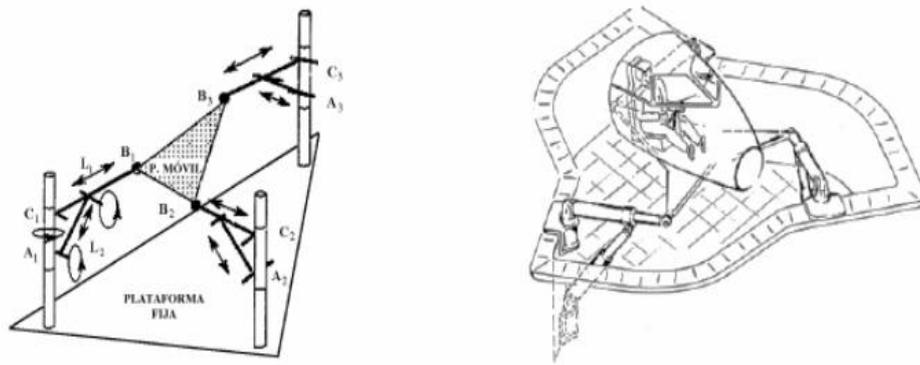


Figura 1.6: Plataforma de Steward.

Otro de los dispositivos pioneros en las estructuras robóticas paralelas lo constituye el manipulador paralelo 6-RUS con seis grados de libertad, accionado por actuadores giratorios presentado por K.H. Hunt en el año 1967 (Zabalza and Ros, 2007).

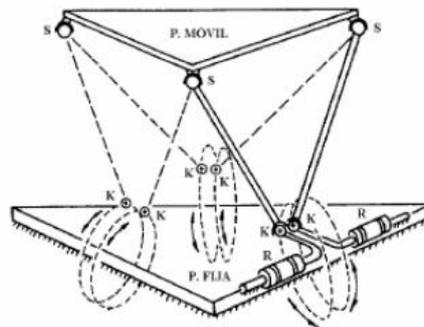


Figura 1.7: Manipulador paralelo 6-RUS propuesto por K.H. Hunt.

Posteriormente, a partir de 1970, se desarrollaron gran cantidad de simuladores de vuelo con el objetivo de proporcionar un entrenamiento más económico para los pilotos de aviación, buscando otra alternativa diferente a la realización de simples vuelos reales. La mayoría de estos simuladores estaban basados en la estructura de Gough (Zabalza and Ros, 2007). K.H. Hunt sugirió el empleo de los mecanismos actuados de arquitectura paralela, como robots manipuladores, destacando que los mismos requerían de un estudio más detallado a la vista de las ventajas que en cuanto a rigidez y precisión presentaban respecto a los robots serie convencionales.

En 1979 McCallion y Pham fueron los primeros en proponer la plataforma de Steward como un mecanismo paralelo para una célula de ensamblaje

robotizada, básicamente porque la posición del efector final es mucho menos sensible a los errores que los sensores articulares que caracterizan a los robots serie (Valdez, 2007).

En la década de los ochenta se presentaron trabajos con enfoques más generales que analizaban la cinemática, dinámica, espacio de trabajo así como el control de distintos tipos de configuraciones.

Los estudios sobre robots paralelos aún no han terminado, sino que han ido en aumento y a partir de 1985 se produce el inicio de un gran interés que ha ido creciendo de forma exponencial.

1.3. Aplicaciones de los robots paralelos en la medicina.

El número de aplicaciones en que las estructuras paralelas han jugado un papel protagónico ha aumentado hasta nuestros días. Se hace mención a algunos campos donde más son aplicados; sobre todo el que está asociado a la medicina, el cual ha sido objeto de muchas investigaciones en los últimos años.

Hasta los momentos actuales, han surgido un grupo de sistemas robóticos para aplicaciones médicas, que poseen una gran variedad; y se han encaminado básicamente a tres ramas muy específicas: los robots asistenciales, robots quirúrgicos y los dedicados a rehabilitación.

En primer lugar, es importante destacar que existen una serie de requisitos que deben cumplir los sistemas robóticos para poder ser utilizados en aplicaciones médicas. Algunos autores han investigado sobre ellos (Khodabandehloo, 1996, Simaan, 1999). Principalmente deben cumplirse cuatro requisitos fundamentales para asegurar el éxito de un robot médico.

El primero y más importante es la seguridad, que puede ser lograda con un control eficaz y limitando el área de trabajo, esto último con el objetivo de evitar colisiones peligrosas entre las partes móviles y el personal médico o el paciente.

El segundo requisito es la compactación en tamaño y ligereza, esto asegura que el robot no consuma una gran cantidad de espacio esencial, y además facilita la reubicación del robot en diferentes posiciones para diferentes tareas.

El tercer requisito es el funcionamiento simple o la fácil operatividad, con el fin de mejorar la curva de aprendizaje de los nuevos cirujanos.

El último, pero no menos importante, es el requisito para una fácil esterilización. Es crítico, sobre todo en cirugía, ya que cualquier herramienta en el quirófano debe estar esterilizada o cubierta con paños estériles a fin de evitar infecciones.

En la siguiente figura, se presentan estos requisitos a modo de resumen:

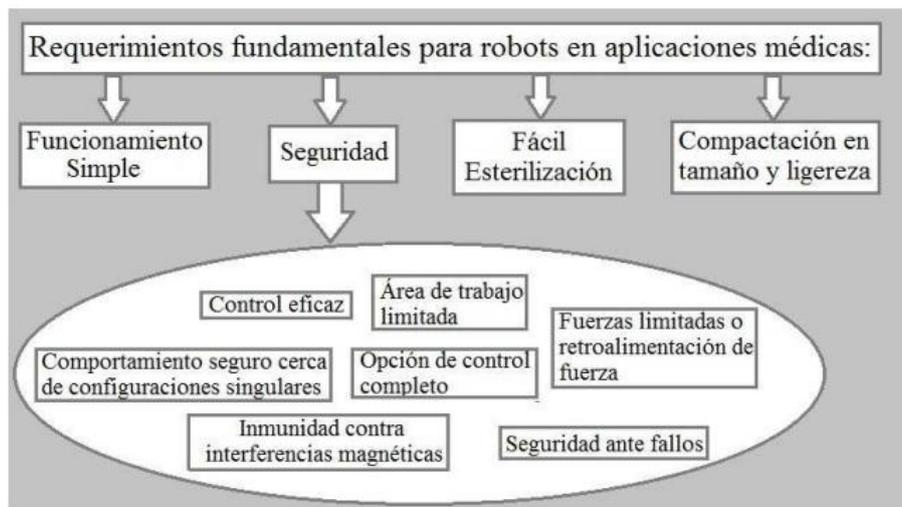


Figura 1.8 Requerimientos fundamentales para robots en aplicaciones médicas.

1.3.1. Robots asistenciales.

Los sistemas robóticos para asistencia están diseñados para permitir mayor autonomía a las personas discapacitadas y tienen como objetivo mejorar la calidad de vida del paciente, cubriendo un amplio rango de sus tareas cotidianas, brindándoles mayor autonomía y seguridad. Estos sistemas incluyen prótesis y exoesqueletos modernos. Por lo general, los robots destinados a este fin, están diseñados para entornos específicos (hospitalarios, residencia).

El URSUS, es un robot que ejercita a niños discapacitados para realizar ejercicios de movilidad, y los corrige en caso de error. El sistema posee una base de datos donde se recogen los resultados obtenidos en las terapias, y cada cierto tiempo envía los datos al médico a través de internet, lo cual es

muy ventajoso ya que el especialista puede estar al corriente de la evolución del paciente y determinar si el proceso está siendo ventajoso o no.



Figura 1.9: Asistente URSUS.

El Neater Eater es un dispositivo modular que auxilia en la alimentación de personas y puede ser controlado de forma manual o mediante interruptores de la cabeza o el pie. Los sistemas más generales están equipados con brazos de muchos g.d.l., tal como el Exact Dynamics' iARM, un brazo robótico con una pinza de dos dedos, que se adhiere a sillas de ruedas eléctricas y puede ser controlado a través teclado, joystick o botón (Beasley, 2012).



Figura 1.10: Sistema robótico Neater Eater.

El Care-O-Bot®, es un robot móvil con un brazo manipulador altamente flexible de siete grados de movilidad., que acerca comidas y bebidas, responde a la voz y tiene comunicación con servicios asistenciales y ciudadanos, además de monitorización de constantes vitales y gestión de alarmas médicas (Graf, 2011).



Figura 1.11: Sistema robótico Care-O-Bot® 3.

Otros desarrollos interesantes en el campo asistencial incluyen las prótesis mioeléctricas y visuales, destinadas a sustituir alguna parte dañada del cuerpo. En la actualidad, existen diversas prótesis controladas por microprocesador, sobre todo para la rodilla y la mano. Dentro de estas se encuentra la C-leg, diseñada para la rodilla, la cual ajusta automáticamente la dinámica de la fase de balanceo y mejora la estabilidad durante la fase de apoyo mediante el control de la flexión de la rodilla (Seymour, 2007).

La I-limb Ultrahand por Touch Bionics, es una prótesis de mano, y la primera que estuvo comercialmente disponible, posee cinco dígitos propulsados individualmente y controlados a través de señales bioeléctricas generadas por los músculos en la porción restante de la extremidad del paciente (Reinders-Messeling, 2010).

1.3.2. Robótica quirúrgica.

La cirugía robótica o cirugía robotizada es la aplicación de robots a las diferentes técnicas quirúrgicas y es una nueva tendencia en la medicina actual, con la cual se brinda al cirujano una mayor precisión y accesibilidad. Brinda grandes ventajas para los médicos sirviéndoles de gran ayuda: desde pequeños procedimientos quirúrgicos que se realizan en pequeños orificios del cuerpo humano, hasta los grandes trabajos que pueden ser realizados a distancia. Con estas máquinas se logra una selección más precisa de la zona de corte, se reduce el riesgo de tener infecciones por las cirugías, le posibilita al paciente beneficiarse con incisiones de menor tamaño, una disminución del dolor así como un tiempo de recuperación menor. Vale la pena señalar que

estos sistemas quirúrgicos pueden trabajar de forma pasiva, activa y semiactiva (Simaan, 1999).

El Robodoc utilizado para ortopedia, se puso en práctica por primera vez en 1992 para el reemplazo total de cadera. Ha recibido la Marca CE 1996, y la aprobación de la FDA para el reemplazo total de cadera en 1998 y el de la rodilla en 2009 (Schulz, 2011)..

La Laparoscopia o cirugía mínimamente invasiva es uno de los campos de la cirugía que más se ha beneficiado con los sistemas robóticos y uno de los que más aceptación ha tenido por el personal necesitado. En 1995 Computer Motion crea el sistema Zeus (Sung, 2001). Técnicamente, el Zeus no es un robot, ya que no sigue movimientos programables, sino que es un telemanipulador remoto asistido por ordenador con brazos robóticos interactivos. En 2003 este sistema se usó en la Operación Lindbergh, la primera cirugía realizada con el cirujano y el paciente separados por una distancia de varios miles de kilómetros (Marescaux, 2001).



Figura 1.12: Sistema robótico Zeus.

El sistema Da Vinci fue desarrollado por Intuitive Surgical Inc., es similar al Zeus, pero con mayores mejoras tecnológicas. Es actualmente el robot quirúrgico más comercial y con mayor éxito e implantación a nivel mundial. La lista de procedimientos quirúrgicos que se pueden realizar con el sistema Da Vinci es amplia, y continuamente aparecen tareas nuevas a ejecutar con esta máquina. Consiste en un sistema teleoperado, en el que el cirujano manipula los controles del instrumento en una consola y en los brazos robóticos se refleja esta manipulación con movimientos a escala y reducción del temblor. Se utiliza comúnmente para la prostatectomía radical, aunque está autorizado para distintos procedimientos de laparoscopia general (Bodner, 2004)..

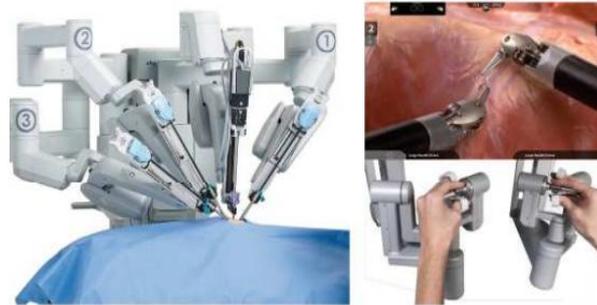


Figura 1.13: Sistema robótico Da Vinci.

En los últimos tiempos existe mucha discusión acerca de la aplicación de la ecuación (valor = beneficios - costes) al sistema Da Vinci, pero es indudable el papel de pionero que este sistema representa en cuanto a la integración de un robot en el quirófano (OPENSURG, 2013).

1.3.3. Robótica en rehabilitación.

La rehabilitación es el proceso por el cual se recuperan las aptitudes físicas perdidas a causa de un incidente traumático mediante terapia física. El objetivo de la rehabilitación es recuperar una función completa y sin limitaciones, sobre todo en el caso de los deportistas, que necesitan volver al mismo nivel de exigencia física (Basmajian, 1994, Carr, 1987).

Los sistemas de rehabilitación pueden ser similares a los sistemas de asistencia, la diferencia es que están diseñados para facilitar la recuperación mediante la entrega de terapia y medición del progreso del paciente, a menudo después de una apoplejía (Hillman, 2004). La notable reducción de la carga física que tiene el terapeuta, es una de las grandes ventajas de estos sistemas, así el hecho de ofrecer una terapia más constante proporcionando un aumento en la eficacia, eficiencia y productividad del proceso de rehabilitación.

Las dificultades para robots de rehabilitación en desarrollo y sus posibles usos futuros, son elementos de gran interés y motivos de grandes investigaciones en el tema (Ceccarelli, 2011).

El InMotion es un brazo robótico que mueve, guía o perturba el brazo del paciente dentro de un área de trabajo plana, mientras que graba movimientos, velocidades y fuerzas para evaluar el progreso (Waldner, 2008).

ALEX es un sistema robótico de arquitectura exoesquelética, utilizado para rehabilitación de miembro inferior, desarrollado por la Universidad de Delaware. Dispone de sistemas de actuación para sus articulaciones. El modo de funcionamiento del equipo se basa en fuerzas que ayudan al pie a seguir una trayectoria concreta durante la rehabilitación, de forma similar a la terapia realizada por el fisioterapeuta. También ofrece una realimentación visual de la trayectoria que sigue el pie del paciente.

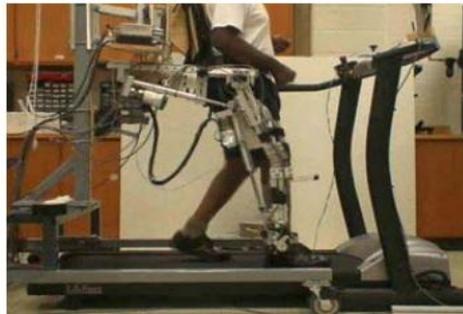


Figura 1.14: Sistema robótico ALEX.

El sistema Lokomat, es una especie de exoesqueleto desarrollado por la empresa Suiza Hocoma (pionero en esta tecnología), para el entrenamiento y rehabilitación de personas con parálisis cerebral, síndrome de Down, personas con amputaciones, con problemas neurológicos o limitaciones físicas. Se basa en el hecho de que la marcha responde a un patrón repetitivo en el que intervienen el cerebro y la columna vertebral, y consigue que el sistema nervioso entrene a otras neuronas para esta acción, sustituyendo a las dañadas; y posibilitando la recuperación del andar (RIC., 2013). Este innovador robot, funciona desde 2004 en Estados Unidos en los diferentes hospitales y centros de rehabilitación, para ayudar a reeducar el proceso de marcha en las personas con discapacidad. La actividad de caminata del paciente puede ser supervisada, determinada y dirigida según sus necesidades, puesto que consta de un sistema para cargar con el peso del paciente y de un andador automático. Por otra parte, Lokomat dispone de entornos virtuales para proveer

al paciente de una realimentación sonora y visual que le ayude a tener un alto nivel de motivación mientras ejecuta la terapia.

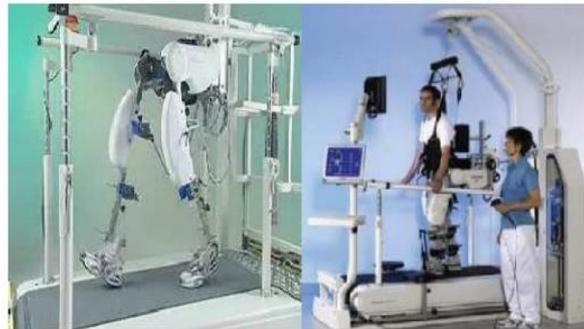


Figura 1.15: Sistema robótico Lokomat.

1.4. Rehabilitación del tobillo.

El estudio de la anatomía y biomecánica del tobillo es esencial para comprender el tratamiento de su patología, por lo cual la arquitectura del tobillo se compara a menudo con una ensambladura de mortaja y espiga de carpintería.

1.4.1. Movimientos del tobillo.

Existen tres pares principales de movimientos del tobillo, es decir, cada uno de ellos tiene su contraparte (Xie, 2008).

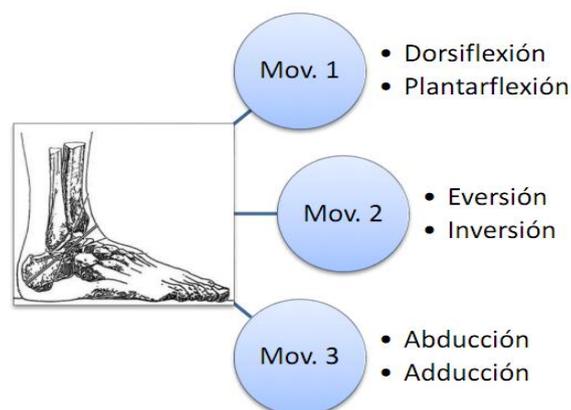


Figura 1.16: Movimientos generales del tobillo.

Movimiento 1: Dorsiflexión o flexión plantar es el movimiento que se realiza en plano sagital. Reduce el ángulo entre el pie y la pierna, en el cual los dedos del pie se acercan a la espinilla, el movimiento opuesto se llama flexión plantar. El rango de movimiento de la Dorsiflexión indicado en la literatura es de 20° a 30°.

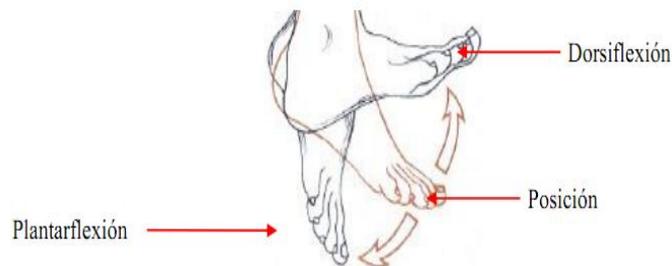


Figura 1.17: Movimientos de plantarflexión y dorsiflexión.

Movimiento 2: La eversión se realiza en el plano frontal y consiste en la rotación externa del pie con elevación del borde externo de este. Los músculos que participan en la eversión son: tercer peróneo (principal), peróneo corto, peróneo largo, extensor largo de los dedos y extensor corto de los dedos. La inversión, al igual la eversión, también se realiza en el plano frontal y es también una rotación, pero interna del pie con elevación del borde interno del mismo. Los músculos que participan en este movimiento son: tibial anterior y tibial posterior, que son los principales, pero también está presente el flexor largo de los dedos, flexor del dedo gordo y extensor largo del dedo gordo.

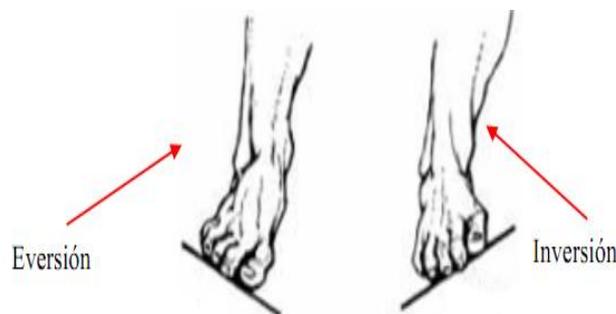


Figura 1.18: Movimientos de eversión e inversión.

Movimiento 3: La abducción/aducción se realizan en el plano transversal.

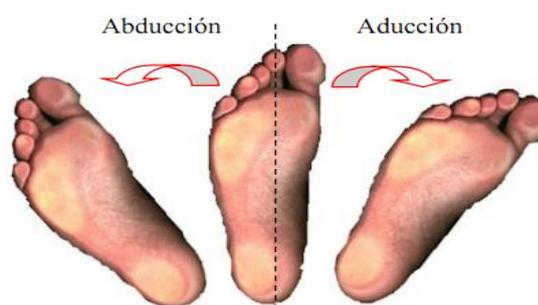


Figura 1.19: Movimiento de Abducción y Aducción del pie.

1.4.2. El tobillo humano.

El tobillo es una de las partes más complejas del sistema esquelético y una de las zonas más propensas a sufrir fracturas o esquinces debido a sobreesfuerzos, caídas o golpes; el mismo juega un papel importante en la locomoción humana, transmitiendo fuerzas y torques a la tierra durante el andar. El movimiento del tobillo puede ser descrito por las rotaciones a través de 3 ejes, los cuales son perpendiculares a los planos anatómicos. Los términos usados para definir la dirección del movimiento pie-tobillo y los rangos estimados de movimientos en cada dirección están recogidos en la tabla 1.1. Es importante destacar que este rango puede variar extremadamente entre los individuos por lo que resulta necesaria la existencia de un sistema adaptable el cual puede limitar la fuerza aplicada, cuando se acerca a los límites de la unión previniendo lesiones al paciente.

Tipo de movimiento	Movimiento máximo permisible
Dorsiflexión	20.3° a 29.8°
Plantarflexión	37.6° a 45.8°
Inversión	14.5° a 22.0°
Eversión	10° a 17°
Abducción (rotación externa)	15.4° a 25.9°
Aducción (rotación interna)	22° a 36°

Tabla 1.1: Rango de Movimientos del tobillo.

Los modelos cinemáticos con un rango de complejidad, han sido propuestos para representar el movimiento en el tobillo usando uniones básicas tales como bisagras o rótulas. Sin embargo debido a la articulación compleja entre la tibia, peroné y los huesos de la parte trasera del pie, el movimiento del tobillo no es puramente rotacional y las rotaciones están también acopladas. Por lo tanto es inadecuada la representación del tobillo con una simple bisagra o rótula para describir correctamente el movimiento anatómico.

Este movimiento acoplado se puede describir mejor utilizando el modelo biaxial, el cual usa dos articulaciones de bisagra, la unión del tobillo y la subastragalina respectivamente. Debido a que los ejes de estas articulaciones son oblicuos con respecto a los planos anatómicos, la rotación alrededor de ellos contribuirá al movimiento alrededor de los 3 planos. Es importante

conocer que mientras la articulación del tobillo puede ser considerada estacionaria durante el movimiento del mismo, la orientación del eje subastragalino actualmente cambia con la configuración del tobillo (Dettwyler, 1985), proporcionando más complejidad al modelo.

Particularmente en la dirección de los movimientos de dorsiflexión/plantarflexión (Chen, 1988), han sido muchos los que han investigado sobre la flexibilidad del tobillo humano. En aspectos como la rigidez y amortiguación del tobillo se observó cierta dependencia sobre varios factores, uno de ellos correspondiente al grado de activación muscular y otro a la velocidad del movimiento. Otra observación importante es lo relativo al momento resistivo del tobillo, el cual varía de una manera lineal con respecto a la posición del tobillo mediante el cual la rigidez de este cerca de la posición neutral es baja pero se incrementa significativamente cuando el movimiento se acerca a los límites de la articulación.

El tobillo experimenta movimientos bastante grandes, con valores por encima de 50 N-m cuando se mueve pasivamente, pero incluso puede incrementarse hasta valores superiores a 100 N-m cuando son contraídos los músculos. Por lo tanto, a la hora del diseño del robot debe considerarse este elemento para asegurar que este sea capaz de proveer grandes torques para ejercicios resistivos.

1.4.3. Técnicas de rehabilitación del tobillo.

En la actualidad diferentes técnicas son empleadas para la rehabilitación del tobillo, sin embargo, no todas tienen la misma efectividad. Algunas necesitan que el paciente sea un agente activo en el proceso de rehabilitación, por lo que este realiza un trabajo activo a través de una serie de ejercicios, los cuales paulatinamente se van intensificando, para lograr una recuperación de la movilidad del tobillo. Las técnicas usadas se basan en ejercicios con bandas elásticas, hidroterapia y caminadoras.

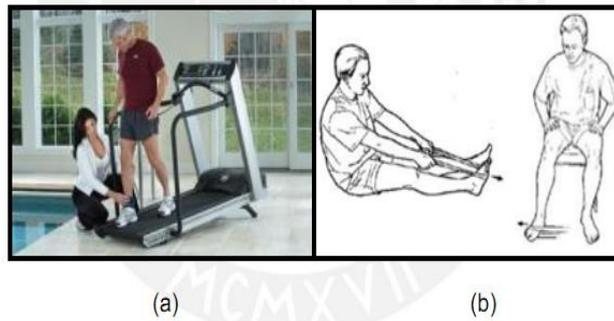


Figura 1.20: Trabajo activo. (a) Uso de caminadoras, (b) uso de bandas elásticas.

Por otro lado, el paciente también puede realizar un trabajo pasivo, y generalmente se da en las primeras etapas de la rehabilitación. En estos casos un agente externo, ya sea una persona capacitada para la tarea o un mecanismo electromecánico, es el que manipula el tobillo sin que el paciente haga algún tipo de movimiento voluntario. Entre las diferentes opciones se tienen los masajes realizados por el fisioterapeuta, el uso del ultrasonido y dispositivos electromecánicos.



Figura 1.21: Trabajo pasivo. (a) Fisioterapeuta realizando masajes al paciente, (b) Ultrasonido para calentar el área afectada.

1.4.4. Rehabilitadores de tobillo comerciales.

A continuación se muestra un dispositivo el cual no realiza ningún movimiento por sí solo, únicamente coloca el pie en una altura en la cual una persona especializada realiza los movimientos de rehabilitación (García, 2008).



Figura 1.22: Producto 1.

Otro ejemplo que se puede observar sólo proporciona un tipo movimiento y este tiene que ser controlado por una persona especialista (García, 2008).



Figura 1.23: Producto 2.

El próximo dispositivo ofrece movimientos circulares bien definidos y el sistema mecánico está diseñado para mover el peso del pie con relativa facilidad, mezcla dos movimientos y tiene que ser usado de forma manual (García, 2008).



Figura 1.24: Producto 3.

En el siguiente dispositivo se tienen que los movimientos ya están motorizados pero no están bien definidos los rangos que se manejarán y no tienen un

dispositivo que puede delimitarlos por lo que todo el tiempo de la terapia es necesario que un especialista esté supervisando las (García, 2008).



Figura 1.25: Producto 4.

La máquina mostrada a continuación es la que ofrece mejores movimientos en comparación con los anteriores, se trata de un aparato que genera movimientos circulares teniendo como eje el tobillo, limitados por las dimensiones del aparato, es automático y controlado con un programador, a su vez el usuario controla el tiempo y la velocidad bajo parámetros preestablecidos por el fabricante (García, 2008).



Figura 1.26: Kinetec 5190 Ankle CPM Machine.

Es importante destacar que este último dispositivo mencionado es sin duda el que ofrece un mejor panorama en lo que se refiere a la rehabilitación.

Finalmente en el sector educativo o de investigación también ha despertado el interés por desarrollar rehabilitadores de tobillo. A la derecha, se muestra el prototipo de la Universidad de New Jersey, EUA y a la izquierda el de la Universidad de Tsukuba de Tecnología, Japón.



Figura 1.27: (a) Universidad de Rutgers, New Jersey 1998; (b) Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba University of Technology, 2007.

El primero conocido como Tobillo de Rutgers, permite la rehabilitación de pacientes que han perdido movilidad en el tobillo mediante la utilización de un videojuego para estimular más el movimiento. Aunque este es con fines de investigación, es un prototipo que brinda muy buenos resultados.

1.5 Consideraciones finales del capítulo.

El uso de la robótica en aplicaciones médicas se ha desarrollado ampliamente en los últimos años, tanto en las tareas quirúrgicas, asistenciales así como de rehabilitación.

La rehabilitación de tobillos es una de las principales aplicaciones de robótica médica y pueden ser desarrolladas con mayor eficiencia y eficacia, permitiendo la medición de los avances en el tratamiento.

Capítulo 2: Selección y diseño de la estructura y actuadores de la plataforma.

2.1. Introducción al capítulo.

En las Salas de Rehabilitación existentes en el país se pueden encontrar dispositivos destinados a la rehabilitación del tobillo, están constituidos por una plataforma fija y una móvil unidas por cilindros hidráulicos accionados por el paciente. No son programables y solo se pueden utilizar por las personas que disponen de la fuerza suficiente para accionar los dispositivos.

En la generalidad de los casos que requieren rehabilitación, el personal facultativo debe indicar los movimientos a realizar de acuerdo a la lesión sufrida y al estado de la recuperación en el momento preciso, es por ello necesario disponer de elementos motrices que con la combinación de sus desplazamiento compongan el resultado del movimiento necesario. La utilización de las dos plataformas con tres actuadores lineales es la solución a esta problemática. El desarrollo de un prototipo requiere de diferentes fases en su diseño como se muestra en el diagrama de bloques donde se incluyen 4 etapas principales.

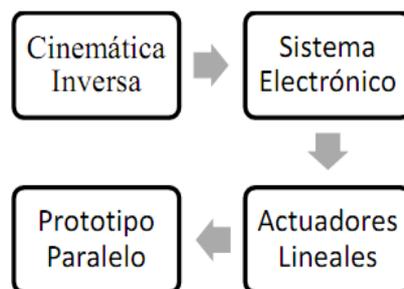


Figura 2.1: Diagrama en bloques del desarrollo del prototipo.

La cinemática inversa permitirá determinar los desplazamientos y las velocidades necesarios en cada actuador para lograr el movimiento final. El sistema electrónico debe conformar las señales de control para los actuadores que moverán la plataforma móvil según los requerimientos, aunque este no será objeto de estudio en la presente investigación.

2.2 Cinemática Inversa.

La cinemática se encarga del estudio del movimiento de los cuerpos rígidos con respecto a un sistema de referencia, los cuales pueden moverse de varias maneras en un espacio, en traslación o rotación, y estas son llamadas “grados de libertad”, cuyo mayor número tiene que ser seis (Antonio Barrientos, 2007). Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot; el primero de ellos es la cinemática directa, y consiste en determinar la posición y orientación final a partir de las longitudes de sus actuadores; y el segundo problema lo constituye la cinemática inversa, que no es más que hallar las longitudes de sus actuadores a partir de una posición y orientación deseada, es decir, básicamente dada la localización de la plataforma móvil, encontrar las longitudes de los miembros d_1 , d_2 y d_3 (Tsai, 1999a).

Debido a que el manipulador tiene solamente tres grados de libertad sin el poste central y dos grados con el poste central, la posición y orientación deben ser especificadas acorde con las restricciones impuestas por las partes del mecanismo. El análisis que se llevará a cabo se realizará sin el poste central.

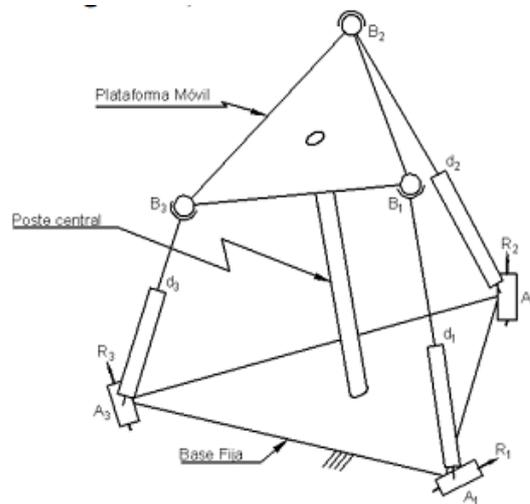


Figura 2.2: Partes del mecanismo.

Se colocarán dos sistemas de coordenadas cartesianas denominados $O(x,y,z)$ y $M(u,v,w)$ para la base y la plataforma móvil respectivamente, los que serán utilizados en el desarrollo del análisis geométrico.

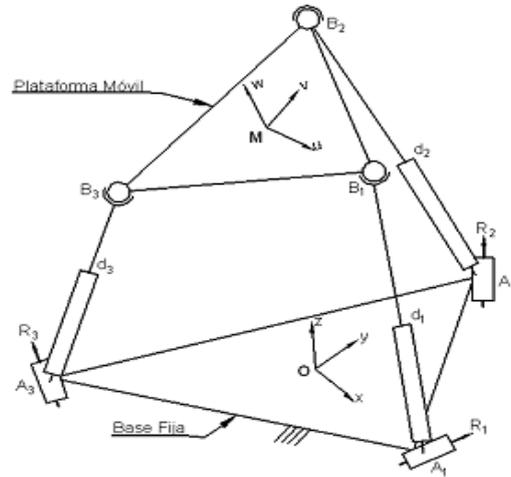


Figura 2.3: Marcos de coordenadas en el mecanismo.

Las uniones A_i son colocadas sobre el plano x - y . El origen del marco de referencia fijo denominado O se posiciona en el centroide del triángulo equilátero $\Delta A_1 A_2 A_3$, y la unión A_1 se encuentra perpendicular a la dirección del eje x , como pudo observarse en la figura anterior.

Así mismo el marco de referencia móvil es colocado sobre el centroide del triángulo equilátero $\Delta B_1 B_2 B_3$, mientras que las uniones B_i son ubicadas sobre el plano u - v . Además la unión B_1 se ha orientado de manera perpendicular a la dirección del eje u , como lo muestra la figura a continuación:

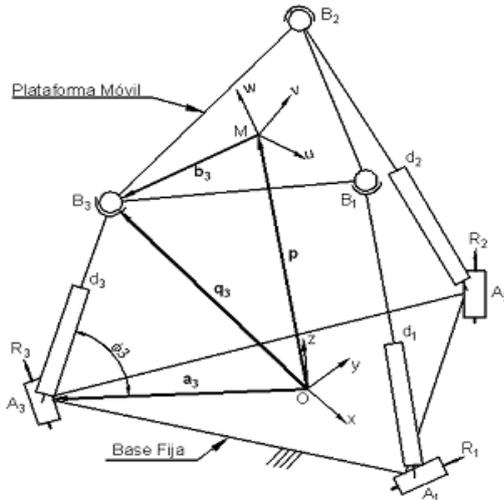


Figura 2.4: Geometría total de la plataforma.

Los vectores de posición denominados p , q_i , a_i y b_i pueden observarse en la figura anterior, donde q_3 va desde la base hasta la unión esférica denominada B_3 , de manera similar ocurre con el vector a_3 , el cual va desde el origen del marco de referencia fijo hasta la unión de revoluta A_3 y de la misma manera ocurre con los demás vectores del mecanismo.

Los triángulos equiláteros se encuentran circunscritos en una circunferencia imaginaria donde r_A y r_B son sus radios, para la base y la plataforma móvil respectivamente. Ahora, permita que (x, y, z) y (u, v, w) sean los vectores unitarios de los marcos de referencia O y M respectivamente.

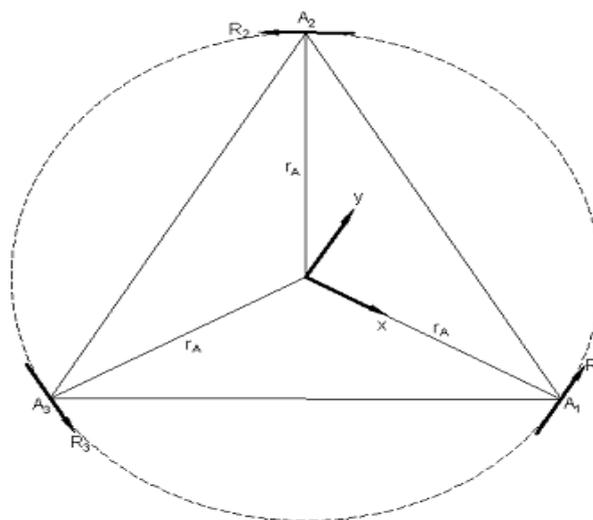


Figura 2.5: Vista superior de la base.

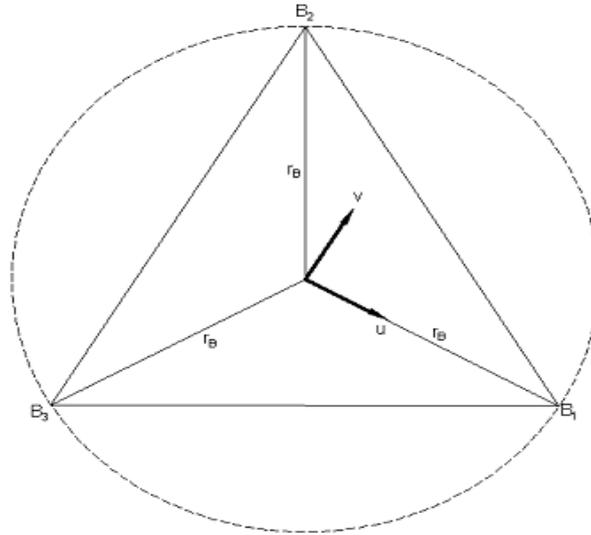


Figura 2.6: Vista superior de la plataforma móvil.

Por lo tanto, las coordenadas de las uniones A_i y B_i están dadas por las ecuaciones siguientes:

$$a_1 = [r_A \ 0 \ 0]^T \quad (2.1)$$

$$a_2 = \left[-\frac{1}{2} * r_A \quad -\frac{\sqrt{3}}{2} * r_A \quad 0 \right]^T \quad (2.2)$$

$$a_3 = \left[-\frac{1}{2} * r_A \quad \frac{\sqrt{3}}{2} * r_A \quad 0 \right]^T \quad (2.3)$$

$$B_{b1} = [r_B \ 0 \ 0]^T \quad (2.4)$$

$$B_{b2} = \left[-\frac{1}{2} * r_B \quad \frac{\sqrt{3}}{2} * r_B \quad 0 \right]^T \quad (2.5)$$

$$B_{b3} = \left[-\frac{1}{2} * r_B \quad -\frac{\sqrt{3}}{2} * r_B \quad 0 \right]^T \quad (2.6)$$

Además, se puede definir que el vector de posición de \mathbf{p} que se ubica a lo largo del poste central como:

$$p[0 \ 0 \ h] \quad (2.7)$$

Así también se puede definir la matriz de rotación, la cual describe las orientaciones de la plataforma móvil (contiene senos y cosenos) con respecto a la base:

$$A_{RB} = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Es importante mencionar que una rotación se representa mediante los ángulos de Euler, con una rotación de tres rotaciones planas alrededor de tres ejes ortogonales. Existen actualmente alrededor de 12 convenios para describir el tipo de matriz de rotación a utilizar añadiéndole además posibles variaciones en el signo, orientación relativa de ejes (horario o antihorario) y punto de vista (operación en vectores o transformación de coordenadas). En la presente investigación se ha decidido tomar como ejes xyz, que de manera similar coinciden con los ejes que se toman en los aviones, este convenio también se denomina ángulos de navegación o de Tait-Bryan.

Las siguientes propiedades de ortogonalidad deben ser satisfechas por los elementos de la matriz 2.8:

$$u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = 1 \quad (2.9)$$

$$v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 1 \quad (2.10)$$

$$w_x^2 + w_y^2 + w_z^2 = 1 \quad (2.11)$$

$$u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z = 0 \quad (2.12)$$

$$u_x w_x + u_y w_y + u_z w_z = 0 \quad (2.13)$$

$$v_x w_x + v_y w_y + v_z w_z = 0 \quad (2.14)$$

Los vectores de posición q_i de B_i con respecto al sistema de coordenadas fijo son obtenidos a través de un simple análisis vectorial y se llega a la siguiente transformación:

$$q_i = p + A_{RB} B_{b_i} \quad (2.15)$$

Sustituyendo la ecuación 2.8 y desde la ecuación 2.4 hasta la 2.6 en la ecuación 2.15 se tiene:

$$q_1 = \begin{bmatrix} r_B u_x \\ r_B u_y \\ h + r_B u_z \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$q_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} r_B v_x - \frac{1}{2} r_B u_x \\ \frac{\sqrt{3}}{2} r_B v_y - \frac{1}{2} r_B u_y \\ h - \frac{1}{2} r_B u_z + \frac{\sqrt{3}}{2} r_B v_z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$q_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} r_B u_x - \frac{\sqrt{3}}{2} r_B v_x \\ -\frac{1}{2} r_B u_y - \frac{\sqrt{3}}{2} r_B v_y \\ h - \frac{1}{2} r_B u_z - \frac{\sqrt{3}}{2} r_B v_z \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.2.1 Longitud del miembro i:

La longitud de un miembro d_i , tal como se puede ver en la figura 2.3 está dada por:

$$d_i^2 = [q_i - a_i]^T [q_i - a_i] \quad (2.19)$$

Para $i= 1, 2, 3$.

Entonces, sustituyendo las ecuaciones desde la 2.10 hasta la 2.12 y desde las ecuaciones 2.1 hasta la 2.3 en la ecuación 2.13 se tiene que:

$$d_1^2 = h^2 + 2hr_B u_z + r_A^2 - 2r_A r_B u_x + r_B^2 u_x^2 + r_B^2 u_y^2 + r_B^2 u_z^2 \quad (2.20)$$

$$d_2^2 = h^2 - hr_B u_z + \sqrt{3}hr_B v_z + r_A^2 - \frac{1}{2}r_A r_B u_x + \frac{\sqrt{3}}{2}r_A r_B u_y + \frac{\sqrt{3}}{2}r_A r_B v_x - \frac{3}{2}r_A r_B v_y + \frac{1}{4}r_B^2 u_x^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}r_B^2 u_x v_x + \frac{1}{4}r_B^2 u_y^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}r_B^2 u_y v_y + \frac{1}{4}r_B^2 u_z^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}r_B^2 u_z v_z + \frac{3}{4}r_B^2 v_x^2 + \frac{3}{4}r_B^2 v_y^2 + \frac{3}{4}r_B^2 v_z^2 \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}
d_3^2 = & h^2 - hr_B u_z - \sqrt{3}hr_B v_z + r_A^2 - \frac{1}{2}r_A r_B u_x - \frac{\sqrt{3}}{2}r_A r_B u_y - \frac{\sqrt{3}}{2}r_A r_B v_x - \frac{3}{2}r_A r_B v_y + \\
& \frac{1}{4}r_B^2 u_x^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}r_B^2 u_x v_x + \frac{1}{4}r_B^2 u_y^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}r_B^2 u_y v_y + \frac{1}{4}r_B^2 u_z^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}r_B^2 u_z v_z + \frac{3}{4}r_B^2 v_x^2 + \\
& \frac{3}{4}r_B^2 v_y^2 + \frac{3}{4}r_B^2 v_z^2
\end{aligned} \tag{2.22}$$

2.3 Actuadores en la robótica paralela.

Los actuadores son los dispositivos encargados de producir las fuerzas y/o torques en las estructuras mecánicas para generar el movimiento, esta fuerza puede ser generada básicamente a partir de sistemas hidráulicos, eléctricos y neumáticos. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da una salida para activar un elemento de control final (como válvulas). En robótica, los actuadores se clasifican de acuerdo a dos criterios fundamentales (Valdez, 2007):

- ✚ Según el tipo de movimiento generado: se encuentran los actuadores lineales, que generan el movimiento de traslación en la misma dirección de la estructura a la cual están conectados.

Los de rotación, que generan el movimiento de rotacional respecto al eje del torque.

- ✚ Según la naturaleza de la fuente primaria de energía: Se dispone de actuadores neumáticos, que desarrollan su potencia a partir del fluido del aire comprimido, actuadores hidráulicos, donde la potencia se basa en el fluido hidráulico presurizado; y los actuadores eléctricos, en los que la potencia se genera a partir de la energía eléctrica (Antonio Barrientos, 1997).

Los accionamientos lineales tradicionales más habituales se pueden dividir en dos grandes grupos: los basados en dinámica de fluidos y los basados en tecnología electromecánica.

2.3.1 Actuadores neumáticos:

Los actuadores neumáticos constituyen una tecnología que se ha venido introduciendo en los robots paralelos que requieren de un posicionamiento continuo, demostrando ser una tecnología barata, de respuesta rápida, con una elevada relación potencia-peso y de fácil mantenimiento. Se les denomina así a

aquellos dispositivos encargados de convertir la energía del aire comprimido en trabajo mecánico. La energía neumática que emplea aire comprimido como fuente de potencia tiene cualidades excelentes, propias del elemento de base (Ernesto Rubio, 2009a, Krejnin, 2006).

Dentro de estas cualidades se puede mencionar la facilidad de transportación y almacenamiento del aire, es limpio, es decir, no produce contaminación, y carece de peligro de combustión o alteración con la temperatura, la rapidez de respuesta del sistema neumático es una de sus principales virtudes, así como su economía una vez instalados.

Aunque estas ventajas son realmente apreciables, es digno destacar que, siendo el aire un fluido compresible, presenta algunas desventajas, como pueden ser los movimientos no uniformes de los pistones cuando se realizan avances lentos con carga aplicada, el encarecimiento de la instalación en general y el mantenimiento del aire en buenas condiciones es costoso.

En los cilindros neumáticos se consigue el desplazamiento del émbolo encerrado en un cilindro, como consecuencia de la diferencia de presión a ambos lados del mismo. Los cilindros neumáticos pueden ser de simple o doble efecto. En los primeros, el émbolo se desplaza en un sentido como resultado del empuje ejercido por el aire a presión, mientras que en el otro sentido se desplaza como resultado de la acción de un muelle que lo devuelve a su posición de equilibrio.

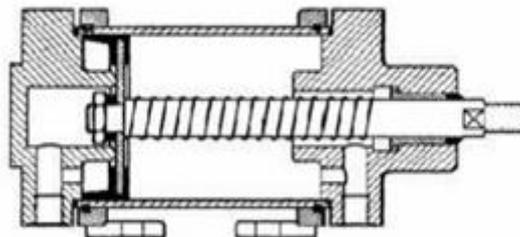


Figura 2.7: Cilindro de simple efecto.

También en los de doble efecto se puede lograr el movimiento en ambos sentidos al poder ser introducido arbitrariamente en cualquiera de las dos cámaras, esto se puede conseguir con una válvula de distribución accionada

eléctricamente que conduce el flujo de aire hacia ambas cámaras del cilindro alternativamente (Antonio Barrientos, 1997).

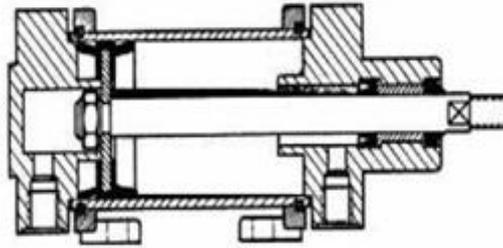


Figura 2.8: Cilindro de doble efecto.

En la actualidad el desarrollo de la neumática tiene diversas áreas de investigación enfocadas en la mejora del desempeño de los accionamientos; se pueden mencionar como elementos importantes, el desarrollo de actuadores donde la fricción es reducida y a la vez, provea gran versatilidad, así como la optimización de los componentes que conforman el sistema neumático, con especial énfasis en la reducción del tamaño de los diferentes elementos que lo conforman (válvulas y actuadores).

2.3.2 Actuadores hidráulicos:

Se basan, para su funcionamiento, en la presión ejercida por un líquido, generalmente un tipo de aceite y se emplean cuando lo que se necesita es potencia, es decir, en aplicaciones donde la fuerza de empuje del pistón y su desplazamiento son elevados. Las máquinas que normalmente se encuentran conformadas por actuadores hidráulicos tienen mayor velocidad y mayor resistencia mecánica y son de gran tamaño, por ello, son usados para aplicaciones donde requieran de una carga pesada. Es de vital importancia que el sistema hidráulico se encuentre sellado herméticamente para garantizar que no se produzca ningún derramamiento del líquido que contiene.

Altos índices entre potencia y carga, mayor exactitud, una respuesta de mayor frecuencia, un suave desempeño a bajas velocidades, un amplio rango de velocidad y una mayor producción de fuerzas con respecto a un sistema neumático del mismo tamaño, son algunas de las ventajas apreciables que brindan estos accionamientos.

A pesar de brindar buenos rendimientos, se asocian a ellos una serie de desventajas, algunas debido a las elevadas presiones a las que se trabajan, estas instalaciones suelen ser más complicadas que las necesarias para actuadores neumáticos y mucho más que para los eléctricos, necesitando de equipos de filtrado de partículas, eliminación de aire, sistemas de refrigeración y unidades de control de distribución.

El principal inconveniente de esta tecnología son sus requerimientos a nivel de instalación. La máquina tiene dependencia absoluta de un suministro externo de fluido (red o compresor individual) y de sus fluctuaciones. Además, su diseño requiere de múltiples componentes cuya instalación no siempre es fácil y rápida (filtros, manómetros, reguladores, electroválvulas, tubos, silenciadores, etc) y que incrementan las probabilidades de parada por avería.

Factores como la presencia de aceite en la red de fluido (incluso en la red neumática), hacen que estos accionamientos suelen denominarse o considerarse “sucios”, lo cual es inaceptable si hay algún riesgo contaminación del producto, especialmente en sectores como alimentación o farmacéutico. Por otra parte, este tipo de instalación genera también una alta polución acústica, razón por la cual no es una opción a emplear en entornos residenciales, comerciales u hospitalarios.

2.3.3 Accionamientos electromecánicos clásicos:

Los actuadores eléctricos o accionamientos basados en motor eléctrico, son los más extendidos y muy utilizados en aplicaciones de automatización y robótica, gracias a la fácil disponibilidad de la energía eléctrica a través de las redes de distribución.

Permiten llevar a cabo un control adecuado de todas las magnitudes físicas necesarias en el movimiento (posición, velocidad, aceleración y fuerza), donde la precisión va a estar relacionada directamente con la tecnología escogida a la hora de la selección del motor y su etapa de potencia o drive (AC, DC, brushless o paso a paso). Es importante que los accionamientos efectúen movimientos rápidos y precisos, por lo que usualmente se utilizan servomotores, cuya característica mecánica (par motor) es aproximadamente constante con la velocidad y regulable con la señal de mando.

Presentan una gran versatilidad debido a la utilización de cables eléctricos para transmitir las señales de control y la propia electricidad, por lo que prácticamente no existe restricción alguna respecto a la distancia entre la fuente de poder y el actuador.

Los motores son dentro de las variantes eléctricas los más utilizados. Dentro de ellos se encuentran los de corriente alterna, dígame monofásicos o trifásicos, los motores de corriente continua, que pueden encontrarse bobinados en derivación, bobinados en serie o con excitación independiente, los motores paso a paso, los servomotores y los motores universales.

2.3.3.1 Motores Lineales.

Una variante de actuadores lineales lo constituyen los motores lineales, los que pueden tomar diferentes tipos: planos, de simple y doble capa y tubulares.

La gran ventaja que conlleva la aplicación de estas máquinas se relaciona con la posibilidad de eliminar los elementos de transmisión mecánica, que debido a su elasticidad, hacen que los accionamientos se comporten con una naturaleza oscilatoria, razón por la cual se limita la dinámica y la ganancia del factor K_v . En este caso, la transmisión de la fuerza se realiza directamente por el campo magnético.

Transformación topológica de un motor rotativo en un motor lineal.

Para comprender la transformación topológica de un motor rotatorio en lineal, se puede seccionar por un semiplano axial las coronas magnéticas, tanto del estator como del rotor, de un motor de jaula de ardilla y a continuación desenrollarlo encima de un plano.



Figura 2.9: Transformación topológica de un motor de inducción rotativo en un motor lineal plano.

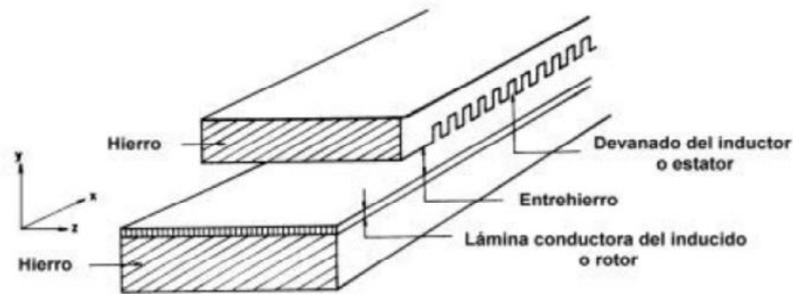


Figura 2.10: Motor lineal de inducción plano de simple inductor con una lámina conductora sólida como inducido con material ferromagnético para disminuir la reluctancia magnética.

Si posteriormente las dos láminas se enrollan sobre el eje longitudinal, se tendrá como resultado un motor tubular lineal. El esquema de este proceso puede ser observado a continuación.

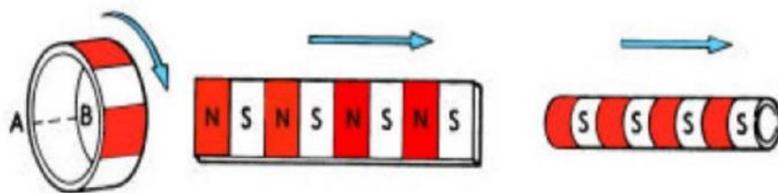


Figura 2.11: Motor de un motor lineal tubular.

En el modelo anterior, al encerrarse las corrientes sobre sí mismas, se soluciona el problema de las cabezas de bobina.

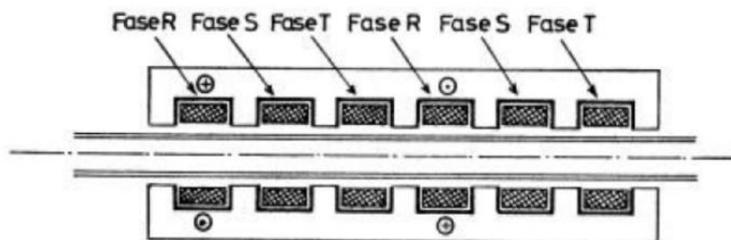


Figura 2.12: Motor lineal tubular trifásico.

En el caso de un motor lineal trifásico, el devanado está formado por bobinas toroidales alojadas en ranura radiales, una por bobina, practicadas en el interior de un tubo de material magnético.

Conectando las bobinas a un sistema trifásico de forma que sean recorridas sucesivamente por corrientes de sentido inverso, en el interior del tubo se tendrá un campo alternativo deslizante a lo largo del tubo. Si en el interior de este tubo se coloca un anillo conductor, las corrientes inducidas bajo la acción del campo magnético darán origen a fuerzas electromagnéticas que tenderán a desplazarlo axialmente.

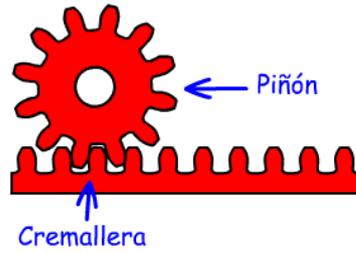
Todas estas tipologías de motores lineales pueden tener diferentes prestaciones modificando los tipos de devanados eléctricos utilizados, pasos polares, número de fases, etc.

Aunque la forma de accionar de manera directa y la posibilidad de variar la velocidad con la variación de la frecuencia, hacen a los motores lineales tubulares ideales para aplicaciones prácticas, aunque desde el punto de vista económico resultan sumamente costosos, por lo que dada la situación económica del país no constituye lógica su selección.

2.3.3.2 Mecanismos de transmisión mecánica en los accionamientos electromecánicos.

Una característica importante en este tipo de accionamientos, es la conversión del movimiento rotativo del motor a un movimiento lineal mediante una transmisión mecánica, que de manera simplificada se puede clasificar en algunos de los siguientes tipos:

- ✓ Piñón-cremallera: se trata de una rueda dentada (piñón), que se hace engranar con una barra dentada (cremallera), es un mecanismo que transforma el movimiento de circular a lineal y viceversa, es de alta velocidad, con una fuerza y precisión moderada.



Mecanismo piñón-cremallera

Figura 2.13: Mecanismo piñón cremallera.

- ✓ Levas: permite convertir un movimiento rotativo en un movimiento lineal, pero no de forma inversa. Está compuesto por una leva (pieza de contorno especial que recibe el movimiento rotativo a través del eje motriz) y de un elemento seguidor que está permanentemente en contacto con la leva gracias a la acción de un muelle.

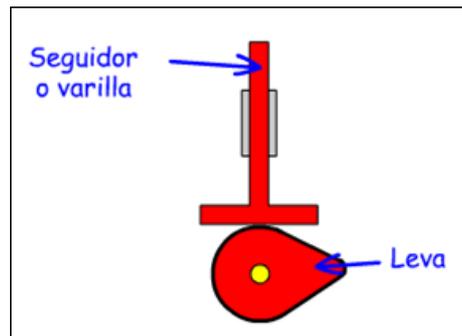


Figura 2.14: Mecanismo de leva.

- ✓ Biela-manivela: el movimiento de rotación de una manivela o cigüeñal provoca el movimiento rectilíneo, alternativo, de un pistón o émbolo. Una biela sirve para unir las dos piezas. Con la ayuda de un empujón inicial, el movimiento alternativo del pistón se convierte en circular de la manivela. El movimiento rectilíneo es posible gracias a una guía o cilindro, en el cual se mueve; este mecanismo es muy usado en los motores de muchos vehículos.

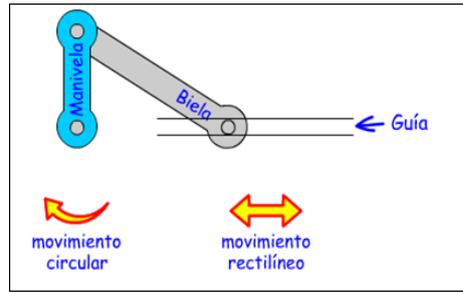


Figura 2.15: Mecanismo Biela manivela.

El recorrido máximo que efectúa el pistón se denomina “carrera del pistón”, los puntos extremos corresponden a dos posiciones diametralmente opuestas de la manivela. Por lo tanto, el brazo de la manivela (distancia del eje al punto de unión con la biela) equivale a la mitad de la carrera del pistón. El pistón completa dos carreras por cada vuelta de la manivela.

La velocidad máxima del pistón es otro elemento y su cálculo es más complicado, y depende básicamente de la longitud de la biela. Cuando la biela es bastante mayor que el brazo de la manivela, la máxima velocidad se produce aproximadamente a medio recorrido.

2.4 Análisis dinámico de un mecanismo Manivela-Biela-Pistón.

A continuación se muestran los vectores que representan las fuerzas que actúan en un mecanismo manivela-biela-pistón, de acuerdo con su forma de trabajo.

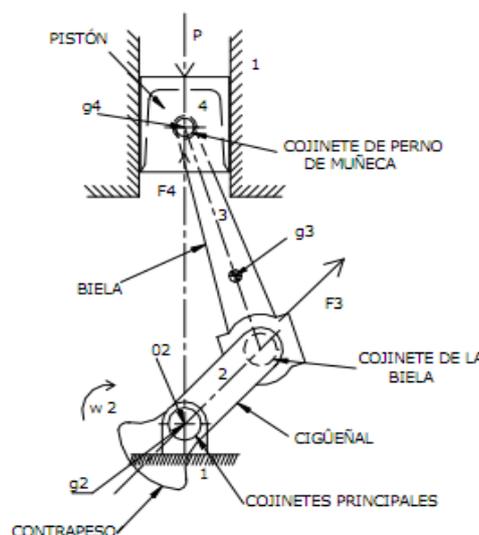


Figura 2.16: Fuerzas principales de un mecanismo Manivela-Biela-Pistón.

La fuerza P es producto del gas estático y actúa sobre el pistón. F_3 y F_4 que actúan en la biela y el pistón, respectivamente, y se conocen como dinámicas, y la fuerza de inercia F_2 en la manivela es igual a cero debido a que es usual balancear la manivela de manera que el centro de masa (g_2) esté en el eje de rotación O_2 .

En la figura que se verá a continuación, se muestran los vectores que representan todas las fuerzas que se desarrollan en el mecanismo manivela-biela-pistón, considerando el método de masas puntuales.

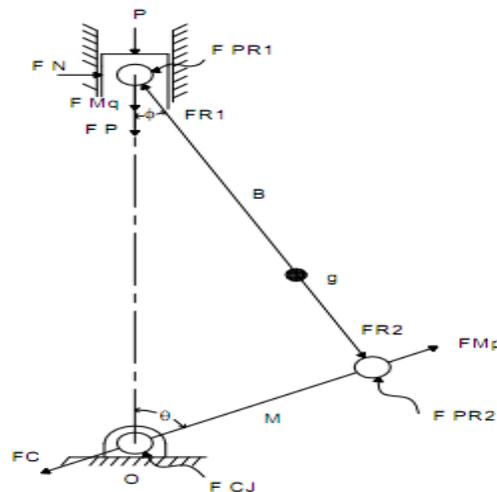


Figura 2.17: Diagrama de cuerpo libre de los vectores de fuerza de un mecanismo manivela-biela-pistón.

De la figura anterior, se describen algunas de las fuerzas que actúan sobre el mecanismo:

- ✚ Como se mencionó anteriormente, P es la fuerza del gas que actúa sobre el pistón.
- ✚ F_N , es la fuerza normal del pistón sobre la pared de la cámara.
- ✚ F_{Mq} es la fuerza de la masa puntual M_q , según su magnitud y dirección de aceleración.
- ✚ F_P es la fuerza de la masa del pistón, según su magnitud y dirección de aceleración.

2.5 Consideraciones finales del capítulo.

Para la selección del tipo de actuador, es importante basarse en diferentes criterios, teniendo en cuenta factores tales como la velocidad y precisión de la respuesta, el costo, así como factores ambientales.

Los elementos hidráulicos poseen buena precisión y una fuerza comparativamente superior, sin embargo requieren de una bomba de líquido hidráulico y las conexiones necesarias, lo que se puede catalogar como perjudiciales al medio ambiente de locales asistenciales, así como de muy difícil transportación.

Los elementos neumáticos poseen características alineales y aunque son más limpios, en su operación requieren de un compresor y tuberías de aire, lo que dificulta su utilización con los fines propuestos.

Los actuadores lineales eléctricos son más adecuados porque además de las facilidades de control y el ambiente limpio que promueven, pueden ser trasladados con facilidad, siempre que se disponga de una fuente de energía.

Dentro de los actuadores lineales eléctricos ya estudiados, los construidos por motores tubulares son, en la actualidad, extremadamente caros, del orden de 4000 Euros, lo que aconseja su no uso en el presente proyecto.

Cualquiera de los restantes puede ser utilizado, ya que no son difíciles de construir, requiriéndose motores de poca potencia. En dicho caso, se ha decidido apostar por el actuador biela pistón, mecanismo de accionamiento.

Capítulo 3: Diseño y Simulación del Prototipo

3.1 Introducción al capítulo.

Una vez analizados las diferentes variantes de accionamientos lineales y la decisión de utilizar el mecanismo Biela-Pistón-Manivela, es necesario determinar sus dimensiones, cinemática y dinámica, así como los momentos que debe realizar y de estos, la potencia requerida por el motor.

Datos Preliminares.

Recorrido máximo = 150mm

Carga estática = 3000 N

Velocidad máxima = 40 mm/s = 0.04 m/s

Considerando barras de aluminio de 10 mm de diámetro con densidad de 2700 kg/m³.

El radio del volante $r = 75 \text{ mm} = 0.075\text{m}$

Longitud de la varilla mayor que $2r = 300 \text{ mm} = 0.3 \text{ m}$ (se escogió una longitud igual a $4r$, con esto se garantiza que la biela no choque).

3.2 Análisis geométrico.

Para el análisis que se llevará a cabo a continuación, se considera la manivela en una posición horizontal, o sea, con la biela a 90^0 como puede observarse en la figura. En esta posición es que se alcanza la máxima velocidad así como la máxima potencia.

Movimientos:

\overline{OA} – Movimiento de Rotación (se efectúa mediante la manivela).

\overline{AP} – Movimiento en el plano (R + T, efectuados por la biela).

P – Traslación.

$\overline{OA} = 0.075 \text{ m}$

$\overline{AP} = 0.3 \text{ m}$

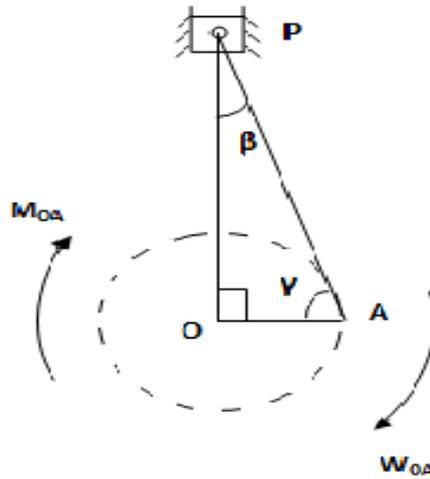


Figura 3. 1: Posición de máxima velocidad y máxima potencia del mecanismo.

Aplicando la Ley de los Senos se procede a la búsqueda de los ángulos que conforman el triángulo rectángulo y se tiene:

$$\frac{\overline{AP}}{\sin 90^\circ} = \frac{\overline{OA}}{\sin \beta} = \frac{\overline{OP}}{\sin \gamma} \quad (3.1)$$

$$\sin \beta = \frac{\overline{OA} \sin 90^\circ}{\overline{AP}} = \frac{0.075}{0.3} = 0.25 \quad (3.2)$$

$$\beta = \sin^{-1} 0.25 = 14.5^\circ \quad (3.3)$$

$$\gamma = 180^\circ - 90^\circ - 14.5^\circ = 75.5^\circ \quad (3.4)$$

3.3 Análisis de velocidades.

Para el análisis de las velocidades se aplicará el Método Gráfico Analítico.

G₁- Centro de masa de la barra \overline{OA} .

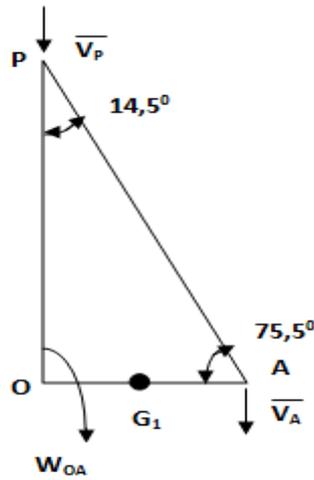


Figura 3. 2: Diagrama para el análisis de velocidades.

Las siguientes ecuaciones se conocen:

$$\vec{V}_P = \vec{V}_A + \vec{V}_{P/A} \quad (3.5)$$

$$\vec{V}_P = V_{m\acute{a}x} = 0.04 \text{ m/s} \quad (3.6)$$

$$\vec{V}_A = W_{OA} * \vec{OA} \quad (3.7)$$

Luego, del polígono de velocidades:

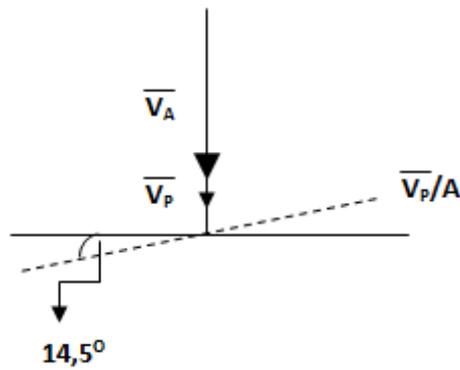


Figura 3. 3: Polígono de velocidades.

$$\vec{V}_P = \vec{V}_A = 0.04 \text{ m/s} \quad (3.8)$$

La igualdad anterior se establece debido a que $\vec{V}_{P/A} = 0$ porque la velocidad W_{AP} es cero.

Entonces:

$$W_{OA} = \frac{\vec{V}_P}{OA} = \frac{0.04}{0.075} = 0.53 \text{ rad/s} \quad (3.9)$$

Como el centro de masa de la manivela G_1 se encuentra en el centro de la misma, entonces su velocidad va a ser la mitad de \vec{V}_A :

$$\vec{V}_{G1} = \frac{\vec{V}_A}{2} = 0.02 \text{ m/s} \quad (3.10)$$

Resumen analítico de velocidades.

$$\vec{V}_A = 0.04 \text{ m/s} \quad (3.11)$$

$$\vec{W}_{OA} = 0.53 \text{ rad/s} \quad (3.12)$$

$$\vec{V}_{P/A} = 0 \quad (3.13)$$

$$\vec{W}_{A/P} = 0 \quad (3.14)$$

$$\vec{V}_{G1} = 0.02 \text{ m/s} \quad (3.15)$$

El sentido de \vec{V}_A es perpendicular a la manivela, en la posición en que se realiza el análisis, coincide con el eje y , pero es un vector que cambia su sentido en dependencia del movimiento de la manivela.

De manera similar, \vec{V}_{G1} va a cambiar su sentido en dependencia del movimiento del mecanismo.

Por otra parte, \vec{W}_{OA} es un vector perpendicular al plano del movimiento mecánico y en la posición del análisis su dirección es a favor de las manecillas del reloj.

3.4 Análisis de aceleraciones.

Para el análisis de aceleraciones se procede de forma similar a como se hizo en el análisis de velocidades, para ello hay que apoyarse en la siguiente figura:

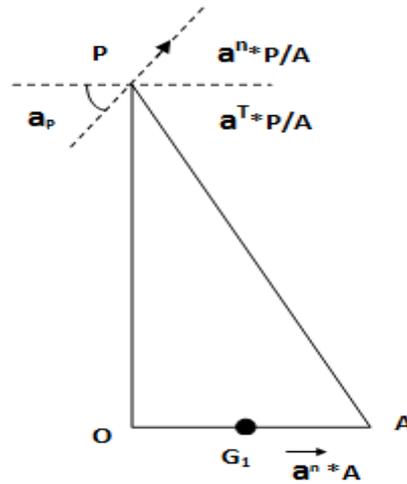


Figura 3. 4: Diagrama para el análisis de aceleraciones.

De forma similar a como se obtuvo la ecuación de \vec{V}_p se conoce que:

$$\vec{a}_p = \vec{a}_A + \vec{a}_{p/A} \quad (3.16)$$

La aceleración \vec{a}_p se tiene en un movimiento de traslación ya que corresponde al pistón que efectúa un movimiento vertical y solamente puede trasladarse hacia arriba o hacia abajo, \vec{a}_A se efectúa en un movimiento de rotación el cual es efectuado por la manivela, mientras que $\vec{a}_{p/A}$ es un movimiento plano, es decir, se describen movimientos de traslación y de rotación que son efectuados por la biela.

Tanto la \vec{a}_A como $\vec{a}_{p/A}$ tienen dos componentes, una componente normal y tangencial, esto puede observarse a continuación:

$$\vec{a}_p = \vec{a}_A^n + \vec{a}_A^T + \vec{a}_{p/A}^n + \vec{a}_{p/A}^T \quad (3.17)$$

La aceleración tangencial de **A** se calcula de la siguiente forma:

$$\vec{a}_A^T = \alpha_{OA} * \overline{OA} \quad (3.18)$$

Pero el término α_{OA} es igual a cero debido a que la velocidad W_{OA} va a ser constante, por tanto, la aceleración tangencial de **A** es igual a cero.

Por otro lado, la aceleración normal de **P** respecto a **A** se calcula como se observa:

$$\vec{a}_{P/A}^n = w_{AP}^2 * \overline{AP} \quad (3.19)$$

Pero en la posición horizontal de la manivela (posición en que se desarrolla en análisis) la velocidad w_{AP} es igual a cero y por tanto, la aceleración tangencial de **P** respecto a **A** también se hace cero.

De modo que, la aceleración en el punto **P** se determina de la siguiente forma:

$$\vec{a}_P = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{P/A}^T \quad (3.20)$$

$$\vec{a}_A^n = W_{OA}^2 * \overline{OA} = 0.021 \text{ m/s}^2 \quad (3.21)$$

$$\vec{a}_{P/A}^T = \alpha_{AP} * \overline{AP} \quad (3.22)$$

A continuación se muestra el polígono de aceleraciones:

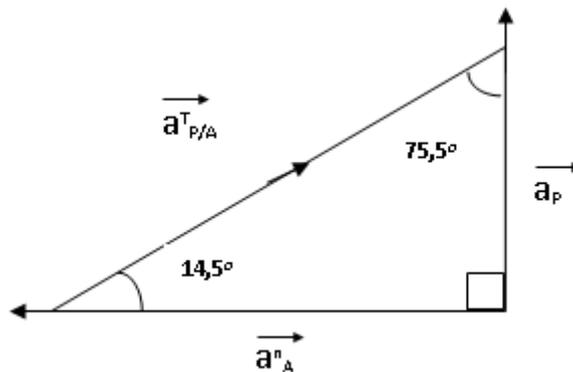


Figura 3. 5: Polígono de aceleraciones.

Del polígono de aceleraciones se observa que el sentido de la aceleración normal de **A** es hacia la izquierda debido a que siempre tiene que ir hacia el centro de rotación y la aceleración tangencial de **P** respecto a **A** es siempre perpendicular a \overline{AP} , también es importante destacar que el sentido de la aceleración de **P** es contrario al de su velocidad.

Luego aplicando la Ley de los Senos pueden calcularse los demás parámetros necesarios y se tiene:

$$\frac{\vec{a}_{P/A}^T}{\sin(90^\circ)} = \frac{\vec{a}_A^n}{\sin(75.5^\circ)} = \frac{\vec{a}_P}{\sin(14.5^\circ)} \quad (3.23)$$

$$\vec{a}_{P/A}^T = \frac{\vec{a}_A^n * \sin(90^\circ)}{\sin(75.5^\circ)} \rightarrow \vec{a}_{P/A}^T = 0.021 \text{ m/s}^2 \quad (3.24)$$

$$\vec{a}_P = \frac{\vec{a}_A^n * \sin(14.5^\circ)}{\sin(75.5^\circ)} = \frac{0.021 * 0.25}{0.968} = 0.0054 \text{ m/s}^2 \quad (3.25)$$

$$\vec{a}_{G1} = \frac{\vec{a}_A^n}{2} = 0.0105 \text{ m/s}^2 \quad (3.26)$$

$$\alpha_{AP} = \frac{\vec{a}_{P/A}^T}{AP} = \frac{0.021}{0.3} = 0.07 \text{ rad/s}^2$$

3.4.1 Cálculo de las aceleraciones del centro de masa de la biela:

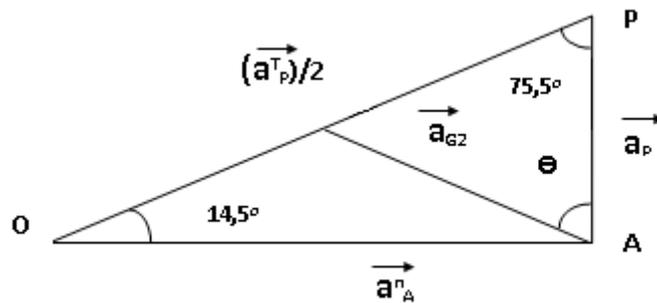


Figura 3. 6: Diagrama para al cálculo de las aceleraciones del centro de masa de la biela.

Luego se calculan los demás parámetro utilizando la Ley de los Cosenos y se tiene:

$$\vec{a}_{G2} = \sqrt{\left(\frac{\vec{a}_{P/A}^T}{2}\right)^2 + \vec{a}_P^2 - \left(\frac{\vec{a}_{P/A}^T}{2}\right) * \vec{a}_P \cos(75.5^\circ)} \quad (3.28)$$

$$\vec{a}_{G2} = \sqrt{\left(\frac{0.021}{2}\right)^2 + (0.0054)^2 - \left(\frac{0.021}{2}\right) * (0.0054) * (0.25)} \quad (3.29)$$

$$\vec{a}_{G2} = 0.01 \text{ m/s}^2 \quad (3.30)$$

Luego mediante la Ley de los Senos se calcula el ángulo θ :

$$\sin \theta = \frac{\frac{\vec{a}_{P/A}^T * \sin(75.5^\circ)}{2}}{\vec{a}_{G2}} = \frac{\left(\frac{0.01}{2}\right) * (0.96)}{0.01} = 0.48 \quad (3.31)$$

$$\theta = \sin^{-1}(0.48) = 28.68^\circ \quad (3.32)$$

Resumen de aceleraciones.

$$\vec{a}_P = 0.0054 \text{ m/s}^2$$

$$\vec{a}_A^n = 0.021 \text{ m/s}^2$$

$$\vec{a}_{P/A}^T = 0.021 \text{ m/s}^2$$

$$\alpha_{AP} = 0.07 \text{ rad/s}^2$$

$$\vec{a}_{G1} = 0.0105 \text{ m/s}^2$$

$$\vec{a}_{G2} = 0.01 \text{ m/s}^2$$

El sentido de \vec{a}_P coincide con el eje y , ya que representa la aceleración del pistón describiendo un movimiento vertical.

Teniendo en cuenta la posición del análisis, la componente normal de la aceleración es en el sentido del eje x y la componente tangencial como tiene que ser siempre perpendicular a la componente normal, es en el sentido del eje

y , pero son magnitudes que cambian de sentido en dependencia del movimiento efectuado.

Es importante destacar que todas las multiplicaciones que se realizan en los análisis de velocidades y aceleraciones constituyen un producto escalar.

3.5 Cálculo de la masa de los elementos.

3.5.1 Para la manivela:

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron barras de aluminio de 10 mm de diámetro.

Densidad $\delta = 2700$

$$\overline{OA} = 0.075 \text{ m}$$

$$V = \pi * r^2 * h = \pi * (0.01)^2 * (0.075) = 0.23 * 10^{-4} m^3 \quad (3.33)$$

$$m_{OA} = \delta * V = 0.23 * 10^{-4} * 2700 = 0.04 \text{ Kg} \quad (3.34)$$

3.5.2 Para la biela:

$$\overline{AP} = 0.3 \text{ m}$$

$$V = \pi * (0.01)^2 * (0.3) = 0.000094 \text{ m}^3 \quad (3.35)$$

$$m_{AP} = \delta * V = 0.000094 * 2700 \quad (3.36)$$

$$m_{AP} = 0.25 \text{ kg} \quad (3.37)$$

3.5.3 Para el pistón:

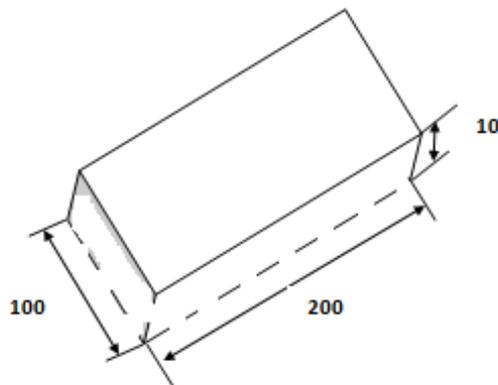


Figura 3. 7: Dimensiones del pistón en milímetros.

$$V = a * b * h \tag{3.38}$$

$$V = (0.1) * (0.2) * (0.01) = 0.0002 \text{ m}^3 \tag{3.39}$$

$$m_p = \delta * V = 2 * 10^{-4} * 2700 = 0.54 \text{ Kg} \tag{3.40}$$

3.6 Cálculo de las fuerzas (análisis dinámico).

Para la realización del análisis dinámico se hace necesaria la aplicación de la Segunda Ley de Newton $F = m * \vec{a}$.

3.6.1 Manivela (elemento \overline{OA}).

El momento de inercia de masa de la manivela se calcula de la siguiente forma:

$$I_{OA} = \frac{1}{12} m_{OA} * l^2 \tag{3.41}$$

La figura que se muestra a continuación muestra el efecto que causa el bastidor (dígase motor) y la biela sobre la manivela, expresada en forma de igualdad:

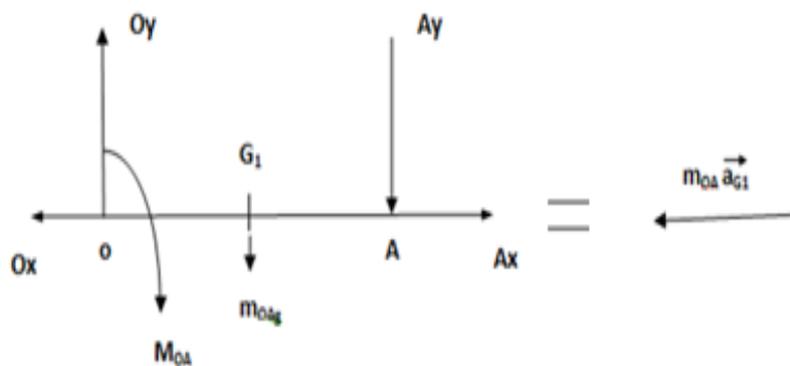


Figura 3. 8: Efecto del motor y de la biela sobre la manivela para el análisis de fuerzas.

Primeramente se efectúa una suma de los momentos que se desarrollan siendo positivos aquellos que se efectúan a favor de las manecillas del reloj, quedando:

$$\sum M_O = I_{OA} * \alpha_{OA} \tag{3.42}$$

Como se observó anteriormente en el análisis de aceleraciones, α_{OA} es igual a cero y por tanto la sumatoria de los momentos que se producen queda como se tiene a continuación:

$$\sum M_O = 0 \quad (3.43)$$

$$M_{OA} + m_{OA} * g * \left(\frac{\overline{OA}}{2}\right) + A_y * (\overline{OA}) = 0 \quad (3.44)$$

$$M_{OA} + (0.06) * (9.81) * \left(\frac{0.075}{2}\right) + 0.075 * A_y = 0 \quad (3.45)$$

$$M_{OA} + 0.022 + 0.075 * A_y = 0 \quad (1) \quad (3.46)$$

Luego se realiza una sumatoria de fuerzas en el eje x estableciéndose como convenio que las fuerzas hacia la derecha se consideran positivas y se tiene:

$$\sum F_x = m * \vec{a}_x \quad (3.47)$$

$$A_x - O_x = -m_{OA} * \vec{a}_{G1} \quad (3.48)$$

$$A_x - O_x = 0.06 * 0.0027 \quad (3.49)$$

$$A_x - O_x = 0.00016 \quad (2) \quad (3.40)$$

De manera similar se realiza la sumatoria de las fuerzas en el eje y estableciéndose como positivas las que se producen hacia arriba y se tiene que:

$$\sum F_y = m * \vec{a}_y \quad (3.41)$$

Como en el eje no hay aceleración, la aplicación de la Segunda Ley de Newton quedaría como se muestra:

$$\sum F_y = 0 \quad (3.42)$$

$$O_y - A_y - m_{OA} * g = 0 \quad (3.43)$$

$$O_y - A_y - 0.06 * 9.81 = 0 \quad (3.44)$$

$$O_y - A_y = 0.58 \quad (3) \quad (3.45)$$

Como se ha podido observar, se tienen tres ecuaciones con cinco incógnitas, por lo que no es posible encontrar los valores de las mismas, lo que hace necesario realizar el mismo análisis en la biela.

3.6.2 Para la biela (elemento \overline{AP}):

El momento de inercia de masa de la biela se calcula como se muestra:

$$I_G = \frac{1}{12} * m_{AP} * l^2 = \frac{1}{12} * (0.25) * (0.3)^2 \quad (3.46)$$

$$I_G = 0.0018 \text{ kgm}^2 \quad (3.47)$$

Al igual que en la manivela se realiza una sumatoria de los momentos generados y de manera similar se establecen como positivos los que son en el sentido de las manecillas del reloj, quedando:

$$\sum M_{G2} = I_G * \alpha_{AP} \quad (3.48)$$

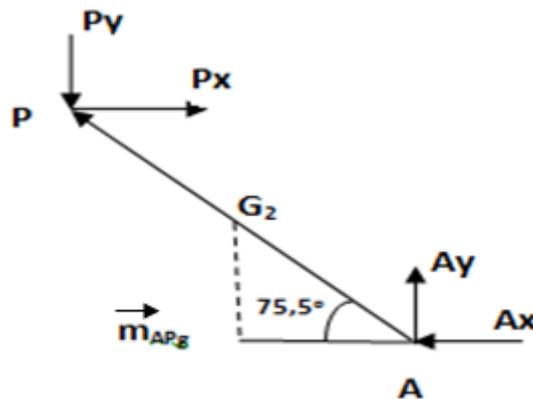


Figura 3. 9: Efectos sobre la biela para el análisis de fuerzas.

En la figura anterior se observa que el sentido de A_y y A_x es diferente al que tenían cuando se analizaron las fuerzas en la manivela, esto se debe a que si se ponen con un sentido en la manivela, entonces en la biela hay que ponerle el sentido contrario.

$$A_x * \left(\frac{AP}{2}\right) * \sin(75.5^\circ) + P_x \left(\frac{AP}{2}\right) * \sin(75.5^\circ) - P_y \left(\frac{AP}{2}\right) \cos(75.5^\circ) - A_y \left(\frac{AP}{2}\right) \cos(75.5^\circ) = I_G * \alpha_{AP} \quad (3.49)$$

$$0.14A_x + 0.14P_x - 0.03P_y - 0.03A_y = 0.0018 * (0.07) \quad (3.50)$$

$$0.14A_x + 0.14P_y - 0.03P_y - 0.03A_y = 0.00012 \quad (4) \quad (3.51)$$

Realizando la sumatoria de las fuerzas en el eje x, estableciendo como positivas aquellas que van hacia la izquierda se tiene:

$$\sum F_x = m_{AP} * \vec{a}_{G2x} \tag{3.52}$$

$$A_x - P_x = m_{AP} * \vec{a}_{G2} * \sin(28.68^\circ) \tag{3.53}$$

$$A_x - P_x = 0.25 * 0.01 * 0.47 \tag{3.54}$$

$$A_x - P_x = 0.001 \tag{5} \tag{3.55}$$

En el eje y se realiza también la sumatoria de fuerzas y se establecen positivas las que van hacia arriba y se tiene:

$$\sum F_y = m_{AP} * \vec{a}_{G2y} \tag{3.56}$$

$$A_y - P_y - m_{AP}g = m_{AP} \vec{a}_{G2} * \cos(28.68) \tag{3.57}$$

$$A_y - P_y - 0.25 * 9.81 = 0.25 * 0.01 * 0.87 \tag{3.58}$$

$$A_y - P_y = 2.44 \tag{6} \tag{3.59}$$

3.6.3 Para el pistón:

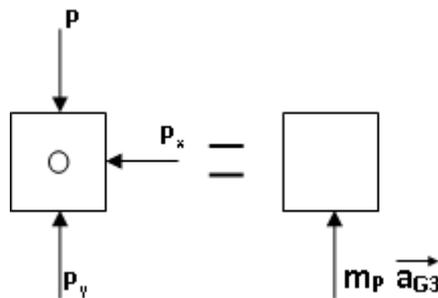


Figura 3.10: Efectos sobre el pistón para el análisis de fuerzas.

De manera similar, el sentido de P_y y P_x es contrario al que tenían en el análisis anterior.

$$\sum F_x = 0 \tag{3.60}$$

Como en x solamente se encuentra la fuerza P_x y es igual a cero, entonces no se producen fuerzas en este eje.

Para el análisis de las fuerzas en el eje y , igualmente se toman como positivas las que se desarrollan hacia arriba y se tiene:

$$\sum F_y = m_p * \vec{a}_{G3} \quad (3.61)$$

$$P_y - P = m_p \vec{a}_{G3} \quad (3.62)$$

$$P_y - 3000 = 0.54 * 0.0054 \quad (3.63)$$

$$P_y \approx 3000 \text{ N} \quad (3.64)$$

Sustituyendo P_y en 6 se tiene:

$$A_y - P_y = 2.44 \quad (3.65)$$

$$A_y = 3002.44 \text{ N} \quad (3.66)$$

Luego se sustituye A_y en 1 y queda:

$$M_{OA} + 0.022 + 0.075 * A_y = 0 \quad (3.67)$$

$$M_{OA} = 225.05 \text{ N} * m \quad (3.68)$$

3.7 Cálculo de la potencia requerida P.

$$P = M_{OA} * W_{OA} \quad (3.69)$$

$$P = 225.05 * 0.53 \quad (3.70)$$

$$P = 119.25 \text{ N} * m/s \quad (3.71)$$

$$P = 120 \text{ N} * m/s \quad (3.72)$$

$$P = 120 \text{ W} \quad (3.73)$$

Luego para buscar las revoluciones necesarias se utiliza la siguiente ecuación:

$$w = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.74)$$

$$n = \frac{60 * w}{2\pi} = \frac{60 * 0.53}{6.28} = 5.06 \text{ rpm} \quad (3.75)$$

Por tanto, se requiere un motor de 120 watt, con un reductor que proporcione a la salida 5.06 rpm, este reductor se utiliza porque un motor que proporcione la potencia necesaria posee revoluciones mucho mayor que la que se necesita, entonces con el reductor se garantiza que las revoluciones no sobrepasen lo requerido.

El motor que se ha seleccionado para el mecanismo es un motor Gearmotor de corriente directa marca Leeson (figura 3.11), el cual posee la capacidad de reducir las revoluciones mediante un mecanismo que trae acoplado, con una relación de 20 a 1. Algunas de sus características se muestran a continuación:

Potencia- $\frac{1}{4}$ hp.

Corriente- 2.3 A.

Voltaje- 90 V.

Revoluciones- 125 rpm.

Precio- 339.95 USD.



Figura 3.11: Motor Leeson de corriente directa.

3.8 Propuesta del Sistema Mecánico.

El objetivo principal del sistema mecánico es proporcionar movimientos giratorios a la plataforma móvil del robot paralelo mediante el uso del mecanismo biela-pistón-manivela. Para lograr un diseño correcto del mecanismo se necesita realizar un análisis de los diferentes parámetros utilizados por él.

El sistema mecánico está compuesto básicamente por los siguientes puntos:

Mecanismos biela-pistón-manivela.

Dos bases (placas), una fija y una móvil.

Eslabones para unir las bases fija y móvil.

Uniones esféricas que permitan proporcionar los movimientos giratorios.

3.8.1 Diseño de componentes.

El objetivo principal del efector final del prototipo es servir como rehabilitador de tobillo para pacientes con cierto tipo de lesiones, empleando para este objetivo elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos.

Base Fija: Tal y como su nombre lo indica, esta pieza es una placa metálica la cual formará parte del prototipo y su función principal será de mantener fijas las posiciones de los actuadores así como de unir el prototipo al suelo.

Base móvil: Generalmente es llamada efector final, es la pieza que tendrá que variar su posición angular para poder ejercer los movimientos básicos del pie, para lograr la rehabilitación del tobillo del paciente

Mecanismo Biela-Pistón-Manivela: Componente cuyo objetivo será producir a partir de un movimiento rotatorio uno lineal para lograr un desplazamiento angular en la base móvil.

Uniones esféricas: Estas piezas se encargarán de unir los actuadores lineales con la base móvil (efector final) lo cual le dará esa libertad de movimiento a ésta última.

3.9 Prototipo Virtual del Robot Paralelo.

En la figura 1.11 se muestra el diseño realizado con la ayuda del Software Inventor, del robot paralelo que se desarrolló para la rehabilitación del tobillo. El diseño se realizó tomando en cuenta los actuadores que se seleccionaron para el prototipo. Como se puede apreciar el efector final o base móvil, que corresponde a la base en donde se pondrá el pie que soportará el tobillo lesionado, está unido a otra base fija, en la parte inferior, mediante el acoplamiento de los mecanismos biela-manivela con su motor correspondiente. Controlando el ángulo de giro de los motores se podrán proporcionar los

movimientos deseados, dorsi/plantarflexión e inversión/eversión cuando solo actúan dos mecanismos al mismo tiempo.

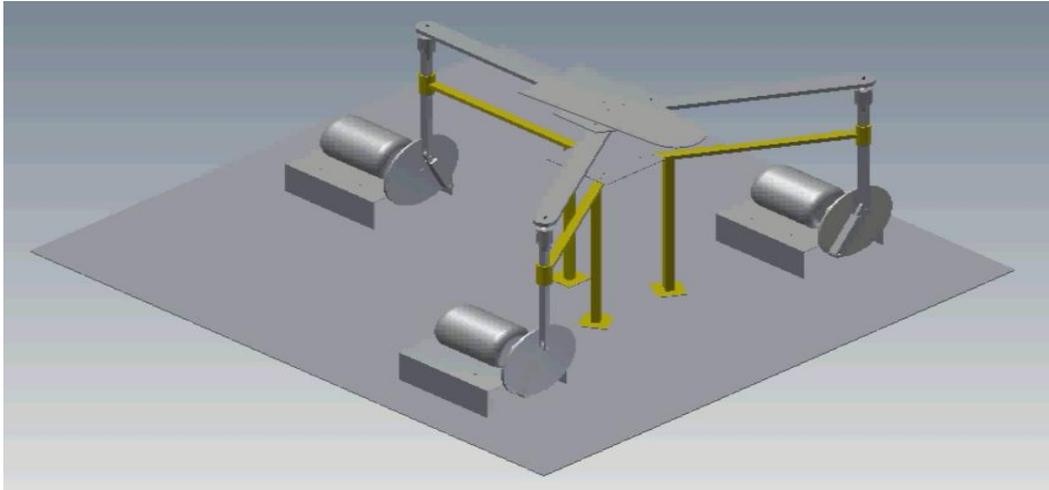


Figura 3.12: Diseño del prototipo en Inventor.

Utilizando el propio software Inventor se realizó una simulación del prototipo virtual para observar los movimientos efectuados por el mismo, esto es mostrado en las figuras a continuación:

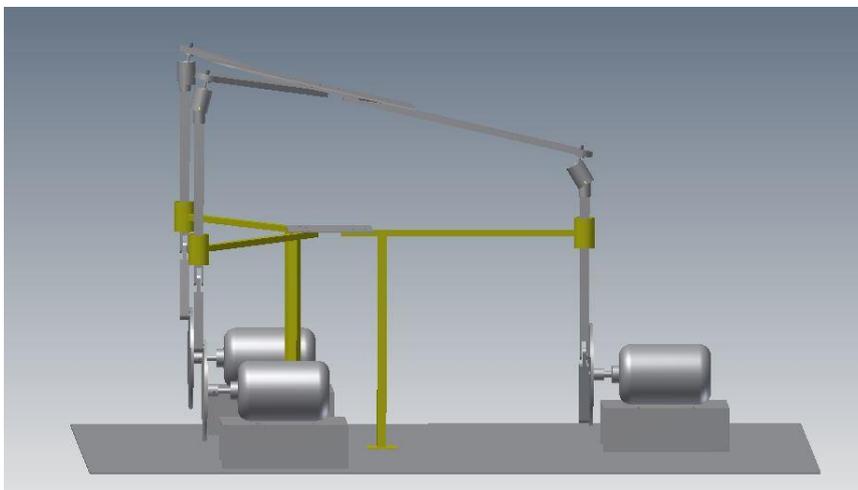


Figura 3.13: Simulación del prototipo con movimientos de dorsiflexión.

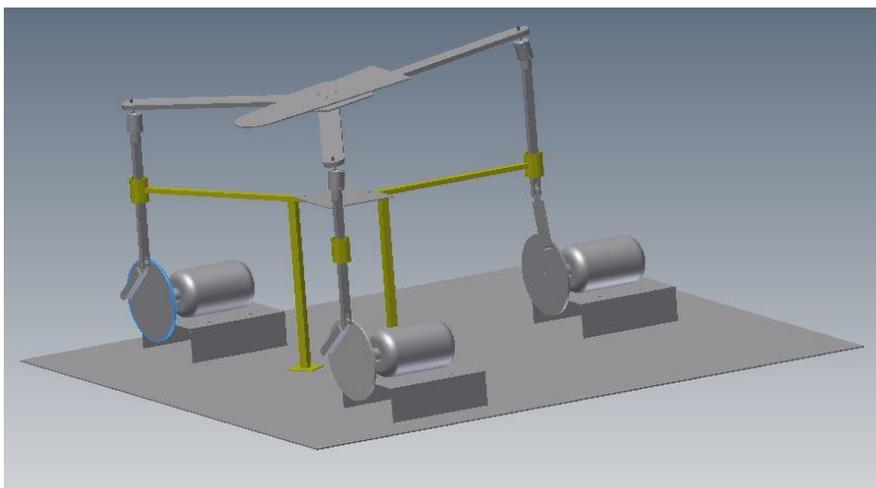


Figura 3.14: Simulación del prototipo con movimientos de plantarflexión.

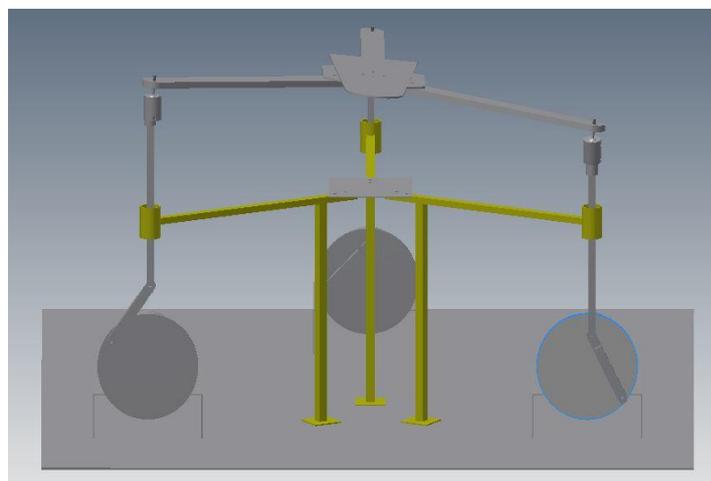
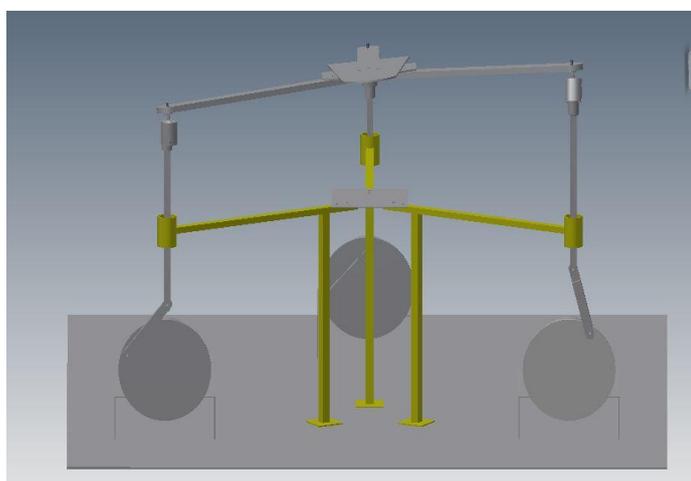


Figura 3.15: Simulación del prototipo con movimientos de eversión-inversión.

Mediante el control de cada uno de los motores será posible obtener los diferentes movimientos y ángulos de giro necesitados en cada una de las etapas de rehabilitación del paciente. El control del robot forma parte de los objetivos propuestos en el presente trabajo, pero se demuestra la posibilidad de obtener los giros necesarios combinando los desplazamientos en el tiempo de cada uno de los motores.

Conclusiones

La elección de un robot paralelo con dos o tres grados de libertad cumple con los requerimientos necesarios para la rehabilitación del tobillo, tanto en amplitud de los movimientos como en los ángulos rotados.

El uso de motores eléctricos acoplados al sistema biela-manivela-pistón es sin lugar a dudas una opción, aunque más compleja, posible de enfrentar en el país, en sustitución de los actuadores lineales que resultan muy costosos.

El método de diseño mecánico, partiendo de los requerimientos, demostró su idoneidad mediante la simulación realizada, ya que el dispositivo es capaz de ejecutar los movimientos necesarios para brindar terapias de rehabilitación.

El costo de construcción se reduce en más de 10 000 USD utilizando la variante presentada en lugar de utilizar actuadores lineales.

Recomendaciones

Desarrollar la construcción del prototipo de robot rehabilitador de tobillo propuesto en la investigación.

Desarrollar el sistema de control necesario para que el prototipo sea capaz de efectuar los movimientos deseados.

Estudiar otras variantes de movimiento lineal que puedan resultar menos complejas y con menor costo.

Estudiar la posibilidad de ampliar el diseño del mecanismo para incorporar el movimiento de abducción y aducción que constituye el tercer movimiento al que se hace referencia en el desarrollo de la tesis.

Referencias bibliográficas.

- ANTONIO BARRIENTOS (2007) *Fundamentos de Robótica. Segunda Edición*, Madrid, McGraw Hill/Interamericana.
- ANTONIO BARRIENTOS, L. F. P., CARLOS BALAGUER, RAFAEL ARACIL. (1997) *Fundamentos de Robótica.*, Madrid, McGraw Hill.
- ARACIL, R., SALTAREN, R. J., SABATER, J. M. & REINOSO, O. (2006) Robots Paralelos: Máquinas con un Pasado para una Robótica del Futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 3, 16-28.
- BASMAJIAN, J. (1994) *Physical Rehabilitation Outcome Measures*. Toronto, Physiotherapy Association in Cooperation with Health and Welfare Canada and Canada Communications Group.
- BEASLEY, R. A. (2012) Medical Robots: Current Systems and Research Directions. *Journal of Robotics*. 2012, 14.
- BODNER, J., WYKPIEL, H., WETSCHER, G. & SCHMID, T. (2004) "First experiences with the Da Vinci operating robot in thoracic surgery". *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, vol. 25, no. 5, pp. 844-851.
- CAPEK, K. (1935) *Rossum's Universal Robots*, Praga.
- CAPEK, K. (1966) *Robots Universales Rossum*, Madrid, Alianza Editorial.
- CARR, J. H. (1987) "Movement and Science: Foundations for Physical Therapy in Rehabilitation." *Aspen Publishers Rockville, MD*.
- CASTELLANOS, E., I. (2012) Control Cinemático en el Espacio de Tareas de Robot Paralelo Neumático en Aplicación de Simulador de Movimiento. *Departamento de Automática y Sistemas Computacionales*. Santa Clara., Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- CECCARELLI, M. (2011) "Problems and issues for service robots in new applications". *Internacional Journal of Social Robotics*, vol. 3, no. 3, pp. 299-312.
- CHEN, J. (1988) The three-Dimensional Kinematics and flexibility characteristics of the human ankle and the subtalar joint. vol. 110, pp. 374-385.
- DETTWYLER, M. (1985) "Modelling of the ankle joint complex". vol. 10, pp. 137-143.
- ERNESTO RUBIO, L. H., RAFAEL ARACIL, R. SALTARÉN AND J. GUERRA (2009a) Implementation of Decoupled Model-Based Controller in a 2-DOF Pneumatic Platform used in Low-Cost Driving Simulators.
- GARCÍA, A. E. G. (2008) "Rehabilitador para tobillo por movimiento pasivo (automatizado)". México, D.F., Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- GOGU, G. (2010) *Structural Synthesis of Parallel Robots.*, London.
- GRAF, B. R., U. (2011) Care-O-Bot® 3. Product Vision of a Robotic Home Assistant.
- GWINNETT, J. E. (1931) Amusement device.
- HAMONET, C. L., HEULEU, J. N. (1990) *Manual de Rehabilitación*". París, Masson.
- HILLMAN, M. (2004) "Rehabilitation robotics from past to present: a historical perspective", in *Advances in Rehabilitation Robotics*

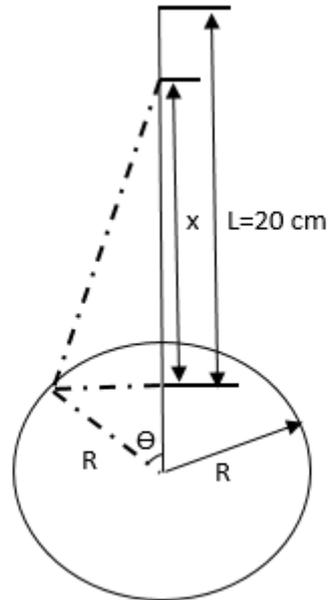
- Springer, New York, USA. pp. 25-44.
- ISAAC ASIMOV, K. A. F. *Robots. Máquinas de imagen y semejanza al hombre.*
- KHODABANDEHLOO, K., BRETT, P. N. & BUCKINGHAM, R. O. (1996) "Special -Purpose Actuators and Architectures for Surgery Robots".
- KREJNIN, G. V. A. I. L. K. (2006) *Pneumatic Actuating Systems for Automatic Equipment. 2nd edition*
- KUEN, Y. Y. (2002) *Geometry, Dynamics and Control of Parallel Manipulators.* Hong Kong University of Science and Technology.
- MARESCAUX, J., LEROY, J & GAGNER, M. (2001) "Transatlantic robot assisted telesurgery". *Nature*, vol. 413, no. 6854. pp. 379-380.
- MERLET, J. P. (1999) *Parallel Robots: Open Problems.*
- MERLET, J. P. (2006) *Parallel Robots*, Springer, France.
- NEIGER, H., GOSSELIN, P., LACOMBA, M. T. (1998) *"Fisioterapia: Técnicas pasivas"*. España, Médica Panamericana.
- NORDIN, M., FRANKEL, V. H. (2001) *"Biomecánica básica del sistema Músculoesquelético"*. España, McGraw Hill.
- O'DISCOLL, S., GIORI, N. (2000) Continuous Passive Motion (CPM): Theory and principles of applications. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol 37. No. 2, pp. 179-188.
- OPENSURG, C. (2013) *Robótica Médica*, Elche, CYTED.
- POLLARD, W. L. V. (1942) Position controlling apparatus.
- REINDERS-MESSELING, H. A., BONGERS, R. M., BOUWSEMA, H. & VAN DER SLUIS, C. K. (2010) "The i-LIMB hand and the DMC plus hand compared: a case report". *Prosthetics and Orthotics International*, vol. 34, no. 2, pp. 216-220.
- RIC. (2013) Robot-Assisted Walking Therapy Using the Lokomat Robot. *Rehabilitation Institute of Chicago.*
- SALTER R., B., FIELD, P. (1960) "The effects of continuous compression on living articular cartilage. An experimental investigation". *Journal of Bone and Joint Surgery*. vol. 42-A, pp. 31-49.
- SCHULZ, R. A., N. (2011) *Shaped-Beam Radiosurgery: State of the Art.* Springer, New York, USA.
- SCIAVICCO, L. A. S., B. (1996) *Modelling and Control of Robot Manipulators* McGraw Hill Company Inc.
- SEYMUR, R., ENGBRETSON, B. & KOTT, K. (2007) "Comparison between the C-leg microprocessor-controller prosthetic knee and non-microprocessor control prosthetic knees: a preliminary study of energy expenditure, obstacle course performance, and quality of life survey". *Prosthetics and Orthotics International*, vol. 31, no. 1, pp. 51-61.
- SIMAAN, N. (1999) "Analysis and Synthesis of Parallel Robots for Medical Applications". Haifa, Instituto Tecnológico de Israel.
- SUNG, G. T. G., I. S. (2001) "Robotic Laparoscopic surgery: a comparison of the Da Vinci and Zeus systems". *Urology*, vol. 58, no. 6, pp. 893-898.
- TSAI, L. W. (1999a) *Robot Analysis: The Mechanism of Serial and Parallel Manipulators.*
- TSAI, L. W. (1999b) *Robot Analysis: The Mechanism of Serial and Parallel Manipulators.*

- VALDEZ, Y. (2007) Resolución de mecanismo paralelo planar 3RRR impulsado por actuadores eléctricos. *Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada*. Querétaro, Instituto Politécnico Nacional.
- WALDNER, A., WERNER, C. & HESSE, S. (2008) "Robot assisted therapy in neurorehabilitation". *Europa Mediocophysica*, vol. 44, supplement 1, pp. 1-3.
- WOBBE, F., KOLBUS, M. & SCHUMACHER, W. (2008) *Automation and Robotics* Germany, InTech Education and Publishing.
- XIE, Y. H. T. S. Q. (2008) Desing and control of a Parallel Robot for ankle Rehabilitation. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- ZABALZA, I. & ROS, J. (2007) Application of Parallel Robots *8th Latin American Congress of Mechanical Engineering* Chile.

Anexos

Anexo A: Cinemática Inversa con elementos rotacionales.

Cuando se añaden elementos rotacionales a la plataforma, la cinemática inversa cambia. Este análisis se observará en la figura a continuación.



De la figura anterior se determina la siguiente ecuación:

$$x = R[1 - \cos(\pi + \theta)] + l - 2R$$

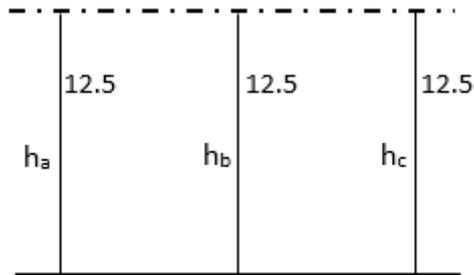
$$x = 7.5[1 - \cos(\pi + \theta)] + 5 = 12.5 - 7.5 \cos(\pi + \theta)$$

π	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
Θ	20	12.5	5	12.5

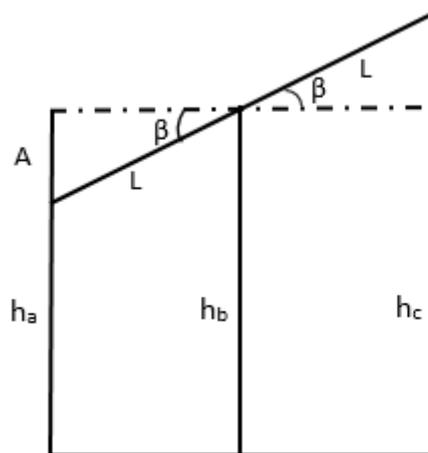
Por tanto, a la cinemática con desplazamiento lineal se le adiciona la siguiente matriz:

$$D = \begin{bmatrix} 12.5 - 7.5 \cos(\pi + \theta_a) & 0 & 0 \\ 0 & 12.5 - 7.5 \cos(\pi + \theta_B) & 0 \\ 0 & 0 & 12.5 - 7.5 \cos(\pi + \theta_c) \end{bmatrix}$$

El siguiente ejemplo ayudará a entender el análisis anterior, para ello se supone la condición inicial con todos los elementos a 12.5 cm y el ángulo de la plataforma a 0° , por lo que todos los motores deben estar girados a $\pi/2$. Esto se observa en la siguiente figura:



Se mantiene un desplazamiento fijo y se varía el mismo ángulo en los otros dos restantes, pero de manera diferente, es decir, uno en sentido positivo y otro en sentido negativo, como se observa a continuación:



Aproximando los arcos por rectas se tiene:

$$A = l \sin \beta$$

Suponiendo $l=15$ cm.

$$A = 15 \sin \beta$$

Sea $\beta=20^{\circ}$

$$A = 15 \sin 20^{\circ} = 5.13$$

$$h_a = 12.5 - 5.13 = 7.37$$

$$h_c = 12.5 + 5.13 = 17.63$$

Entonces el giro en los motores se determina como se muestra a continuación:

Motor A:

$$7.37 = 7.5[1 - \cos(\pi + \theta_a)] + 5$$

$$\frac{2.37}{7.5} = 1 - \cos(\pi + \theta_a) = 0.316$$

$$-0.684 = -\cos(\pi + \theta_a)$$

$$\pi + \theta_a = \cos^{-1} 0.684 = 46.84^\circ$$

$$\theta_a = 226.8^\circ$$

Motor C:

$$17.63 = 7.5[\cos(\pi + \theta_c)] + 5$$

$$\frac{12.63}{7.5} = 1 - \cos(\pi + \theta_c)$$

$$1.684 = 1 - \cos(\pi + \theta_c)$$

$$0.684 = -\cos(\pi + \theta_c)$$

$$\pi + \theta_c = \cos^{-1}(-0.684)$$

$$\pi + \theta_c = 133.5^\circ$$

$$\theta_c = -46.5^\circ$$

