



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO  
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR DE ÓRTESIS PLANTAR:  
PLANTILLAS ERGONÓMICAS CON SOPORTES AJUSTABLES**

**TESIS**

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS  
NECESARIOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

**LIDIA YOLANDA RAMÍREZ RIOS**

DIRECTORA DE TESIS:

**DRA. CLAUDIA CAMARGO WILSON**

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. JULIO, 2016.

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

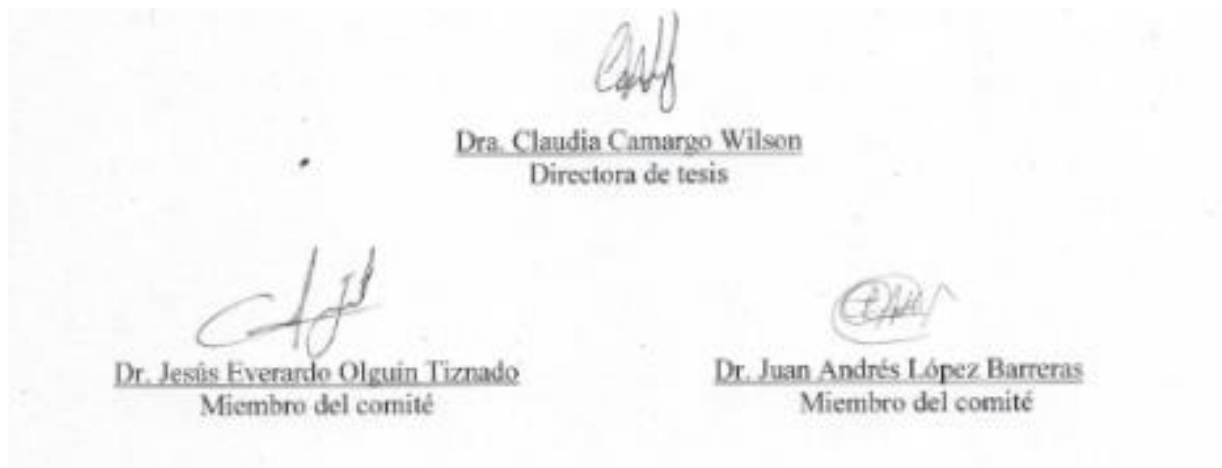
## EVALUACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR DE ÓRTESIS PLANTAR: PLANTILLAS ERGONÓMICOS CON SOPORTES AJUSTABLES

### TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN INGENIERÍA PRESENTA:

**LIDIA YOLANDA RAMÍREZ RIOS**

Y aprobada por el siguiente comité:



Ensenada, Baja California, México, a 25 de Julio de 2016.

## RESUMEN

Resumen de la tesis de **LIDIA YOLANDA RAMÍREZ RIOS**, presentada como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRA EN INGENIERIA INDUSTRIAL, del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México a 25 de julio de 2016.

### **EVALUACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR DE ÓRTESIS PLANTAR: PLANTILLAS ERGONÓMICAS CON SOPORTES AJUSTABLES**

Resumen aprobado por:



---

Dra. Claudia Camargo Wilson

Directora del Comité

En esta investigación se evalúa un sistema modular de órtesis plantar (plantilla conformada por módulos), denominada Plantilla Universal, como alternativa de solución ergonómica para algunas afectaciones del miembro inferior. El diseño de la órtesis consiste en diversos módulos que poseen una pluralidad de orificios equidistantes, y en algunos casos concéntricos, que se ensamblan y acoplan, mediante pernos integrados en algunas de sus zonas, a una base plantar perforada, la cual funciona como el módulo principal, siendo éste quien tiene interacción directa con los módulos restantes.

El diseño que posee la Plantilla Universal fue analizado y evaluado mediante la metodología TRIZ, la cual permite guiar hacia la solución de un problema inventivo, es decir, detectar problemas cuya solución no resulta evidente en el campo en cual se está presentando dicho problema. Se utilizaron dos conceptos o herramientas de esta

metodología, las cuales fueron las Leyes de Evolución de los Sistemas Tecnológicos y los Principios Inventivos para la Resolución de Contradicciones.

De inicio las Leyes de Evolución de los Sistemas Tecnológicos permitieron conocer de manera profunda el sistema estudiado, es decir, la función específica del sistema, las partes que integran al sistema, las funciones en específico que cada una desempeña y las relaciones existentes entre ellas; y la interacción que tiene el sistema con otros. El nivel de cumplimiento del sistema estudiado con cada una de las ocho leyes de evolución se ponderó en una escala relativa del 0 al 3, donde 3 significó que el sistema cumplió completamente con lo referido en la ley, y donde 0 significó que el sistema no cumplió ningún aspecto referido en la ley. El sistema modular de órtesis plantar cumplió de manera total o parcial 6 de las 8 leyes; ello permitió establecer que el sistema modular presenta sofisticación en su diseño, y que está próximo a alcanzar su idealidad. Enseguida la aplicación de los principios inventivos partió de la identificación de contradicciones técnicas en los parámetros del sistema, es decir, se plantearon las características que se mejoran atendiendo cierta especificación, y también ver cuáles características se degradan o comprometen debido a las mejoras. A partir de la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas, la cual relaciona parámetros de mejora y deterioro, se pudo establecer principios inventivos para dar aproximación hacia la solución de la problemática planteada, la cual consiste, en encontrar una solución que permita el diseño ergonómico personalizado de las órtesis sin comprometer la facilidad de manufactura, el costo y el tiempo de entrega al cliente.

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de estas dos herramientas de TRIZ permitieron establecer que el diseño del sistema modular presenta sofisticación en comparación de otros sistemas de órtesis plantares que se encuentran en el mercado o en base de datos de patentes revisadas a la fecha. Por otro lado, el sistema modular presenta diecisiete principios inventivos en sus características generales, subsistemas o en su interacción con otros sistemas. Además, se identificaron oportunidades de mejora en el sistema que fueron expuestos en forma de recomendaciones.

**Palabras claves:** Órtesis plantar, Plantilla ergonómica, Sistema Tecnológico, TRIZ, Evolución de los Sistemas Tecnológicos, Principios Inventivos, Contradicciones.

## **AGREDECIMIENTOS**

Agradezco a la Universidad Autónoma de Baja California, a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, por todo el apoyo y facilidades otorgadas para concluir mis estudios de Maestría en Ingeniería Industrial dentro del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería.

Agradezco al Sr. Manuel Ramírez Martínez por permitirme evaluar el diseño de su Plantilla Universal, la cual fue el objeto de estudio de este trabajo de investigación.

Un agradecimiento muy en especial a mi directora de tesis, la Dra. Claudia Camargo Wilson, por brindarme su entera confianza y motivación para realizar esta investigación, su paciencia y disposición para guiar con éxito este proceso. Así mismo, agradezco al Dr. Jesús Everardo Olguín Tiznado y al Dr. Juan Andrés López Barreras, por sus valiosos comentarios y aportaciones que enriquecieron y facilitaron el desarrollo de esta tesis.

## DEDICATORIA

Dedico con mucho cariño este trabajo de investigación:

A Dios por brindarme sabiduría, paciencia y perseverancia para alcanzar una meta más en la vida.

A mi esposo Edgar por su ejemplo de entrega y compromiso al trabajo, así como todo su apoyo y contribución para la realización de este trabajo.

A mi padre Manuel por el amor y apoyo incondicional que siempre me ha brindado, por ser una de las personas más inteligentes, creativas e innovadoras que conozco, por ser mi guía y fuente de inspiración en todo este proceso.

A mi madre Leonor por todo su amor, bondad y por darme el más grande ejemplo de lucha en la vida.

A mi hermano Héctor por ser una de las personas más importantes en mi vida.

A mis maestros Claudia y Jesús por todo su apoyo, guía, paciencia y motivación para poder culminar esta etapa en mi vida.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>ACTA</b> .....	<b>ii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>v</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. El mercado de los dispositivos médicos .....	2
1.2. La industria de los dispositivos médicos en México .....	3
1.3. Ergonomía en productos e innovación.....	9
1.4. Las órtesis plantares como insumos para la salud .....	11
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>15</b>
2.1. Definición del problema .....	15
2.2. Preguntas de investigación.....	17
2.3. Hipótesis .....	17
2.4. Objetivos .....	18
2.4.1. Objetivo General .....	18
2.4.2. Objetivos Específicos.....	18
2.5. Justificación .....	18
2.6. Delimitaciones de la investigación .....	20
<b>3. MARCO TEORICO</b> .....	<b>22</b>
3.1. Las órtesis plantares .....	22

3.2. Anatomía de la extremidad inferior .....	24
3.2.1. Esqueleto de la pierna y el pie .....	24
3.2.1.1. Visión general del esqueleto .....	24
3.2.1.2. Nociones generales sobre los huesos .....	24
3.2.1.2.1. El tejido óseo.....	24
3.2.1.2.2. Forma de los huesos .....	25
3.2.1.3. El esqueleto de la pierna .....	25
3.2.1.4. Esqueleto del pie .....	26
3.2.2. Las articulaciones .....	29
3.2.2.1. Las articulaciones del pie.....	31
3.2.2.1.1. Articulación tibio-tarsiana.....	31
3.2.2.1.2. Articulación calcáneo-astragalina .....	31
3.2.2.1.3. Articulación medio-tarsiana .....	32
3.2.2.1.3.1. Articulación del astrágalo con el escafoides .....	32
3.2.2.1.3.2. Articulación calcáneo-cuboidea .....	32
3.2.2.1.4. Articulación tarso-metatarsiana .....	33
3.2.2.1.5. Articulaciones intermetatarsianas .....	33
3.2.2.1.6. Articulaciones metatarso-falángicas .....	34
3.2.2.1.7. Articulaciones interfalángicas.....	34
3.2.3. Los músculos .....	34
3.2.3.1. Nociones generales sobre los músculos.....	34

3.2.3.2. Músculos de la pierna .....	38
3.2.3.2.1. Región anterior.....	38
3.2.3.2.2. Región externa .....	39
3.2.3.2.3. Región posterior .....	40
3.2.3.3. Los músculos del pie.....	43
3.2.3.3.1. Cara dorsal .....	44
3.2.3.3.2. Cara plantar .....	44
3.2.4. La circulación de la pierna y el pie .....	47
3.2.5. El sistema nervioso .....	48
3.2.5.1. Los nervios de la pierna y del pie .....	49
3.3. Generalidades del pie.....	50
3.4. Biomecánica del pie.....	51
3.4.1. La estática del pie: la cúpula plantar.....	51
3.4.2. La dinámica del pie: huella plantar.....	54
3.5. Teoría para la Resolución de Problemas de Inventiva (TRIZ) .....	55
3.5.1. Contradicciones técnicas y físicas .....	57
3.5.2. Evolución de los sistemas tecnológicos.....	58
3.5.2.1. Clasificación de las Leyes de Evolución .....	59
3.6. Niveles de innovación.....	61
<b>4. EVALUACIÓN DEL ESTADO DE EVOLUCIÓN DE LA ÓRTESIS PLANTAR</b>	
<b>MODULAR.....</b>	<b>65</b>

4.1. Análisis y verificación del cumplimiento de las Leyes de Evolución para el Sistema Tecnológico.....	67
4.1.1. Leyes estáticas del Sistema.....	67
4.1.2. Leyes cinemáticas del Sistema .....	69
4.1.3. Leyes dinámicas del Sistema .....	70
4.1.4. Diagrama de resultados.....	71
<b>5. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE INVENTIVA DEL SISTEMA MODULAR DE ÓRTESIS PLANTAR .....</b>	<b>73</b>
5.1. Análisis de contradicciones.....	73
5.1.1. Contradicción técnica principal en los sistemas de órtesis plantares que resuelve el diseño modular .....	73
5.1.2. Contradicción física principal en los sistemas de órtesis plantares que resuelve el diseño modular.....	94
5.1.3. Contradicciones en el diseño modular de órtesis plantar.....	95
5.1.4. Nivel de inventiva del sistema modular de órtesis plantar .....	97
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>100</b>
6.1. Conclusiones .....	100
6.2. Recomendaciones .....	102
<b>7. REFERENCIAS .....</b>	<b>104</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contradicciones técnicas principales en los sistemas de órtesis plantares .....	74
Tabla 2. Identificación de los 39 parámetros de TRIZ en la contradicción técnica principal del sistema. ....	75
Tabla 3. Parámetros de TRIZ aplicados a la contradicción técnica de los sistemas de órtesis plantares personalizadas. ....	81
Tabla 4. Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas con los parámetros que entran en conflicto en los sistemas de órtesis plantares personalizados .....	82
Tabla 5. Principios Inventivos propuestos por la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas para los sistemas de órtesis plantares. ....	83
Tabla 6. Contradicción técnica del sistema modular de órtesis plantar.....	96
Tabla 7. Contradicción física del sistema modular de órtesis plantar. ....	96
Tabla 8. Matriz de Resolución de Contradicción Técnica aplicada para el sistema modular de órtesis plantar.....	97
Tabla 9. Niveles de inventiva. ....	98

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exportaciones mexicanas de Dispositivos Médicos 2008-2014 .....	4
Figura 2. Mapa de clúster de dispositivos médicos en México.....	5
Figura 3. Huesos del pie. ....	26
Figura 4. Diagrama de radar. Cumplimiento de las Leyes de Evolución de los Sistemas Tecnológicos del Sistema modular de órtesis plantar .....	71

# 1. INTRODUCCIÓN

Mejorar e incrementar la eficiencia en las tareas y/o actividades que desarrollan los seres humanos en todos los ámbitos, es uno de los objetivos que la ergonomía persigue. Para cubrir dicho aspecto, la ergonomía se apoya en diversos campos o disciplinas científicas, que, mediante un trabajo en conjunto, permiten brindar soluciones a problemas típicos en el quehacer cotidiano de las personas. Muchas de éstas, convergen en el diseño, desarrollo y fabricación de productos. Éstos, deben de ser eficientes en el contexto o entorno en el cual interactuarán con el usuario. Para ello, principios ergonómicos deben de estar presentes en la fase de diseño del producto, ya que esto agregará valor al mismo, y se tendrá una ventaja competitiva y diferenciadora con respecto a sistemas similares, existentes en el mercado.

La innovación en el diseño de productos ergonómicos es la directriz fundamental para lograr la plena adaptación de éstos a las necesidades, capacidades y limitaciones de las personas. Para ello, el pensamiento creativo para la resolución de problemas complejos apoyado por herramientas metodológicas adecuadas, juega un papel importante. Como un primer paso para el acercamiento a la resolución de problemas complejos, está la identificación de una oportunidad de mejora, para llevar una situación actual a otra situación deseada o ideal.

Refiriéndonos a la identificación de áreas de oportunidad para el diseño ergonómico y la innovación, podemos hacer alusión a lo relacionado con el diseño de dispositivos médicos, también conocidos como insumos para la salud. Estos insumos pueden ser clasificados de acuerdo a su nivel de riesgo para la salud, y en esta clasificación se encuentran los dispositivos de bajo riesgo. El foco de interés de éste trabajo tiene que ver con insumos para la salud de bajo riesgo orientados al cuidado y atención de las extremidades inferiores, mencionando en específico a las órtesis plantares. Ésta investigación tiene el objetivo de evaluar el diseño de una órtesis plantar, integrada por diversos módulos (soportes), para establecer el grado de innovación que ésta representa como alternativa de solución ergonómica a afectaciones relacionadas con los miembros

inferiores, a través de la aplicación de una herramienta metodológica para la resolución de problemas inventivos.

### **1.1. El mercado de los dispositivos médicos**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que “los dispositivos médicos son esenciales para que la prevención, el diagnóstico, el tratamiento y la rehabilitación de enfermedades y dolencias sean seguros y eficaces”. Esto último, es empático con el objetivo que persigue el diseño ergonómico de producto. Este organismo internacional recalca la importancia de la fabricación, regulación, planificación, evaluación, adquisición, gestión y utilización de dispositivos médicos de buena calidad, seguros y compatibles con los entornos en que se emplean. Nuevamente, el concepto de ergonomía se ve expuesto, pues el buscar compatibilidad y adecuación al entorno es una cuestión primordial de cualquier diseño que sigue lineamientos ergonómicos.

La industria de los dispositivos médicos es uno de los sectores más vitales y dinámicos de la economía. Se calcula que, en 2008, los ingresos por ventas de dispositivos médicos en todo el mundo ascendieron a algo más de 210,000 millones de dólares estadounidenses, casi el doble que la cifra calculada correspondiente a 2001, lo que supone una tasa anual de crecimiento del 6% aproximadamente. Estas cifras corresponden a una industria de dispositivos médicos compuesta por más de 27,000 empresas en todo el mundo que proporcionan empleo a alrededor de un millón de personas. Cuatro quintas partes de los ingresos mundiales por ventas de dispositivos médicos proceden del continente americano y del europeo. Cerca del 80% de los ingresos mundiales en este sector corresponden a diez países; los Estados Unidos ocupan la primera posición de la lista (41%), seguido del Japón (10%), Alemania (8%) y Francia (4%) (Organización Mundial de la Salud, 2012).

Dentro del mercado mundial de los dispositivos médicos, los productos que se ofertan pueden dividirse en sectores. En el 2009 los sectores que registraron mayores porcentajes de ventas fueron: los equipos médicos con el 33.5%, seguido por los materiales fungibles (consumible) y la imaginología de diagnóstico con el 23.1% y 22.6%

respectivamente, después aparecen los productos ortopédicos con el 15.5% y los productos dentales con el 5.3% (Organización Mundial de la Salud, 2012).

Existen 30 principales empresas a nivel mundial, de las cuales 11 tienen su sede en los Estados Unidos. Estas 30 empresas obtienen el 89% de los ingresos mundiales por ventas de dispositivos médicos, y el 11% de ingresos restantes caen en manos de un enorme número de fabricantes alrededor del mundo, cuyas empresas caen dentro del rubro de Pequeñas y Medianas Empresas (Organización Mundial de la Salud, 2012).

La mayoría de las grandes empresas a nivel mundial, que se encuentran establecidas en los grandes países industrializados, han optado por establecer fábricas en países en desarrollo, para producir dispositivos de tecnología sencilla. Los principales países de ingresos medianos que producen dispositivos médicos son China, Brasil, México, India y Turquía. Estos cinco países representan el 60% de ventas de dispositivos médicos en países de ingreso mediano, contribuyendo con el 6% de ingresos por ventas a nivel mundial (Organización Mundial de la Salud, 2012).

## **1.2. La industria de los dispositivos médicos en México**

Los dispositivos médicos también denominados insumos para la salud, pueden abarcar desde un guante de látex para cirujano (material de curación), pasta para blanquear los dientes (insumo odontológico), equipo para ultrasonido (equipo médico), hasta un implante (ayuda funcional). La Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), define a los dispositivos médicos como “sustancia, mezcla de sustancias, material, aparato o instrumento (incluyendo el programa de informática necesario para su apropiado uso o aplicación), empleado solo o en combinación en el diagnóstico, monitoreo o prevención de enfermedades en humanos o auxiliares en el tratamientos de las mismas y de la discapacidad, así como los empleados en el reemplazo, corrección, restauración o modificación de la anatomía o procesos fisiológicos humanos”.

En la última década, el sector de dispositivos médicos en México ha tenido un crecimiento importante, debido al desarrollo de mejores técnicas de manufactura por parte de las principales empresas del sector.

Se estima que, en 2012, la producción del sector alcanzó un monto de 10,598 millones de dólares. Para 2014, la producción del sector en México alcanzó un monto de 15,220 millones de dólares, y se prevé que para el 2020 la producción de dispositivos médicos alcance un total de 19,039 millones de dólares (INEGI, Global Insight y ProMéxico).

Siguiendo cifras de Global Trade Atlas, en 2012 México exportó 6,343 millones de dólares y para el 2014 exportó 7,699 millones de dólares, pasando del décimo al noveno exportador de dispositivos médicos a nivel global, el primer exportador en América Latina y el principal proveedor de Estados Unidos. Los principales productos exportados del sector fueron instrumentos y aparatos de medicina, cirugía, odontología o veterinaria, los cuales representaron 76% de las exportaciones mexicanas de dispositivos médicos, seguidos de los artículos y aparatos de ortopedia con alrededor del 12%.

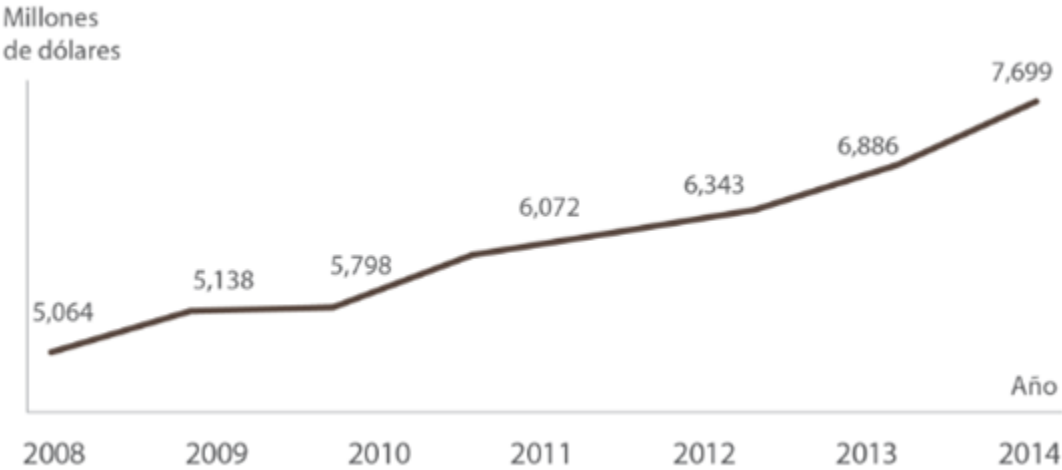


Figura 1. Exportaciones mexicanas de Dispositivos Médicos 2008-2014.

Fuente: ProMéxico con datos de Global Trade Atlas (2015).

En términos de comercio mundial de dispositivos médicos, México fue el segundo exportador mundial de agujas tubulares de sutura, el cuarto exportador mundial de instrumentos y aparatos de medicina, cirugía, odontología o veterinaria y el quinto de jeringas, catéteres, cánulas e instrumentos similares.

En México, operaron 2,344 unidades económicas especializadas en dispositivos médicos durante 2014, y cerca de 655 empresas registraron exportaciones, principalmente localizadas en los estados de Baja California, Chihuahua, Tamaulipas, Sonora, Nuevo León y Distrito Federal (ProMéxico, 2014).

El clúster más importante del país se localiza en Baja California, sus empresas representan más de 33% de las exportaciones totales nacionales del sector y en su mayoría están relacionadas con la manufactura y ensamble de equipos y componentes.



Figura 2. Mapa de clúster de dispositivos médicos en México

Fuente: ProMéxico (2015).

El progresivo aumento en el número de personal ocupado en la industria de dispositivos médicos, desde 2007 a la fecha, es un reflejo del crecimiento del sector. De

acuerdo con cifras del INEGI, 148,597 personas se encontraban laborando en esta industria, a diciembre de 2014.

Una de las grandes fortalezas que tiene el sector de dispositivos médicos en México es su capital humano. El país cuenta con capacidad de desarrollo y capital humano altamente competitivo: existen alrededor de 230 instituciones de educación superior que ofrecen programas de estudios relacionados con biotecnología. De acuerdo a la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES), anualmente se gradúan 110 mil estudiantes de ingeniería, manufactura y construcción. Según cifras de 2012 de UNESCO, en México hay 26% más graduados per cápita de dichos programas de estudio que en Estados Unidos.

La tendencia del sector a nivel global marca que los dispositivos cardiovasculares, neurológicos y ortopédicos serán los que presenten mayores niveles de crecimiento en ventas (Organización Mundial de la Salud, 2012). Se estima que para el 2020, en México, el consumo de dispositivos médicos alcance un total de 17,656 millones de dólares (Secretaría de Economía, 2013).

Las compras de dispositivos médicos por parte del sector público para atender las crecientes necesidades de la población han sido, y se espera que siga siendo, un factor importante para el impulso al crecimiento de este mercado en el país.

Para México, el sector de Dispositivos Médicos forma parte importante de su sistema de salud, por su función y participación en el diagnóstico, prevención, tratamiento y rehabilitación de enfermedades y padecimientos en humanos. Estos dispositivos se clasifican en base a su nivel de riesgo a la salud, uso, actividad, contacto y permanencia con el organismo como se muestra a continuación.

**1. Categorías de Dispositivos Médicos.** Son los 6 grandes grupos en los cuales se divide al sector de los dispositivos médicos en México con base a su función y finalidad de uso. Estas categorías se definen como:

**I. Equipo médico:** Son los aparatos, accesorios e instrumental para uso específico destinados a la atención médica, quirúrgica o a procedimientos de exploración, diagnóstico, tratamiento y rehabilitación de pacientes, así como aquellos para efectuar actividades de investigación biomédica.

**II. Prótesis, órtesis y ayudas funcionales:** Aquellos dispositivos destinados a sustituir o complementar una función, un órgano, o un tejido del cuerpo humano.

**III. Agentes de diagnóstico:** Todos los insumos incluyendo antígenos, anticuerpos calibradores, verificadores o controles, reactivos, equipos de reactivos, medios de cultivo y de contraste y cualquier otro similar que pueda utilizarse como auxiliar de otros procedimientos clínicos o paraclínicos.

**IV. Insumos de uso odontológico:** Todas las sustancias o materiales empleados para la atención de la Salud dental.

**V. Materiales quirúrgicos y de curación:** Los dispositivos o materiales que adicionados o no de antisépticos o germicidas se utilizan en la práctica quirúrgica o en el tratamiento de las soluciones de continuidad, lesiones de la piel o sus anexos.

**VI. Productos higiénicos:** Los materiales y sustancias que se apliquen en la superficie de la piel o cavidades corporales y que tengan acción farmacológica o preventiva.

2. **Clasificación de Dispositivos Médicos.** Los Dispositivos Médicos se clasificarán para efectos de registro de acuerdo con el riesgo que implica su uso, de la manera siguiente:

**Clase I:** Aquellos insumos conocidos en la práctica médica y que su seguridad y eficacia están comprobadas y, generalmente, no se introducen al organismo.

**Clase II:** Aquellos insumos conocidos en la práctica médica y que pueden tener variaciones en el material con el que están elaborados o en su concentración y, generalmente, se introducen al organismo permaneciendo menos de treinta días.

**Clase III:** Aquellos insumos o recientemente aceptados en la práctica médica, o bien que se introducen al organismo y permanecen en él, por más de treinta días.

3. **Dispositivos Médicos.** La clasificación de los dispositivos médicos con base a su nivel de riesgo, se dividen en:

**a. Dispositivo Médico Implantable.** Dispositivo médico diseñado para ser implantado totalmente en el cuerpo humano o para sustituir una superficie epitelial o la superficie ocular mediante intervención quirúrgica, destinado a permanecer allí después de la intervención. Se considera también dispositivo médico implantable cualquier dispositivo médico destinado a ser introducido parcialmente en el cuerpo humano mediante intervención quirúrgica y a permanecer allí después de dicha intervención durante un periodo de al menos treinta días.

**b. Dispositivo Médico Activo.** Dispositivo médico cuyo funcionamiento depende de una fuente de energía eléctrica o de cualquier otra fuente de energía distinta de la generada directamente por el cuerpo humano o por la gravedad, y que actúe mediante conversión de dicha energía.

**c. Dispositivo Médico Activo para Diagnóstico.** Dispositivo médico activo utilizado solo o en combinación con otros dispositivos médicos, destinado a proporcionar información para la detección, diagnóstico, control o tratamiento de estados fisiológicos, estados de salud, enfermedades o malformaciones congénitas en humanos.

**d. Dispositivo Médico Activo Terapéutico.** Dispositivo médico activo utilizado solo o en combinación de otros dispositivos médicos destinado a sostener, modificar, sustituir o restaurar funciones o estructuras biológicas en el contexto de la prevención, tratamiento, alivio o rehabilitación de una enfermedad, lesión o deficiencia en humanos.

**e. Dispositivo Médico Invasivo.** Dispositivo médico que penetra parcial o totalmente en el interior del cuerpo por un orificio corporal o bien a través de la superficie corporal, entendiéndose como orificio corporal cualquier abertura natural del cuerpo, la superficie externa del globo ocular o una abertura artificial creada de forma permanente, como una estoma.

**f. Dispositivo Médico Invasivo de Tipo Quirúrgico.** Dispositivo médico invasivo que penetra en el interior del cuerpo a través de la superficie corporal por medio de una intervención quirúrgica o en el contexto de una intervención quirúrgica. Se consideran también dispositivos médicos invasivos de tipo quirúrgico aquellos productos cuya penetración al interior del cuerpo no se produce a través de uno de los orificios corporales reconocidos.

**4. Duración.** Se refiere al tiempo de permanencia o contacto del dispositivo médico con el cuerpo humano.

**4.1 Uso pasajero.** Destinado normalmente a utilizarse de forma continua por un periodo menor a sesenta minutos.

**4.2 Uso a corto plazo.** Destinado normalmente a ser utilizado por un periodo no mayor de treinta días.

**4.3 Uso prolongado.** Destinado a utilizarse de forma continua por un periodo mayor a 30 días.

### **1.3. Ergonomía en productos médicos e innovación**

La innovación consiste en detectar necesidades y características de mejoramiento en productos del mercado para que, a través del uso del conocimiento científico, se ofrezcan unos nuevos u optimizados que satisfagan las necesidades de los usuarios (Ciruello et al. 2008). Para Dutta (2005) una innovación es: “La implementación de una nueva o significativa mejora de un producto (bien o servicio), un nuevo proceso, un nuevo método de mercado o un nuevo método de organización en las prácticas de negocio, en la organización del sitio de trabajo o en las relaciones externas”. Todo lo anterior implica conocer perfectamente las necesidades de los usuarios y aplicar el conocimiento científico de manera multidisciplinaria para ofertar soluciones nuevas o mejoradas.

En el ámbito de los dispositivos médicos, la innovación se refiere no solo a la invención de nuevos dispositivos, sino también a los ajustes y las mejoras progresivas de

los dispositivos y las prácticas clínicas existentes. Se debe demostrar que la innovación en el dispositivo tiene un impacto en la mejora de la salud del usuario (paciente). La OMS considera que el proceso de innovación es un “ciclo constituido por tres grandes fases que se alimentan una a otra: descubrimiento, desarrollo y difusión”.

Las oportunidades de mejora de productos no siempre se detectan a simple vista. Requieren de una contextualización desde la perspectiva del mercado y de ingeniería. En ambos enfoques, la ergonomía juega un papel preponderante. Ésta marca la directriz para que, desde la fase de diseño del producto médico, los aspectos técnicos se amalgamen con la voz del cliente, y la interacción del usuario con el producto sea la óptima. Para lograr esto último se utilizan herramientas que auxilian en el proceso creativo de innovación de productos ergonómicos, TRIZ en una de ellas. Esta permite aplicar innovaciones de otros sectores al campo de interés, como pasa con muchos dispositivos médicos, en los cuales las innovaciones no proceden de la investigación clínica o médica como tal, sino de tecnologías desarrolladas en otros sectores. Un ejemplo de esto es la imaginología por resonancia magnética, una tecnología no invasiva utilizada para diagnosticar lesiones orgánicas por traumatismos, tumores o infartos, la cual deriva de la investigación básica sobre la estructura de los átomos.

TRIZ es un método sistemático para aumentar la creatividad y fomentar la invención, desarrolladas por el equipo de trabajo de Genrich Altshuller en la antigua Unión Soviética desde 1946. A partir de los años ochenta, la teoría se expandió a nivel mundial y actualmente se utiliza por múltiples empresas, integrándose efectivamente con otras estrategias de diseño (Moehrle 2005). Actualmente, el trabajo investigativo alrededor de la teoría se orienta, entre otros, hacia el uso de principios inventivos derivados de la biología (Vicent et al. 2005), el trabajo multidisciplinar (González-Cruz et al. 2008), el trabajo sinérgico con otras estrategias de diseño y creatividad (Kang 2004) (Aguilar et. al 2008).

La ergonomía en los dispositivos médicos y TRIZ pueden tener una relación sinérgica orientada al diseño de productos de manera sistemática, maximizando los alcances y resultados que ambos instrumentos tendrían si se aplicaran de manera independiente. Aplicar TRIZ como herramienta de solución a problemas ergonómicos permite una correcta definición del problema e identificación concreta de la necesidad de

mejora o novedad en el sistema objeto de estudio, debido a que conduce hacia el conocimiento científico y técnico necesario para entender dicho sistema y encontrar una solución. Por otra parte, tiene la capacidad de resolver los conflictos técnicos, es decir, cuando la mejora de un parámetro o componentes de un sistema ergonómico, conlleva al detrimento de otro. Esto lo logra aplicando principios de invención estandarizados. Las soluciones obtenidas son en muchos casos patentables, dado que la metodología TRIZ ofrece como resultado un abanico de diseños novedosos que satisfarán la función de interacción entre el usuario y el sistema.

#### **1.4. Las órtesis plantares como insumos de apoyo para la salud**

Conforme a la Ley General de Salud, la Secretaría de Salud ejerce las atribuciones de regulación, control y fomento sanitario, a través de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios en lo relativo, entre otros puntos, a el control sanitario del proceso, uso, mantenimiento, importación, exportación y disposición final de equipos médicos, prótesis, órtesis, ayudas funcionales, agentes de diagnóstico, insumos de uso odontológico, materiales quirúrgicos, de curación y productos higiénicos, y de los establecimientos dedicados al proceso de los productos (Art. 17 bis).

El acuerdo del 31 de diciembre de 2011 publicado en el Diario Oficial de la Federación, establece que de conformidad al artículo 194 bis de la Ley General de Salud se considera a las órtesis como un insumo para la salud. Este acuerdo señala que éste insumo es conocido en la práctica médica, cuya seguridad y eficacia se encuentra debidamente comprobada y sustentada por diversos medios de información técnica y científica, respecto de los cuales la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, ha realizado la evaluación de riesgo correspondiente, catalogándolo como de bajo riesgo (clase I, generalmente no se introducen en el organismo), debido a que es un producto no invasivo, que entra en contacto sólo con la piel intacta del paciente. Los soportes para el arco del pie se encuentran también dentro de este listado de insumos de bajo riesgo.

El reglamento de Insumos para la Salud, cuya última reforma fue publicada el 14 de marzo de 2014, en el Diario Oficial de la Federación, en su artículo 7º, considera actos

relacionados con el proceso de insumos para la salud, aquéllos que tengan fines médicos (los que se realicen con propósitos de diagnóstico, preventivos, terapéuticos o de rehabilitación), científicos (los destinados a la investigación) e industriales (los destinados a la producción de insumos para la salud o sus materias primas).

Según la Norma UNE 11-909-90/1, adoptada de la ISO 8549/1, una órtesis es cualquier dispositivo aplicado externamente sobre el cuerpo humano, que se utiliza para modificar las características estructurales o funcionales del sistema neuromúsculo-esquelético, con la finalidad de mantener, mejorar o recuperar la función. Además, está en contacto permanente con el cuerpo humano, diferenciándola de los demás productos de apoyo.

La norma internacional UNE-EN ISO 9999:2007 ofrece una clasificación para productos de apoyo. Según AENOR (2007), un producto de apoyo es cualquier dispositivo, instrumento, software, tecnología o equipo fabricado especialmente o disponible en el mercado para prevenir, compensar, controlar, mitigar o neutralizar la discapacidad de un individuo. Para objetos de esta norma internacional, el término discapacidad se define como un término genérico que incluye deficiencias, limitaciones en actividad y restricciones en la participación. Indica los aspectos negativos de la interacción entre un individuo (con una condición de salud) y sus factores contextuales (factores ambientales y personales) (CIF 2001, OMS).

La norma establece una clasificación en tres niveles jerárquico (clase, subclase y divisiones). La clase 6 de dicha normatividad corresponde a las órtesis y prótesis, dentro de la cual, la subclase 12 clasifica a las órtesis para los miembros inferiores, definiendo a éstas como dispositivos diseñados para modificar la estructura anatómica y las funciones orgánicas de los miembros inferiores. Estos dispositivos pueden ser fabricados a medida, por ejemplo, diseñados para conseguir los requerimientos funcionales de un individuo, o bien prefabricados, por ejemplo, diseñados para conseguir requerimientos funcionales particulares. Los dispositivos prefabricados son ajustables y pueden necesitar ser adaptados para el usuario final, o bien listos para su uso sin necesidad de adaptación. La división 03, de la subclase 12, hace referencia a las órtesis de pie, concretándose a dispositivos que

abarcan completa o parcialmente el pie: plantillas, almohadillas, taloneras, apoyos para el arco y protectores de talón.

Existen en el mercado un gran número de órtesis plantares cuyos diseños se enfocan a ofrecer alivio y confort al pie. Éstas pueden ser tanto prefabricadas, como hechas a la medida. En ambos casos, se debe asegurar que la plantilla se adapte a las características anatómicas del pie de la persona que las va a usar, es decir, debe ser ergonómica. Sin embargo, varias de las órtesis plantares que se ofertan hoy en día no cumplen con los principios ergonómicos de producto, debido a que éstas no tienen la capacidad de adaptarse a las características específicas de los usuarios, tanto en sus necesidades de atención, como en sus necesidades físicas o antropométricas.

Lo anterior, ha despertado el interés de médicos especialistas, laboratorios de casas comerciales, y ahora, en este caso de ingenieros, por evaluar la adaptabilidad de los diseños actuales y los materiales que se están empleando para la elaboración de órtesis tanto prefabricadas como personalizadas.

Las plantillas que han sido objeto de análisis y evaluación hasta el momento, obedecen a diseños de una sola pieza acojinada en cierta zona del pie, para ofrecer confort, descanso y alivio. La experimentación se ha desarrollado con la ayuda de plantillas de control, es decir, plantillas que difieren en algún aspecto a las plantillas evaluadas. Por otro lado, muchos de los materiales con los que están hechas las plantillas evaluadas son demasiado suaves, como el caucho, el látex, la tela, entre otros. Estas no ofrecen un soporte estable para direccionar las fuerzas que recibe el pie hacia las zonas adecuadas y controlar la postura del mismo. La contraparte a éstos materiales son el corcho y el cuero, pero resultan ser demasiado rígidos y poco cómodos (Lelievre & Lelievre). Hasta la fecha, la mayoría de los estudios se han centrado en las plantillas personalizadas, y se tienen muy pocos datos de los efectos mecánicos de los dispositivos prefabricados (Redmond et al., 2009). Debido a esto último los resultados han demostrado que sólo algunas plantillas prefabricadas resultan ser tan beneficiosas en la reducción de ciertos síntomas como las plantillas personalizadas (Redmond, Landorf, & Keenan, 2009).

El sistema modular de órtesis plantar que se evalúa en ésta investigación, tiene un diseño flexible, que permite transformar el contexto prefabricado de la órtesis a uno personalizado, mediante los módulos (soportes) que se ajustan e integran a una base guía (módulo principal).

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1. Definición del problema**

La posición bípeda es una cualidad natural del hombre. Nuestras extremidades inferiores son dos potentes pilares que sostienen al tronco, miembros superiores y parte superior del cuerpo. Dichos pilares tienen su base de sustentación en los pies, y son éstos quienes soportan el peso del cuerpo y hacen posible el desplazamiento en una postura erguida. Cualquier alteración orgánica o funcional de los mismos genera sobrecargas que se traducen en la acumulación de presión en ciertas zonas de la planta del pie que rompen su equilibrio mecánico. Muchas de las actividades tanto laborales, físicas, de esparcimiento o de la vida cotidiana, que desarrollan la mayoría de las personas demandan permanecer mucho tiempo de pie o recorrer grandes distancias caminando a lo largo del día. La postura prolongada de pie, definida como aquella que se mantiene más de dos horas al día se ha vinculado con problemas de salud tales como lumbalgia, dolor e hinchazón de piernas y pies, fascitis plantar, restricción de flujo sanguíneo, venas varicosas, incremento de cambios óseos degenerativos, entre otras afecciones (Vallejo, 2005).

Diferentes investigadores refieren que más de un tercio de las personas en edad productiva desempeñan su oficio o actividad laboral de pie y/o caminando por periodos mayores a 4 horas al día (Vallejo, 2004). Las personas que permanecen de pie de un 45 a 50% de su jornada de trabajo presentan molestias en pies y piernas y los que permanecen más de un 25% de su jornada de pie presentan lumbalgia (Rys, 1994). Estos datos ponen de manifiesto la importancia y urgencia de brindar alternativas de soluciones ergonómicas a esta problemática, a través de la innovación en los dispositivos médicos del sector que agrupa a las órtesis y ayudas funcionales, para que dichos dispositivos se adapten a las características, capacidades y limitaciones de las personas, logrando con ello cumplir con los lineamientos que la ergonomía de producto exige. Y, por otro lado, es de suma importancia que las soluciones propuestas sean evaluadas a través de una base metodológica establecida, que asegure que el resultado final sea de calidad, seguro y efectivo.

Ergónomos y especialistas en salud indican el uso de órtesis plantares para aminorar, y en algunos casos aliviar, diversas afectaciones en los pies. Hay un gran número y variedad en el mercado de estas órtesis plantares (plantillas ortopédicas), sin embargo, no todas son de utilidad para prevenir y tratar los problemas antes mencionados. Y es que, muchos de los diseños de dichas plantillas que se introducen en el calzado, obedecen a sistemas de una sola pieza, en donde el soporte es fijo en una zona específica del pie, y está predeterminado a solucionar o tratar una sola afectación en particular. Cada persona posee un pie único, cuya morfología es tan irreplicable como las huellas dactilares, por lo tanto, los diseños predeterminados no aseguran que el soporte coincida con la zona plantar que requiere tratamiento. Lo ideal es que las órtesis plantares sean a la medida de la persona que los usará, y para lograrlo, el proceso de fabricación de éstas tendría que ser como tradicionalmente se acostumbra, manualmente. El inconveniente que podemos encontrar con este tipo de diseño y forma de manufacturarse, es que dichas órtesis resultan ser costosas en comparación con aquellas que se fabrican en serie. Sin embargo, éstas últimas se contraponen con el principio de diseño personalizado e individualizado que los profesionales en el cuidado de la salud del pie indican. Esta situación nos pone frente a una contradicción técnica para los diseños ideales de órtesis plantares. Esto representa un problema complejo cuya resolución tiene un nivel inventivo que puede ser determinado mediante la aplicación de herramientas de la metodología TRIZ.

Hasta el momento, todos los diseños de órtesis plantares o plantillas, que se pueden encontrar en el mercado de los dispositivos médicos, tienen las mismas características en general. Los fabricantes de estos insumos podrán emplear tecnología de punta para su manufactura, inclusive utilizarla para obtener los requerimientos antropométricos específicos de cada paciente, pero el producto final, la órtesis, sea personalizada o prefabricada, tiene características técnicas muy similares con el resto del mercado.

El diseño de soporte plantar que se evalúa en este trabajo atiende el principio de diseño para la mayoría debido a su diseño ajustable, y al mismo tiempo cubre la necesidad del diseño personalizado, dado que consiste en un sistema integrado por diversos módulos o partes que se ensamblan y ajustan a una base plana mediante un acoplamiento de pernos-orificios, adaptándose a casi cualquier característica o forma anatómica del pie y

adecuándose a la necesidad de atención de cada persona. Su proceso de fabricación es el moldeo por inyección con una gran versatilidad en la utilización de diversos materiales para su manufactura. Una metodología para diagnosticar y evaluar la solución ergonómica propuesta, poco aplicada para resolver problemas ergonómicos, se utilizará para determinar el nivel de innovación que este sistema representa.

## **2.2. Preguntas de investigación**

¿Qué nivel de innovación tendrá el sistema modular de órtesis plantar?

¿Qué principios inventivos están presentes en el diseño modular de la órtesis plantar?

¿Cuál ha sido la evolución tecnológica del sistema a evaluar?

¿Qué módulos del sistema estudiado requerirán rediseño?

## **2.3. Hipótesis**

Para esta investigación se plantean las siguientes cuatro hipótesis:

La órtesis plantar (plantilla universal) se encuentra categorizada como mínimo en el tercer nivel de grado de innovación.

El diseño modular presenta al menos el 50% de los principios inventivos.

El sistema denominado Plantilla Universal es la evolución tecnológica actual de los soportes plantares.

Los módulos que son soportes para el antepié serán los candidatos a rediseño.

## **2.4. Objetivos**

### **2.4.1. Objetivo General**

Evaluar el diseño de un sistema de órtesis plantar integrado por diversos módulos para establecer el grado de innovación que éste representa como alternativa de solución ergonómica a afectaciones relacionadas con los miembros inferiores.

### **2.4.2. Objetivos Específicos**

En este trabajo se pretende alcanzar los siguientes objetivos particulares:

Aplicar herramientas de la metodología TRIZ para evaluar el diseño modular como solución ergonómica para el tratamiento de afecciones comunes de las extremidades inferiores.

Establecer un nivel de refinamiento de diseño para sistemas de órtesis plantares.

Obtener un modelo de utilidad para el diseño del sistema.

Contribuir con la difusión de la metodología TRIZ aplicada en la solución de problemas de diseño ergonómico de producto.

## **2.5. Justificación**

Uno de los sectores que mayormente demanda dispositivos y/o productos que apoyen las actividades propias del área, es el sector salud. Es ahí donde la integridad física de las personas es primordial, por lo que el diseño de dispositivos que apoyen los servicios de salud definitivamente debe de seguir condiciones ergonómicas que garanticen la seguridad, satisfacción y bienestar de las personas.

Los diversos productos ortopédicos son un ejemplo claro de la necesidad de considerar a la ergonomía y a los factores humanos como pilar principal para el diseño y desarrollo de los mismos. Las órtesis plantares requieren un diseño con ajuste perfecto a la anatomía del pie de la persona que las utilizará, por lo que el considerar las limitaciones y capacidades del cuerpo humano son la base principal para el desarrollo de un buen diseño de producto.

La falta de bases metodológicas para determinar en qué medida un producto que dice ser ergonómico realmente lo es, permite introducir un área de oportunidad para aplicar herramientas que han sido utilizadas en otras áreas del conocimiento y trasladarlas al diseño ergonómico de productos que tienen una relación directa con la integridad física de las personas. Por tal motivo, se considera a TRIZ como la metodología ideal para evaluar una solución ergonómica de alto contenido creativo.

Se selecciona al sistema modular de soporte plantar denominado Plantilla Universal debido a sus características de diseño que permiten ajustar con precisión sus soportes hacia las zonas que requieren tratamiento, de manera que con ello se amplía el rango de adaptabilidad de éste sistema a las personas.

El diseño de la Plantilla Universal es realmente poco conocido por los médicos especialistas, casas comerciales e ingenieros que se dedican al desarrollo de estos tipos de productos. De tal manera, que, con la presente intención de evaluar el grado de innovación de esta plantilla de tipo modular, se estaría dado a conocer un diseño que puede ser de gran utilidad para aquellos profesionales de la salud del pie en el tratamiento de sus pacientes. Podemos estar respaldando una nueva forma de desarrollar plantillas prefabricadas, pero al mismo tiempo adaptadas de manera personalizada a las necesidades de atención de cada persona, asequible para cualquier persona, debido a su económico costo de fabricación.

Este trabajo de investigación trae consigo grandes impactos en cuestiones tecnológicas, sociales y económicas:

**a) *Impacto tecnológico:*** El diseño de la plantilla que se evalúa puede representar una importante contribución dentro de la tecnología sanitaria empleada para la atención de las afectaciones del pie, pues posee características diferenciadoras con el resto de plantillas

que se ofertan en el mercado actual, lo cual conlleva a una innovación en el sector de insumos médicos referente a las ayudas funcionales.

**b) *Impacto social:*** Poner a la disposición de cualquier especialista de la salud del pie o persona en general, éste sistema de órtesis plantar, representa poner al alcance de sus manos una alternativa de solución a problemas relacionados con las extremidades inferiores, en específico afectaciones en el pie. En cuestión de poco tiempo, pueden obtener un producto con características ergonómicas que mejora la calidad de vida, la interacción con el entorno, el desempeño en todos los niveles y las actividades de esparcimiento, que se pueden ver mermadas debido a trastornos de tipo fisiológico y/o mecánico.

**c) *Impacto económico:*** La validación de este producto orientado al sector de los dispositivos médicos como una alternativa viable para algunos tratamientos comunes de afectaciones en los pies, contribuye con el crecimiento económico de este mercado en el país, así como dentro del mercado local. Este dispositivo médico se suma a los muchos otros insumos médicos que se fabrican en el estado de Baja California, y que pueden ser introducidos de una manera competitiva.

## **2.6. Delimitaciones de la investigación**

El objeto de estudio de esta investigación es una órtesis plantar que fabrica una PYME de la ciudad de Ensenada, Baja California, denominada Maquinados y Terminaciones, S.A. Entre sus trabajos de fabricación podemos encontrar a las denominadas Plantillas Universales, que son plantillas con soportes ajustables. Este sistema ergonómico de órtesis plantar tiene la función de rectificar y realinear la postura del pie cuando ésta es anormal. Ayuda al pie a soportar el peso corporal y evita la concentración de cargas puntuales, distribuyendo la presión vertical y de cizallamiento que recibe sobre toda la planta, de la manera más adecuada para cada tipo de pie. Aligera las molestias o el dolor en las extremidades inferiores durante la bipedestación y la marcha al oponerse a la fuerza de reacción del suelo que es causada por estas dos actividades, es decir, absorbe la fuerza de impacto. Mejora la movilidad corporal evitando movimientos compensadores anormales y protegen las articulaciones del pie y del miembro inferior. En término generales, el

sistema tiene la capacidad de cumplir con las funciones de realineación (restablecimiento de los ejes) y descarga (equilibrio de presiones).

Plantillas Universales cuentan con nueve soportes modulares que son: base plantar, arco longitudinal, arco transverso (también llamado botón retrocapital), barra metatarsal, talonera, herradura, cuña de retropié, cuña lateral y botones. Cada módulo realiza una función en específico dentro del sistema. La base plantar permite almohadillar el apoyo del pie en las zonas del tarso y el metatarso. Los arcos longitudinales sostienen a la bóveda longitudinal, mejoran la estabilidad del esqueleto y el apoyo plantar, equilibrando la presión entre el antepié y el retropié. Los arcos transversos o botones retrocapitales liberan la concentración de cargas puntuales en la zona posterior de las cabezas centrales del metatarso. La barra metatarsal sostiene las cabezas metatarsianas. La talonera permite nivelar asimetrías del miembro inferior. La herradura amortigua el impacto sobre el calcáneo. La cuña de retropié reestablece los ejes normales del pie cuando existen deformidades en valgo o en varo manteniéndolo en posición neutra. La cuña lateral levanta la bóveda longitudinal externa, ayuda a evitar de manera parcial, y en algunos casos de manera total, la rotación externa del antepié. Los botones permiten el apilamiento de bases plantares para la asimetría del miembro inferior mayor a 0.05 mm.

Todos y cada uno de los soportes modulares son evaluados en la presente investigación mediante la metodología TRIZ, éstos son la base y fundamento de este trabajo, ya que este tipo de sistema de plantilla no ha sido evaluado hasta el momento.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Las órtesis plantares

El pie representa el porcentaje más elevado de prescripciones ortésicas, y dentro de ellas, los soportes plantares. El objetivo es lograr con ellos la postura correcta de los pies y disminuir el dolor durante la bipedestación y la marcha.

En el año 1960 Root afirmaba: “La órtesis funcional del pie es un dispositivo ortopédico para promover la integridad de las articulaciones del pie y del miembro inferior, resistiendo la fuerza de reacción del suelo que causa el movimiento anormal del esqueleto durante la fase de apoyo de la marcha”.

El uso de órtesis funcionales, para rectificar la mala postura de los pies, ha demostrado en numerosos pacientes la mejoría al corregir rotaciones excesivas internoexternas y deformidades en valgo o varo. Mediante la acción de los soportes plantares, la articulación subastragalina se sitúa cerca de la posición neutra.

Según sus objetivos terapéuticos, las plantillas funcionales se clasifican en: a) plantillas de realineación o control de deformidades; b) plantillas de descarga o distribución de presiones, y c) plantillas mixtas, que combinan ambas funciones.

*Plantillas de realineación.* De densidad rígida o semirígida y elásticas, se utilizan para evitar los trofismos musculares. Elasticidad significa deformidad a la carga con memoria para recuperar la posición inicial. La realineación se consigue mediante: a) la forma de la plantilla y las propiedades del material; b) compensando la deformidad al restablecer los ejes normales del pie. Al colocar el pie en posición correcta, mejora la estabilidad y el apoyo, y c) aumentando la movilidad y la capacidad de marcha.

*Plantillas de descarga.* De densidad blanda o semiblanda, redistribuyen las presiones y restablecen el apoyo horizontal sobre el suelo. Facilitan la bipedestación y la marcha indolora. Evitan los puntos de sobrecarga y las fuerzas de cizallamiento, y amortiguan la fuerza de reacción del suelo durante el apoyo del pie. Con el material de

resinas elásticas combinadas de poliuretano se consiguen órtesis próximas al ideal biomecánico, que consiste en evitar la concentración de cargas puntuales, con el resultado de dolor en la planta del pie.

*Plantillas mixtas.* Combinan densidades rígidas y blandas. El material rígido inmoviliza las articulaciones dolorosas del pie, buscando un efecto de contención sin corrección. Al disminuir o anula la movilidad se alivia o desaparece el dolor. El material flexible respeta la movilidad de las otras articulaciones y permite su adaptación a los cambios morfológicos que se producen durante la marcha.

Las órtesis plantares, en cuanto a su objetivo corrector, quedan limitadas a los pies infantiles. La gran mayoría de las prescripciones se hacen para compensar defectos en los pies de personas adultas. El tratamiento de los pies de los adultos con órtesis plantares ha ido ganando popularidad durante los últimos años, aunque el empleo abusivo que en ocasiones se hace de ellas lleva a que no siempre se tenga en cuenta las reglas biomecánicas precisas para su prescripción y confección. Lelièvre y Lelièvre decían: “Sólo se compensa un trastorno estático estableciendo los ejes normales y el equilibrio de presiones”. Esto se puede conseguir con una buena plantilla. Valentí afirmaba: “El objetivo de la órtesis plantar consiste en reequilibrar el apoyo del pie afecto de deformidad anatómica y desarmonía funcional de carácter irreversible”.

Este objetivo se logra cuando la plantilla evita los movimientos compensadores anormales, controla la buena postura del antepié y mantiene el retropié en posición neutra. O lo que es lo mismo, cuando conservan el ángulo anatómico correcto entre el antepié y el retropié, y entre la pierna y el plano horizontal del suelo, con el fin de conseguir los movimientos normales y sin dolor en cada fase del ciclo de la marcha.

La plantilla ideal sería aquella que mantuviera un perfecto equilibrio del pie en posición estática y en su dinámica, y una amortiguación selectiva, especialmente durante la marcha; o sea, la órtesis confeccionada con una forma y material capaces de combinar la acción de soporte y distribución homogénea de la carga.

## **3.2. Anatomía de la extremidad inferior**

### **3.2.1. Esqueleto de la pierna y el pie**

#### **3.2.1.1. Visión general del esqueleto**

El cuerpo humano se apoya en el suelo mediante dos potentes pilares que son los miembros inferiores. La articulación de la cadera los une a la pelvis, sólida cintura ósea formada por los huesos ilíacos y el sacro. Esta cintura soporta en su parte superior, los doce pares de costillas, de los que los diez primeros se unen directamente o indirectamente al esternón formando así una verdadera jaula ósea: el tórax.

El esqueleto forma el armazón del cuerpo. Los huesos constituyen, en su mayor parte, palancas sobre las que actúan los músculos para la ejecución de movimientos. Sirven, además, para proteger los órganos delicados (caja torácica, pelvis, cráneo).

La cintura pelviana es casi completamente inmóvil y la cavidad articular del ilíaco es muy profunda. Así, el miembro inferior goza de una movilidad mucho menos amplia que la del miembro superior. En cambio, este modo de articulación permite a los miembros inferiores soportar fácilmente todo el peso de la parte superior del cuerpo y asegurar su estabilidad.

#### **3.2.1.2. Nociones generales sobre los huesos**

##### **3.2.1.2.1. El tejido óseo**

El hueso es extremadamente resistente y puede soportar cargas considerables sin romperse. El hueso está constituido por dos materias básicas: una *materia orgánica* o animal, la *osteína*, sustancia albuminoidea, y una *materia orgánica* o mineral que comprende sales minerales, especialmente fosfato y carbonato cálcico.

La osteína proporciona al hueso su flexibilidad, su elasticidad y su consistencia, mientras que las sales minerales aseguran su rigidez y su resistencia. Las dos sustancias son

indispensables y deben encontrarse en el hueso en justa proporción: poco más o menos, 35% de osteína y 65% de sales minerales.

El hueso no es una sustancia inerte que una simple fuerza externa pueda hundir o romper. Por el contrario, está lleno de vida, se desarrolla por el trabajo de numerosas células especializadas y reacciona a las excitaciones exteriores. En el caso de ejercer presión durante algún tiempo contra él, no reacciona siempre hundiéndose en el lugar de la presión, sino, por el contrario, formando una saliente, una exóstosis.

#### **3.2.1.2.2. Forma de los huesos**

De acuerdo con su aspecto general, los huesos se dividen en: largos, cortos y planos o anchos.

Los huesos largos se caracterizan por su forma alargada; se encuentran especialmente a nivel de los miembros: húmero, radio, cúbito, fémur, tibia, peroné, etc. Tienen un cuerpo alargado llamado diáfisis, comprendido entre dos extremidades abultadas designadas con el nombre de epífisis.

Los huesos cortos tienen dimensiones aproximadamente iguales en cualquier dirección. Éstos se encuentran en las regiones en que son necesarias tanto la resistencia como la movilidad, por ejemplo, el tarso, el carpo y la columna vertebral.

Los huesos planos son de gran superficie, pero de mínimo espesor. Estos huesos delimitan las cavidades del cráneo, de la pelvis y del tórax.

La superficie de los huesos no es regular; presenta salientes o depresiones que sirven bien para la inserción de músculos, o para el paso de tendones o de vasos.

#### **3.2.1.3. El esqueleto de la pierna**

La pierna se extiende desde la rodilla hasta el tobillo. Su esqueleto está formado por dos huesos largos: la tibia, que ocupa una posición antero interna, y el peroné, situado justamente detrás.

La tibia es el más voluminoso de los huesos de la pierna. La extremidad inferior presenta una superficie ligeramente excavada, en la parte interna de la cual la tibia baja más formando una especie de apófisis: maléolo interno.

El peroné es un hueso delgado cuya extremidad superior engrosada (cabeza) se apoya en la parte posterior interna de la epífisis superior de la tibia y forma el maléolo externo, claramente perceptible bajo la piel. Está íntimamente fijada a la parte externa de la extremidad inferior de la tibia.

Los extremos inferiores de la tibia y del peroné forman una verdadera muesca profunda en la cual se fija el pie.

#### 3.2.1.4. Esqueleto del pie

El pie está constituido de manera que asegure en las mejores condiciones posibles la posición bípeda y la marcha, así como el reparto equitativo del peso de todo el cuerpo. Está formado por veintiséis huesos repartidos en tres regiones: tarso, metatarso y dedos.

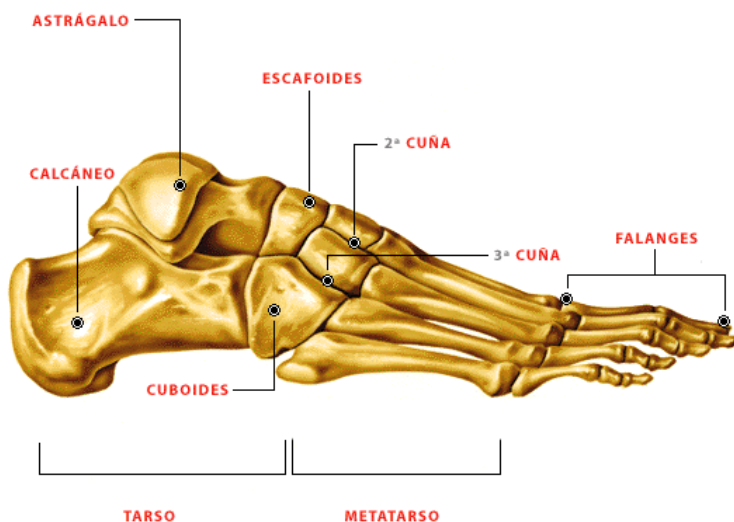


Figura 3. Huesos del pie

Fuente: Recuperado de [http://yadyprinse.blogspot.mx/p/huesos-del-pie\\_28.html](http://yadyprinse.blogspot.mx/p/huesos-del-pie_28.html)

El **tarso** es una masa ósea situado debajo de los huesos de la pierna. Está formado por siete huesos cortos de gran resistencia, dispuestos en dos filas. La fila posterior está formada por dos huesos superpuestos, el calcáneo y el astrágalo. La fila anterior está formada por cinco huesos yuxtapuestos: el escafoides, el cuboides y los tres cuneiformes. El tarso es más estrecho por detrás que por delante. Los huesos que lo constituyen están unidos de manera que forman una bóveda cóncava hacia abajo sobre la cual reposa el peso del cuerpo.

El *calcáneo*, hueso del talón, es el más fuerte del tarso. Es de forma cúbica y constituye una potente palanca para los músculos de la pantorrilla en la marcha. Su cara posterior es rugosa por la parte inferior donde se inserta el tendón de Aquiles. Su cara anterior se articula con el cuboides. Sobre la cara inferior, por detrás, se encuentran dos tuberosidades, una interna y otra externa, que sirven para la inserción de diversos músculos plantares. Dos carillas para la articulación con el astrágalo ocupan su cara superior. Su cara interna está ahuecada en forma de gruta, asegurando así la protección de los vasos, de los nervios y de los tendones de los músculos posteriores que se encuentran bajo la bóveda plantar.

El *astrágalo* une la pierna al pie y forma la cúpula de la bóveda tarsiana. Ofrece el aspecto general de un trípode, que reposa parcialmente en vano sobre el calcáneo y tienen como misión dirigir los distintos sentidos de distribución del peso del cuerpo. Por delante presenta una cabeza que se articula con el escafoides. La cara superior está tallada en forma de polea (polea astragalina) para la articulación con la tibia. En la cara posterior se encuentra un canal que se dirige hacia abajo y hacia adentro para dejar paso libre al músculo flexor propio del dedo gordo. La cara inferior se articula con el calcáneo. Este hueso es más ancho en su parte anterior que en su parte posterior, esta disposición tiene cierta importancia para los movimientos del pie. El astrágalo no recibe ninguna inserción tendinosa, ni muscular. Reciben la carga del peso del cuerpo, transmitida por la tibia, y la reparte entre las diversas partes del pie.

El *escafoides* está situado en el lado interno del pie. Su cara posterior se articula con el astrágalo. Por su cara anterior, entra en contacto con los cuneiformes. Sobre esta cara se

ve hacia adentro, abajo y atrás, un saliente. Es el tubérculo del escafoides. Éste sirve para la inserción del músculo tibial posterior.

El *cuboide* está situado en el borde externo del pie, al lado del escafoides y delante del calcáneo, con el que se articula. Por delante está en relación con el cuarto y quinto metatarsianos.

Los *cuneiformes* reciben este nombre por su configuración en forma de cuña. Son tres y se les designa con el nombre de primero, segundo y tercer cuneiforme, yendo de dentro a afuera, correspondiendo, pues, el primero al borde interno del pie. Están unidos los unos a los otros por articulaciones muy vigorosas. Esta circunstancia, unida a su configuración especial y a su disposición respectiva, les convierte en la parte más fuerte de la garganta del pie. El primer cuneiforme es el más voluminoso. Al contrario de lo que ocurre con los otros dos, su vértice es superior y su base inferior. Sobre él se inserta el músculo tibial anterior. El segundo es el más pequeño. Desciende menos hacia abajo que los otros dos, avanza menos hacia adelante, con lo cual permite que el segundo metatarsiano penetre profundamente en el tarso. En cuanto al tercero, se articula lateralmente con el cuboides.

El **metatarso** forma la parte media del pie. Se compone de cinco huesos largos, los *metatarsianos*. Se designan con los nombres de primero, segundo, tercero, cuarto y quinto metatarsianos contando de dentro a afuera. Los tres primeros se articulan, respectivamente, con los tres cuneiformes, los otros dos, con el cuboides. El primero es el más voluminoso; en la cara plantar de su base se encuentran dos caras, una interna que sirve de inserción al músculo tibial anterior y una externa para la inserción del peroneo lateral largo. En su extremo anterior, debajo de la cabeza, se observan dos ranuras o concavidades destinadas a recibir los huesos sesamoideos. El segundo es normalmente más largo; se adelanta en el tarso más profundamente que los otros y la parte inferior de su extremo posterior está acuñada entre los dos metatarsianos vecinos. El quinto posee una apófisis muy saliente situada en su base, hacia atrás y hacia el exterior. Sobre esta apófisis se inserta el músculo peroneo lateral corto. Sucede con frecuencia que esta apófisis exagera su saliente hacia el exterior, especialmente en los sujetos con pie delgado, lo que, a consecuencia de la presión

del calzado, determina el nacimiento de una callosidad, dureza o callo, a veces muy doloroso.

Los *huesos sesamoideos* se les encuentran en los tendones en los alrededores de ciertas articulaciones. En el pie pueden existir varios, pero hay siempre dos que se alojan bajo la cabeza del primer metatarsiano, en unas pequeñas ranuras que tienen reservadas. Un poderoso aparato ligamentoso los une fuertemente al primer metatarsiano, con lo que la cabeza de éste, no reposa directamente en el suelo sino indirectamente por medio de estos pequeños huesos.

Los *dedos del pie* son cinco, numerados de uno a cinco, de dentro a afuera. Están formados por tres huesos pequeños: la falange, que se articula con el metatarsiano correspondiente; la falangina, en el medio, y la falangeta, en el extremo distal. El primer dedo o dedo gordo, es mucho más voluminoso que los otros; no está formado más que de dos huesos. El segundo dedo es normalmente el más largo, mientras que el quinto es el más corto.

### **3.2.2. Las articulaciones**

La reunión de dos o varios huesos constituye una articulación, unión o juntura. El estudio de las articulaciones se llama artrología.

Todas las articulaciones no son movibles por igual: unas, no permiten movimiento alguno a los huesos que las constituyen; otras, permiten movimientos muy ligeros y otra, en fin, se caracterizan por la posibilidad de ejecutar movimiento de una amplitud considerable. El grado de movilidad sirve como base para la clasificación de las diferentes articulaciones que así son repartidas en tres clases: articulaciones fijas e inmóviles llamadas suturas o sinartrosis; articulaciones muy poco móviles llamadas anfiartrosis o sínfisis y articulaciones muy móviles o diartrosis.

Las suturas que no permiten ningún movimiento no existen más que a nivel del cráneo. Los huesos están directamente unidos entre sí por muescas engranadas, de lo que resulta una inmovilidad absoluta.

Las sínfisis permiten ligeros movimientos de deslizamiento o de balance. Se las encuentra a nivel de la columna vertebral, de la pelvis (sínfisis pubiana y unión del sacro con los huesos pubianos), en el tarso, etc. En estas articulaciones los huesos no se unen directamente entre sí. Interpuesto entre ambos, se encuentra un disco fibro cartilaginoso. Así, en las articulaciones de las vértebras entre sí, se encuentra un disco intervertebral entre cada dos vértebras vecinas.

Las diartrosis son las articulaciones más numerosas; son muy móviles y se encuentran a nivel de la cadera, de la rodilla, del hombro, del codo, etc. Tienen presencia de superficies articulares recubiertas de cartílago articular, existencia de una cápsula articular, de una sinovial y de ligamentos.

El cartílago articular tiene como función amortiguar los choques, suavizar los frotamientos y oponerse al desgaste de los huesos. La cápsula articular rodea toda la articulación, es muy resistente y lo bastante suelta para permitir movimientos más o menos amplios. Dentro de la cápsula articular se encuentra una especie de saco que tapiza la cara interna llamado sinovial. Este contiene líquido viscoso, la sinovia, cuyo papel es el de lubricar las articulaciones y facilitar los movimientos.

Los ligamentos son los medios de unión de los huesos entre sí. Se presentan bajo distintas formas: bandas, cordones, etc. Los ligamentos están formados por tejidos fibrosos prácticamente inextensibles. Su resistencia es tan grande que, bajo la acción de una violencia, es el hueso el que se rompe, y no el ligamento. A pesar de ser inextensible el ligamento, puede, sin embargo, elongarse por efectos de una enfermedad o por la acción persistente de una fuerza incluso relativamente escasa. Una vez distendido no recupera su forma inicial. Este hecho tiene una importancia considerable en el aplanamiento de las bóvedas del pie.

### **3.2.2.1. Las articulaciones del pie**

#### **3.2.2.1.1. Articulación tibio-tarsiana**

El pie está unido a la pierna por la articulación tibio-tarsiana llamada también articulación del tobillo. Los ligamentos laterales de esta articulación, impiden los movimientos de lateralidad del calcáneo o por lo menos limitarlos. La articulación tibio-tarsiana pertenece al tipo de articulaciones trocleares en las que las superficies articulares tienen forma de polea y no permiten más que los movimientos de flexión y de extensión.

Los movimientos de flexión y extensión son designados, a menudo, con los nombres de flexión plantar para el movimiento que dirige la punta del pie hacia abajo (extensión del pie) y de flexión dorsal o dorsi-flexión para aquél que dirige la punta del pie hacia arriba (flexión del pie). Cuando se coloca el pie en flexión plantar, la porción posterior de la polea astragalina se eleva en la cavidad tibio-peronea; como esta porción es la más estrecha, son posibles pequeños movimientos de lateralidad. Por el contrario, si el pie se coloca en flexión dorsal es la porción más ancha de la polea astragalina la que se coloca en la cavidad, estando el astrágalo entonces mucho más encajado, lo que se opone a todo movimiento de lateralidad.

Aparte de estos movimientos de flexión y extensión, el pie ejecuta aún otros movimientos complejos de aducción y abducción combinados con los movimientos de torsión hacia adentro y hacia afuera. Estos movimientos están localizados en la articulación medio tarsiana y en la subastragalina.

#### **3.2.2.1.2. Articulación calcáneo-astragalina**

La articulación del astrágalo con el calcáneo se conoce con los nombres de calcáneo-astragalina o subastragalina. Un ligamento interóseo muy potente mantiene a los dos huesos en contacto íntimo. Existen además un ligamento externo y un ligamento posterior. Los movimientos de esta articulación son limitados, y se ponen de manifiesto especialmente en la torsión del pie.

### **3.2.2.1.3. Articulación medio-tarsiana**

Ésta es una articulación muy importante que junta a los huesos de la primera fila del tarso con los de la segunda. Pone en contacto el astrágalo con el escafoides, y el calcáneo con el cuboides. También se le llama articulación de Chopart.

#### **3.2.2.1.3.1. Articulación del astrágalo con el escafoides**

La cabeza del astrágalo está en relación con la cavidad del escafoides. La unión de los huesos viene asegurada por los ligamentos siguientes:

- 1) Del lado dorsal, el ligamento astrágalo escafoideo superior, que se extiende desde el cuello del astrágalo, al borde superior de la cavidad del escafoides. Este ligamento tiene una función especial de unión y es relativamente débil.
- 2) En la cara plantar el ligamento calcáneo escafoideo inferior se extiende desde la pequeña apófisis del calcáneo hasta el borde inferior de la cavidad del escafoides, pasando bajo la cabeza del astrágalo, al que sostiene. No sólo sirve de medio de unión a los dos huesos, sino que además debe resistir la presión. Por esta razón es de cierto espesor y muy resistente. Cuando se ha distendido, permite que la cabeza del astrágalo se deslice hacia adelante y abajo contribuyendo al aplanamiento de la bóveda plantar.

#### **3.2.2.1.3.2. Articulación calcáneo-cuboidea**

Se encuentran unidos los dos huesos por:

- 1) El ligamento calcáneo superior, situado en la cara dorsal, cuyo papel es solamente el de unir ambos huesos, siendo relativamente delgado.
- 2) El ligamento calcáneo cuboideo inferior, situado en la cara plantar, es muy potente. Se le designa también con el nombre de gran ligamento plantar. Este ligamento actúa realmente como la cuerda de un arco, contribuyendo al mantenimiento de la bóveda plantar.

Por otro parte, en la articulación medio tarsiana existe un ligamento muy fuerte que une el calcáneo con el cuboides por detrás y el escafoides por delante: es el ligamento en Y o llave de Chopart. En la articulación de Chopart es donde tienen lugar realmente los movimientos amplios del pie: abducción, aducción, torsión, etc. También se puede demostrar a éste nivel un cierto movimiento de flexión y de extensión del empeine sobre el pie.

La articulación subastragalina interviene en ligera proporción en los movimientos de torsión. Es cierto también que las articulaciones más alejadas, en especial la del primer cuneiforme con el primer metatarsiano, participan igualmente en estos movimientos. Sin embargo, en la articulación de Chopart estos movimientos tienen carácter de primordiales y es evidente que la más ligera laxitud de esta articulación, tiene efecto trasladar el peso del cuerpo de una manera anormal sobre las cabezas de los metatarsianos.

#### **3.2.2.1.4. Articulación tarso-metatarsiana**

Ésta reúne, respectivamente, los tres primeros metatarsianos con los tres cuneiformes y los dos últimos al cuboides. Une, pues, el tarso al metatarso. Se conoce igualmente con el nombre de articulación de Lisfranc.

Las proporciones óseas están unidas por una serie de ligamentos dorsales y plantares. Éstos, aparte de servir de unión a los huesos, deben asegurar la resistencia a la presión del peso del cuerpo. Son tan potentes como los primeros, pero su resistencia disminuye a medida que se van acercando al borde externo del pie. Esta articulación permite movimientos ligeros de flexión, de abducción y de aducción.

#### **3.2.2.1.5. Articulaciones intermetatarsianas**

Los metatarsianos están unidos entre sí en su base por ligamento intermetatarsianos dorsales y plantares, y además existen ligamentos interóseos en los espacios que separan los metatarsianos. Conviene observar que no existe articulación intermetatarsiana entre el primero y segundo metatarsiano. No hay más que ligeros movimientos de deslizamientos.

#### **3.2.2.1.6. Articulaciones metatarso-falangicas**

Cada uno de los metatarsianos está unido con la primera falange del dedo que le corresponde. Dos ligamentos laterales, uno externo y otro interno, se extienden desde cada metatarsiano hacia la porción inferior del extremo posterior de la falange. Estas articulaciones permiten movimientos de flexión, extensión, aducción y circunducción de los dedos del pie.

#### **3.2.2.1.7. Articulaciones interfalangicas**

Las articulaciones de las falanges con las falanginas y las de éstas con las falangetas son articulaciones en forma de polea. La unión está asegurada por dos ligamentos laterales, uno interno y otro externo. Únicamente son posibles los movimientos de extensión y de flexión.

### **3.2.3. Los músculos**

Los huesos y los ligamentos constituyen los órganos pasivos del movimiento. Los músculos, cuyo estudio constituye la miología, permiten a los huesos ejecutar los movimientos.

#### **3.2.3.1. Nociones generales sobre los músculos**

El conjunto de músculos se divide en dos principales clases: la de los músculos estriados y la de los músculos lisos.

Los músculos lisos se encuentran en las paredes de las vísceras: estómago, intestinos, vejiga, vasos, etc., presidiendo sus movimientos. No están sometidos a la acción de la voluntad. Su actividad pasa generalmente desapercibida y no nos damos cuenta de sus contracciones.

Los músculos estriados constituyen la masa carnosa del cuerpo y cuyo papel es el de producir los movimientos voluntarios. Están habitualmente fijados al hueso que debe mover por dos extremidades hechas de un tejido conjuntivo fibroso muy resistente. Estas extremidades son los tendones y el cuerpo muscular recibe el nombre de vientre del músculo.

Los músculos estriados no se presentan todos en la misma forma: unos son largos, otros anchos y planos, otros circulares. Según su forma, están repartidos en cuatro categorías:

- 1) Los músculos largos situados claramente en los miembros, al eje de los cuales son paralelos.
- 2) Los músculos anchos y planos, que se extienden en abanico y que se encuentran sobre la caja torácica.
- 3) Los músculos orbiculares, que forman especies de anillos alrededor de un orificio, por ejemplo, alrededor de los labios y de los ojos.
- 4) Los músculos esfínteres, destinado a cerrar la abertura de las cavidades naturales, por ejemplo, el ano.
- 5) Ciertos músculos poseen varios vientres sucesivos unidos por tendones intermedios: estos músculos son llamados digástricos.

Otros se dividen en uno de sus extremos en varias porciones que van a fijarse por medio de tendones a diferentes sitios. Estos músculos son llamados bíceps, tríceps o cuadríceps, según tengan dos, tres o cuatro porciones.

En el cuerpo hay alrededor de cuatrocientos músculos. El nombre de los músculos ha sido escogido de manera que recuerden su acción (flexor del dedo gordo del pie), su situación (peroneo lateral), su forma (deltoides), su dirección (recto oblicuo), sus dimensiones (grande, pequeño, mediano), según sus inserciones (esternocleidomastoideo).

Los músculos, a excepción de los cutáneos que si fijan a la piel por uno de sus extremos, se insertan en los huesos que tienen que mover por medio de tendones. Los tendones están formados por tejido fibroso extremadamente resistente y no poseen ninguna

extensibilidad ni ninguna contractilidad. Las fibras tendinosas penetran en general profundamente en el músculo al cual adhieren, íntima y fuertemente.

Para fijar el músculo al hueso, el tendón envía sus fibras al periostio. La adherencia del hueso es tal, que una violencia produce más fácilmente la ruptura del hueso que el arrancamiento del tendón a nivel de la inserción.

Los tendones tienen formas muy diversas: redondos, aplanados o prismáticos. Los músculos aplanados, en especial, están dotados de tendones muy aplanados a su vez, que se fijan sobre superficies bastante extensas, conocidos con el nombre de aponeurosis de inserción.

En ciertos lugares, los músculos y los tendones están en contacto con órganos duros contra los cuales deben deslizarse. Con el fin de facilitar los frotamientos se interponen bolsas serosas, entre los órganos que deben deslizarse entre sí. Estas bolsas serosas son sacos que encierran en su interior un líquido viscoso: la sinovia. En torno a los tendones que deben efectuar largos desplazamientos a lo largo de los huesos, particularmente como en el caso de los que pasan a nivel del tobillo, las bolsas tendinosas toman el aspecto de largo manguitos que rodean un tendón y reciben el nombre de vainas sinoviales.

Los músculos estriados poseen numerosas propiedades importantes: contractilidad, tonicidad, elasticidad y excitabilidad.

La *contractibilidad*, propiedad característica del músculo, es la propiedad que tiene de acortarse bajo el efecto del influjo nervioso. La contracción del músculo tiene como efecto el de aproximar sus dos puntos de inserción en la medida en que las articulaciones lo permiten, siendo así como se producen los movimientos. El músculo que se contrae disminuye su longitud, pero al mismo tiempo se hincha de manera que su volumen no varía de una manera sensible.

La contracción del músculo se produce bajo la acción del influjo nervioso. Para permitir a éste alcanzar el músculo, los cordones nerviosos motores se dirigen hacia él, ensanchándose hasta formar lo que se llaman placas terminales motrices. Las fibras nerviosas se prolongan dentro del músculo hasta llegar a estar en contacto con las fibras

musculares. Bajo el efecto del impulso nervioso, los discos oscuros, se contraen y provocan el acortamiento del músculo. Cuando el influjo nervioso cesa en su acción, el músculo cesa de contraerse, relajándose y, gracias a su *elasticidad*, vuelve a tomar la forma que tenía antes de la contracción. Los discos claros son los que dan al músculo su elasticidad.

En un ser vivo, los músculos, incluso en estado de reposo, están siempre ligeramente tensos. Esta propiedad se llama *tonicidad* o tono muscular. La tonicidad es resultado de una sucesión ininterrumpida de pequeñas excitaciones nerviosas, la excitabilidad es la facultad del músculo de poder ser puesto en estado de contracción. El excitante normal del músculo es el influjo nervioso. Las corrientes eléctricas, las variaciones de temperatura, ciertas sustancias químicas (en especial los ácidos), los agentes mecánicos (choques, pellizcos, vibraciones), pueden provocar la contracción muscular, por acción directa sobre el mismo músculo o por acción indirecta por medio del nervio motor. La excitabilidad muscular está influenciada por diversos factores: por ejemplo, aumenta con el calor hasta un punto óptimo y, por el contrario, disminuye por la fatiga, por el frío.

Los movimientos no son posibles más que en virtud de la disposición particular de los músculos sobre las palancas óseas. Cada segmento del cuerpo posee dos clases de músculos, una de las cuales obliga a ejecutar un movimiento mientras que la otra permite el movimiento inverso. Así es como se distinguen los flexores y los extensores, los abductores y aductores, los pronadores y los supinadores.

Los músculos que ejecutan una acción inversa de aquella provocada por otros músculos son los antagonistas una acción inversa de aquella provocada por otros músculos son los antagonistas de éstos; por ejemplo, los flexores son los antagonistas de los extensores y viceversa.

El tono muscular establece el equilibrio necesario entre los músculos antagonistas. Si por una razón se rompe el equilibrio por disminución de la tonicidad de un músculo, inmediatamente el músculo antagonista se acorta aún sin que haya contracción activa, lo que puede dar lugar a desplazamientos anormales de segmentos óseos, movilizadas por músculos en desequilibrio.

### 3.2.3.2. Músculos de la pierna

Todos los músculos de la pierna, a excepción de uno solo, tienen acción sobre el pie. Están agrupados en tres regiones claramente distintas y separadas por tabiques de tejido conjuntivo. Una primera región, la anterior, se extiende desde la cresta de la tibia hasta el peroné y comprende los músculos flexores del pie y extensores de los dedos del pie; la segunda región, externa, corresponde a la cara externa del peroné y está formada por los músculos abductores; la tercera región, posterior, ocupa toda la cara posterior de la pierna y alberga los músculos extensores del pie y flexores de los dedos del pie.

#### 3.2.3.2.1. Región anterior

Comprende cuatro músculos que son de dentro hacia fuera:

- ***Tibial anterior:***

Se inserta por una parte en la porción superior de la cara externa de la tibia y, por otra parte, en la cara inferior del primer cuneiforme y en la base del primer metatarsiano en la faceta interna de la cara inferior. Este músculo sostiene y eleva el borde interno del pie, puesto que es un supinador. No juega ningún papel activo durante la carga del pie en la estación vertical; pero, por el contrario, es muy activo durante la marcha en el curso del desplazamiento del pie, oponiéndose a la caída del empeine sobre el suelo (Hohmann).

- ***Extensor propio del dedo gordo:***

Comienza en la parte media de la pierna, entre el tendón del tibial anterior y el del extensor común de los dedos. Su parte superior se inserta en la posición media de la cara interna del peroné; y hacia abajo se fija a la segunda falange del dedo gordo.

Este músculo posee una acción sobre la articulación tibio tarsiana por encima de la que pasa y sobre la primera articulación metatarsofalángica. Interviene, pues, en la flexión dorsal del pie; ordena la extensión del dedo gordo sobre su metatarsiano. Juega igualmente un papel como auxiliar del tibial anterior en la aducción del pie (Schotte).

- ***Extensor común de los dedos:***

El extensor común de los dedos nace de la parte superior de la cara interna del peroné, acompaña al tibial anterior hasta la mitad de la altura de la pierna, lugar donde nace el extensor propio del dedo gordo, que se intercala en los dos. A nivel del tobillo, pasa bajo el ligamento anular del tarso y se divide en cuatro tendones que van a fijarse, respectivamente, sobre las últimas falanges de los cuatro últimos dedos. Por su acción sobre la articulación tibiotalar es flexor del pie sobre la pierna, por otra parte, es extensor de los cuatro últimos dedos sobre su metatarsiano respectivo.

- ***Peroneo anterior:***

El peroneo anterior es un músculo muy delgado que se confunde generalmente con el extensor común de los dedos. Nace del extensor común y va a fijarse sobre el quinto metatarsiano.

### **3.2.3.2.2. Región externa**

Dos músculos únicamente forman la región externa: el peroneo lateral largo y el peroneo lateral corto, que están aislados en un estuche aponeurótico unidos al peroné.

- ***Peroneo lateral largo:***

El peroneo lateral largo empieza en la cabeza del peroné. Su porción carnosa desciende a lo largo del borde externo de la pierna, pasa por detrás del maléolo externo, donde puede ser fácilmente seguido. Desde ahí, se desliza bajo los huesos del tarso y se dirige oblicuamente hacia el interior y hacia delante hasta la base del primer metatarsiano, en cuya carilla plantar externa se inserta.

La acción de este músculo es muy importante. Es extensor del pie sobre la pierna (flexión plantar) y lleva al pie en abducción y en pronación. Esta última es más apreciable en la porción anterior del pie, como consecuencia de su inserción en la base del primer metatarsiano. Por otro lado tiene un papel considerable en el mantenimiento de la bóveda del pie: sostiene el borde externo del pie y por su tendón, que atraviesa oblicuamente la bóveda tarsiana y transversal, contribuye a mantenerla en su posición normal. Por otra

parte, la tracción que lleva a cabo sobre la base del primer metatarsiano hace que la bóveda plantar conserve su concavidad.

- ***Peroneo lateral corto:***

El peroneo lateral corto se inserta en la porción media de la cara externa del peroné, desciende bajo el peroné lateral y su tendón pasa por detrás del maléolo externo para ir a fijarse en una apófisis muy saliente que se encuentra en la base del quinto metatarsiano.

Es un potente abductor del pie y al elevar su borde externo actúa como pronador. Contribuye también a la extensión del pie sobre la pierna (flexión plantar).

### **3.2.3.2.3. Región posterior**

La región posterior comprende dos capas musculares diferentes: una capa superficial formada por el tríceps sural, que es el único que se fija en la porción posterior del pie y una capa profunda que comprende el tibial posterior y los flexores de los dedos del pie.

- ***Los gemelos:***

La cara posterior de la pierna está ocupada por dos músculos superficiales, cuyos cuerpos carnosos forman el relieve de la pantorrilla. Estos músculos son los gemelos externo e interno. Tienen su origen en la extremidad inferior del fémur; el gemelo interno arranca del cóndilo interno y el gemelo externo del cóndilo externo. Desde allí se dirigen ambos en dirección al tendón de Aquiles, donde se fijan.

El tendón de Aquiles es el tendón más fuerte de todo el cuerpo. Comienza un poco más o menos hacia la mitad de la altura de la pierna, siendo a ese nivel ancho y grueso, se dirige hacia el calcáneo estrechándose y adelgazándose y se fija en la parte inferior y posterior de este hueso.

- ***El sóleo:***

Debajo de los dos gemelos se encuentra el tercer músculo de la capa superficial: el sóleo. Nace de la parte superior de la cabeza del peroné y de la línea oblicua de la tibia, desde donde sus fibras convergen hacia el tendón de Aquiles, al cual se fijan.

Estos tres músculos, gemelos y sóleo, que se reúnen en un tendón común, el tendón de Aquiles, constituyen el tríceps sural.

Los dos gemelos, por sus inserciones superiores en el fémur, son flexores de la pierna sobre el muslo. La acción del tríceps sural tiene lugar principalmente sobre la articulación tibiotarsiana. Este músculo produce la extensión del pie (flexión plantar). Eleva el talón y por su tracción sobre la porción posterior del calcáneo tiene tendencia a provocar el descenso de la apófisis mayor de este hueso. Por otro lado, actúa sobre la articulación subastragalina y en la que, como consecuencia de la disposición de sus superficies articulares, provoca un movimiento de aducción y de supinación del pie (torsión interna).

- ***Plantar delgado:***

Es un músculo delgado y muy fino que arranca del cóndilo externos del fémur y que atravesando oblicuamente la porción posterior de la pierna entre los gemelos y el sóleo va a insertarse en el borde interno del tendón de Aquiles. Está considerado como un músculo rudimentario, vestigio de otro que debió ser mucho más desarrollado. Su fuerza muscular es insignificante y sus inserciones no le permiten más acción que la del tríceps sural.

- ***Poplíteo:***

Este músculo de la capa profunda que se extiende desde el cóndilo externo del fémur a la línea de la tibia, es un flexor de la pierna sobre el muslo que no tiene ninguna acción sobre el pie.

- ***Tibial posterior:***

Arranca de la línea oblicua de la tibia y de la cara interna del peroné; desciende contra la tibia y el peroné, entre los dos músculos flexores y su tendón pasa por la gotiera retro-maleolar interna para ir a insertarse en el tubérculo del escafoides. Por su inserción en el escafoides tiene un papel importante en el mantenimiento del borde interno del pie. Por su acción sobre la articulación tibiotarsiana mantiene el equilibrio entre la extensión y la flexión del pie y puede ser considerado como un extensor del pie. Por esta razón es antagonista del tibial anterior. Por otra parte, actúa sobre la articulación de Chopart llevando al pie a la aducción y le hace ejecutar una torsión hacia el interior. Es el supinador más potente de la porción posterior del pie.

- ***Flexor común de los dedos:***

El flexor común de los dedos arranca de la línea oblicua de la tibia y de su cara posterior. Su tendón pasa tras el maléolo interno y sigue el camino situado en la cara interna del calcáneo bajo la apófisis menor. Se divide entonces en cuatro tendones que, en dirección más o menos oblicua, va a fijarse a la última falange de cada uno de los cuatro últimos dedos.

Antagonista del extensor común actúa principalmente como flexor de los cuatro últimos dedos y también como extensor del pie por acción sobre la articulación tibiotarsiana. Sostiene por igual la bóveda longitudinal y transversal. Esta acción, que no debe olvidarse, resulta más evidente si se produce una fuerte flexión de los dedos, estando el pie apoyado sobre una superficie plana, con lo cual se ve acentuarse muy claramente la bóveda longitudinal.

- ***Flexor propio del dedo gordo:***

El flexor propio del dedo gordo se inserta en la cara posterior del peroné, desde donde desciende hacia el maléolo interno por detrás del cual pasa su tendón. Este continúa por el canal situado bajo la apófisis menor del calcáneo y va a insertarse en la última falange del dedo gordo.

La acción de este músculo es la flexión del dedo gordo, sin embargo, por la situación de su tendón que desde la apófisis menor del calcáneo hasta el dedo gordo sigue el borde interno del pie y pasa por debajo del primer metatarsiano, tiene también una acción importante en el mantenimiento de la bóveda plantar al modo de la cuerda de un arco. El paso del tendón bajo el “sustentaculum tali” actúa de hecho como un sostén activo del calcáneo. Es también supinador del talón, al cual impide que se vuelva hacia el interior.

Estos músculos de la pierna y los diversos órganos de la pierna están mantenidos por la aponeurosis de la pierna que se une alrededor de toda la rodilla a la aponeurosis del muslo. Está fijada a la cabeza del peroné y a la cara interna de la tibia; envía prolongaciones que forman los tabiques de separación entre los diferentes grupos musculares.

En la porción inferior de la pierna se termina por detrás del talón, mientras que por delante se continúa con la aponeurosis dorsal del pie después de haber formado, por aumento de su espesor, el ligamento anterior del tarso. Los tendones de los músculos que pasan de la pierna del pie, así los diversos órganos, vasos, etc., deben mantenerse fuertemente acodados al pasar a nivel de la unión del pie y la pierna, siendo los ligamentos anulares del tarso los que resuelven esta necesidad.

Estos ligamentos anulares están formados por un engrosamiento de la aponeurosis de la pierna y se distinguen tres:

1. El ligamento anular del tarso, que arranca de la parte superior externa del calcáneo, pasa por delante de la garganta del pie y se divide en un fascículo superior que va a insertarse en el maléolo interno y en un fascículo inferior que se dirige a la plantar del pie. Este ligamento contiene los tendones del peroneo anterior, de los músculos flexores y del tibial anterior.
2. El ligamento anular interno del tarso se extiende desde la parte posterior del maléolo interno a la parte posterior e interna del calcáneo. Mantiene fijos los tendones del tibial posterior y de los músculos flexores de los dedos, así como los vasos y los nervios que llegan a la planta del pie.
3. El ligamento anular externo del tarso, cuyo papel es el de mantener en su sitio los tendones en los músculos peroneo lateral largo y corto, se extiende desde el maléolo externo a la porción posterior externa del calcáneo.

### **3.2.3.3. Los músculos del pie**

Los músculos del pie se distribuyen entre la cara dorsal que no tiene más que uno y la cara planta que tiene diecinueve.

### 3.2.3.3.1. Cara dorsal

- ***El pedio:***

Este músculo nace en la región astragalocalcánea, en la apófisis mayor del calcáneo. Su ancho cuerpo carnoso no se extiende mucho hacia adelante y recubre únicamente los huesos del tarso, a cuya altura se desprenden de él cuatro tendones que van a fijarse, el primero, a la falange del dedo gordo y los otros tres en las del segundo, tercero y cuarto dedos, donde se confunden con las inserciones de los tendones del flexor largo de los dedos. El pedio está recubierto por los tendones del extensor común y por la aponeurosis dorsal. Su acción consiste en la extensión de los cuatro primeros, por lo cual podía ser llamado también extensor corto de los dedos.

### 3.2.3.3.2. Cara plantar

Los músculos de la cara plantar están repartidos en tres regiones:

- 1) una región interna formada por los músculos del dedo gordo.
- 2) una región externa formada por los músculos del dedo pequeño.
- 3) una región media que tiene un músculo común a los cuatro últimos dedos, el flexor corto plantar, un músculo accesorio, los lumbricales y los interóseos.

- ***Región interna***

Está formada por tres músculos que permiten al dedo gordo ejecutar los movimientos de flexión, de aducción y de abducción. Estos músculos son, pues el flexor corto del dedo gordo, el aductor y el abductor del dedo gordo.

El aductor del dedo gordo, hace relieve a lo largo del borde interno del pie. Nace del tubérculo interno de la cara inferior del calcáneo y del ligamento anular del tarso. Su tendón, que comienza un poco distalmente, respecto de la base del primer metatarsiano, se extiende hasta el borde interno de la falange del dedo gordo. Su acción es la de llevar el dedo gordo a la aducción, es decir, separarle de los otros dedos. Por su situación, evidentemente aumenta la bóveda plantar.

El flexor corto del dedo gordo, se encuentra por debajo del abductor del dedo gordo. Tiene dos fascículos que nacen de los huesos de la segunda fila del tarso, especialmente del escafoides y de los cuneiformes. El fascículo interno está unido al aductor y sus dos tendones se confunden. El fascículo externo, en relación con el fascículo oblicuo del abductor y su tendón, se confunde con el de éste. Entre los tendones de estos dos fascículos pasa el tendón del flexor largo del dedo gordo. Además de su acción de flexor del dedo gordo, también contribuye a mantener excavada la bóveda plantar.

El abductor del dedo gordo, generalmente se describe como un solo músculo, pero en realidad está formado por dos partes diferenciadas que se conocen con los nombres de fascículo oblicuo y fascículo transverso. El fascículo oblicuo nace de la cara inferior del cuboides y de la base de los metatarsianos cuarto y quinto, desde donde se dirige oblicuamente y estrechándose hacia el hueso sesamoideo. Su tendón se confunde con el del fascículo externo del flexor corto del dedo gordo. El fascículo transverso está formado por tres lengüetas que nacen, respectivamente, debajo de cada una de las cabezas de los tres últimos metatarsianos, reuniéndose en un tendón común que va a insertarse junto con el tendón externo del flexor corto al hueso sesamoideo externo y al borde externo de la falange.

- ***Región externa***

Al igual que el dedo gordo, el dedo pequeño está dotado de tres músculos que le permiten ejecutar movimientos independientes de los de los otros dedos, en cuanto a la flexión, abducción y aducción.

El abductor del dedo pequeño forma el borde externo del pie y es completamente simétrico al aductor del dedo gordo. Nace del tubérculo externo de la cara inferior del calcáneo y va a fijarse al borde externo de la primera falange del dedo pequeño. Su acción es la abducción del dedo pequeño, es decir: su separación hacia el exterior.

El flexor corto del dedo pequeño se encuentra por debajo del abductor del mismo dedo, juntamente con el cual forma el borde externo del pie. Lo mismo que el flexor corto del dedo gordo. Nace de los huesos de la segunda fila del tarso. Se extiende desde el

cuboides al borde externo de la primera falange del dedo pequeño. Su acción es la flexión independiente del dedo pequeño.

El oponente del dedo pequeño es un pequeño músculo que, con frecuencia falta, y que está situado por dentro del flexor corto. Se extiende desde la base del quinto metatarsiano hasta la primera falange del dedo pequeño.

- ***Región media***

Los músculos de la región media interesan especialmente a los cuatro últimos dedos y están dispuestos en varias capas. Una capa superficial formada por el flexor corto y plantar, una capa media que comprende el accesorio del flexor largo y los lumbricales y, por último, una capa profunda formada por los interóseos.

El flexor corto plantar nace del tubérculo interno del calcáneo y de la aponeurosis plantar. Su cuerpo carnoso se divide en cuatro fascículos que se insertan en los bordes de la segunda falange de cada uno de los cuatro últimos dedos mediante un tendón bifurcado. El papel de este músculo es flexionar las segundas falanges sobre las primeras.

El flexor largo de los dedos sigue una dirección oblicua atravesando la planta del pie. Para corregir la dirección de su tracción sobre los dedos está dotado de un músculo accesorio que, partiendo de la cara inferior del calcáneo, se inserta a lo largo de su borde externo.

Los lumbricales son cuatro pequeños músculos situados en los ángulos que forman los cuatro tendones terminales del flexor largo común de los dedos. El primero arranca a lo largo del tendón que termina en el segundo dedo. Los tres restantes se insertan en los dos tendones que forman el ángulo en cuyo interior se encuentran. Desde estas inserciones van a fijarse al borde interno de la primera falange de los cuatro últimos dedos. Actúan como flexores de la primera falange.

Los músculos interóseos ocupan los espacios situados entre los metatarsianos. Son un total de siete: cuatro dorsales y tres plantares.

Los interóseos plantares ocupan los tres últimos espacios interóseos en los que se insertan sobre casi toda la longitud de la cara interna de los tres últimos metatarsianos, es

decir, sobre la cara que mira hacia el eje del pie. Desde ahí, su tendón va a fijarse sobre el lado interno de la primera falange del dedo correspondiente. Su papel consiste en aproximar los dedos al eje del pie y, por otro lado, son flexores de las primeras falanges.

Los interóseos dorsales se unen a las caras laterales de los dos metatarsianos entre los que se encuentran y desde ahí van a fijarse en la primera falange por el lado que no mira al eje del pie. De esta manera el segundo dedo recibe un tendón en cada una de sus caras laterales, mientras que el primero y el quinto no reciben ninguno.

Los interóseos dorsales alejan el tercer y cuarto dedo del eje del pie y permiten al segundo ejecutar movimientos de lateralidad en los dos sentidos. En resumen, los interóseos dorsales y plantares rigen los movimientos de lateralidad del segundo, tercero y cuarto dedos, así como la aducción del dedo pequeño.

#### **3.2.4. La circulación de la pierna y el pie**

El sistema circulatorio está constituido por un órgano motor: el corazón. Esta lanza la sangre a un sistema de canalizaciones que comprende las arterias, los capilares sanguíneos y las venas. Las arterias son los vasos que alejan la sangre del corazón y, por tanto, contienen sangre roja en la circulación mayor y oscura en la menor. En cuanto a las venas, que son los vasos que acercan la sangre al corazón, lo hacen llevando sangre oscura en la gran circulación y roja en la menor.

En el miembro inferior, la acción de la gravedad hace que el retorno de la sangre al corazón sea más difícil que en otras regiones y esa es la razón de ser de las válvulas. La red de vasos capilares frena considerablemente el impulso dado a la sangre por el trabajo cardíaco. Por eso, otras causas externas deben contribuir a la circulación de retorno.

El ascenso de la sangre en los miembros inferiores, durante la marcha, está considerablemente favorecido por las contracciones musculares. Durante los movimientos del cuerpo, efectivamente, los músculos se contraen y aumentan de tamaño, de tal manera que las venas se ven comprimidas entre dos músculos, o entre un músculo y el hueso o

entre un músculo y la piel. Así a sangre se expulsa de la parte comprimida y como las válvulas impiden su reflujo, debe remontarse necesariamente hacia el corazón. La relajación muscular que sigue, permite que se rellenen de nuevo las venas que habían sido vaciadas por la compresión precedente.

El funcionamiento defectuoso de los músculos, es especial su laxitud, supone un obstáculo considerable para la circulación de los miembros y puede provocar en ellos una acumulación de sangre. Las venas tienen tendencia en ese caso a la formación de varices. El músculo, a su vez, sufre repercusiones como consecuencia de la circulación deficiente y al no recibir suficiente sangre, su riego es defectuoso, su alimentación precaria y la eliminación de desechos, incompleta.

### **3.2.5. El sistema nervioso**

El funcionamiento de los órganos y aparatos que forman el cuerpo humano es posible gracias a la existencia del sistema nervioso que, por un lado, asegura la relación del individuo con el mundo exterior mediante la percepción de sensaciones y la transmisión de órdenes motoras y, por otro, regula el funcionamiento armónico de los órganos relacionando entre sí todas las partes del organismo.

El sistema nervioso comprende: un sistema nervioso central, o cerebro espinal, consciente y voluntario que dirige los músculos. Y un sistema nervioso simpático o vegetativo, autónomo e inconsciente que dirige los órganos. El segundo sistema depende del primero. Este doble aparato le da a nuestro cuerpo, pese a su complejidad, la sencillez indispensable para su acción sobre el mundo exterior.

Los órganos que forman el sistema nervioso están integrados por una sustancia gris que constituye las células nerviosas (neuronas) y una sustancia blanca de la que se componen los nervios, y cuyo papel es únicamente de conducción. Los nervios son simples elementos conductores, que unen entre sí los centros nerviosos con los diferentes órganos para transmitir sensaciones u órdenes motoras. Los hay que no transmiten más que sensaciones (nervios sensitivos) o bien que no transmiten más que órdenes motoras

(nervios motores) o bien los que son mixtos y contienen fibras especializadas sensitivas y motoras (nervios sensitivo-motores).

El cerebro es el centro regulador de los movimientos voluntarios de manera que los coloque en armonía con la posición del cuerpo en el espacio, jugando un importante papel en la regulación del equilibrio.

La médula espinal es un largo cordón que ocupa el canal raquídeo de la columna vertebral y da origen a treinta y un pares de nervios raquídeos. La médula está formada por sustancia blanca y sustancia gris. Unos cordones de sustancia blanca sirven para conducir a los centros superiores las sensaciones periféricas recogidas por los nervios (vía sensitiva) y otros para transmitir el impulso motor a los diferentes órganos (vía motriz). En lo que se refiere a las neuronas de la sustancia gris, unas sirven de relevo para las sensaciones y las otras coordinan el impulso motor o bien dan directamente órdenes motrices sin que la sensación deba alcanzar necesariamente al cerebro (movimiento reflejo).

En el funcionamiento del sistema nervioso, que es extremadamente complejo, entran en juego tres clases de órganos: las terminaciones nerviosas, los nervios y los centros nerviosos. Las terminaciones nerviosas perciben las sensaciones (calor, dolor, presión, luz, etc.) y por medio de los hilillos nerviosos transmiten las impresiones recibidas a los centros correspondientes. Estos centros interpretan las impresiones y reaccionan en unos casos conservando la impresión para la memoria y en otros dando una orden motora a los órganos activos: músculos, glándulas, etc.

El sistema central se comunica con todos los músculos del cuerpo por los nervios motores y con todos los órganos por las ramificaciones que desembocan en el gran simpático.

### **3.2.5.1. Los nervios de la pierna y del pie**

Todos los nervios de la pierna y del pie tienen como origen común el nervio ciático mayor. Este nervio desciende en medio de la parte posterior del muslo, hasta la parte

superior del hueso poplíteo, donde se divide en dos ramas principales: el ciático-poplíteo externo y el ciático-poplíteo interno.

### **3.3. Generalidades del pie**

El pie, propiamente dicho, se describe desde la articulación del tobillo hasta los dedos. Durante la bipedestación, el pie toma contacto con el suelo por dos puntos de apoyo: el talón y el conjunto de las cabezas de los metatarsianos, a lo que también se ha llamado talón anterior. Entre estos dos puntos de apoyo, los huesos están dispuestos en forma de bóveda, lo que le da a la cara superior del pie su forma convexa y a la inferior su forma cóncava en sentido longitudinal, y su punto más alto queda situado a la altura de la articulación del escafoides con el astrágalo.

Los dedos de un pie normal, no deformado, son redondos. No tiene esta forma cuadrada y ángulos que se ve normalmente tras el empleo un poco prolongado de zapatos puntiagudos y estrechos. No se encuentran comprimidos los unos contra los otros, sino que se disponen al modo de las varillas de un abanico, quedando cada uno en la prolongación del metatarsiano correspondiente, con lo cual, queda un espacio libre entre cada dos, en especial entre el primero y segundo dedos.

El dedo gordo debe encontrarse exactamente en la prolongación de una línea que une el centro del talón con la raíz del dedo gordo y que se llama línea de Meyer.

En virtud de esta disposición, el pie normal es claramente más ancho por delante que por detrás.

Sin embargo, es muy poco frecuente que el dedo gordo y el pequeño estén perfectamente derechos y situados exactamente en la prolongación del metatarsiano correspondiente.

Así, debe considerarse como normal la ligera disposición en valgus del primero, y en varus del quinto dedo, desviaciones que, cuando son mínimas, no tienen ninguna importancia sobre la mecánica del pie.

Los dedos no tienen, todos, la misma longitud. El segundo es, generalmente, un poco más largo y sobrepasa ligeramente al primero. La longitud de los otros, decrece progresivamente hasta alcanzar al quinto, de tal modo que sus extremidades quedan dispuestas en forma de arco.

La huella que deja un pie en estado de carga proporciona unos informes muy valiosos acerca de su estado.

Las características de la huella de un pie normal son las siguientes:

El talón queda completamente marcado, lo mismo que el talón anterior (cabeza de los metatarsianos) en toda su amplitud. Una delgada franja, uniría el talón con el talón anterior, señalando de esta forma el borde externo del pie. Esta franja se estrecha rápidamente a partir del borde interno del talón, para alcanzar su misma anchura hacia la base del quinto metatarsiano. La línea que delimita el borde externo está ligeramente incurvada hacia adentro.

La parte correspondiente a la bóveda longitudinal interna no deja ninguna huella. Los cuatro últimos dedos se marcan por sus falangetas, que son las que entran en contacto con el suelo, quedando su huella separada del talón anterior por un amplio espacio libre. En cuanto al dedo gordo, se marca más fuertemente y su huella queda más próxima a la del talón anterior.

### **3.4. Biomecánica del pie**

#### **3.4.1. La estática del pie: la cúpula plantar**

El pie primitivo era flexible y plano; la cúpula plantar apareció más tarde, cuando el hombre adoptó la posición vertical. Este importante acontecimiento modificó toda nuestra estática. Para mantener el equilibrio: cabeza, raquis, caderas, rodillas y articulaciones tibiotarsianas, es necesaria una vigilancia muscular constante. La cúpula plantar que protege la musculatura intrínseca del pie, las arterias, los nervios y las venas.

El pie reposa sobre dos grandes zonas: una zona anterior o triángulo de propulsión (Rabischong) y el talón posterior que corresponde a las tuberosidades plantares del calcáneo.

El borde externo del pie aparece como una banda intermedia más delgada, cóncava hacia adentro.

Si hay que comparar el pie con un elemento mecánico, nuestra preferencia iría hacia una lámina elástica de forma helicoidal presentando una torsión de 90 grados.

El arco interno es el más marcado, el más fuerte y el solo arco real del pie. Se inicia en el calcáneo, sigue con el astrágalo y, contrariamente a las ideas clásicas, alcanza su punto culminante a nivel del escafoides (15 a 18 mm del suelo), después desciende para terminar a nivel de los sesamoideos por intermedio de la cabeza del 1er metatarsiano. Constituye un resorte largo y flexible que se alarga y desciende ligeramente cuando el pie está en carga.

El arco externo, resorte corto, duro y resistente, debe soportar una presión importante. Es clásico decir que un pie normal se desplaza regularmente del talón a la punta sobre su borde externo.

La estabilidad de la bóveda plantar está asegurada por potentes elementos: imbricado óseo y refuerzo ligamentoso. Esto es lo que da al pie su autonomía.

Existe una zona de solidez ósea. Corresponde a la primera hilera del tarso, oblicua hacia adelante y hacia adentro, y que se une en las bases de los metatarsianos siguiendo la interlínea irregular de Lisfranc. La imbricación de los metatarsianos en el tarso (sobre todo el segundo, profundamente incrustado entre la primera y tercera cuña) es un elemento de solidez.

Este arbotante se apoya, por fuera, en el cuboides, que está en contacto directo con cinco huesos: calcáneo, escafoides, tercera cuña y cuarto y quinto metatarsianos.

Por intermedio del calcáneo, el cuboide se encuentra en contacto directo con el astrágalo. Su forma de cuña, escribe Destot, lo convierte en la clave de la bóveda, tanto en sentido anteroposterior como en sentido lateral.

Arquitectónicamente hablando, el término puede parecer inexacto, ya que no se trata de una bóveda central. Pero es preciso destacar que cada pie corresponde sólo media bóveda: la verdadera clave de la bóveda se encontraría situada entre ambos pies. Por tanto, la concepción de Destot debe ser conservada, ya que tiene en cuenta el juego de las presiones.

Los ligamentos que unen las distintas piezas óseas sólo permiten a éstas una escasa movilidad; así pues, colaboran al sostén de la bóveda.

El potente ligamento lateral interno de la articulación tibiotarsiana (ligamento deltoideo) impide al astrágalo y al escafoide bascular hacia adentro.

El principal elemento fibroso de solidez es el gran ligamento plantar, formado por un plano profundo calcaneocuboideo y por un plano superficial calcaneometatarsiano. Cuando está a tensión, no es posible ningún movimiento.

Basmajian y Stecko han demostrado electromiográficamente que un peso de 50 a 100 kg era cómodamente soportado por las estructuras pasivas de la cúpula plantar (huesos y ligamentos). Los músculos entran en juego a partir de los 200 kg. Constituyen una reserva dinámica destinada a intervenir en caso de sobrecarga. Pero la primera línea de defensa de los arcos del pie es ligamentosa.

Esquemáticamente, los músculos extrínsecos, como el peroneo lateral largo, no están destinados a mantener la bóveda del pie. Pero, por el contrario, todos los músculos que se insertan en el pie tienen como misión asegurar el equilibrio y la propulsión del cuerpo a partir de este solo punto fijo que se ancla en el suelo.

### 3.4.2. La dinámica del pie: huella plantar

Los diferentes aspectos de la huella plantar durante el desarrollo del paso se describen a continuación:

Inicio de apoyo de talón.

Apoyo completo del talón.

Inicio del apoyo del talón anterior.

La huella anterior así formada ocupa todo el antepié. La huella posterior es ovalada. Se unen por el borde externo.

La banda externa se dibuja totalmente.

La presión disminuye en el talón y aumenta en el antepié.

El talón se eleva. El pulpejo de los cinco dedos se adhiere vigorosamente al suelo. La primera cabeza y el pulpejo del dedo gordo constituyen el apoyo directo esencial. Las cuatro cabezas externas y el pulpejo de los cuatro dedos proporcionan un apoyo directo menos importante proporcional a su superficie.

El apoyo disminuye sobre la quinta cabeza.

Se apoya durante una fracción de segundo sobre la cuarta.

El apoyo externo pasa de la cuarta a la tercera cabeza.

La huella anterior se reduce todavía más. El apoyo actúa intensamente sobre el dedo gordo, sobre la primera cabeza, con menos fuerza sobre la segunda y sobre los dedos medios que descargan las cabezas correspondientes. La huella del quinto dedo desaparece.

Cuando el desarrollo del paso es completo, el apoyo sobre la primera cabeza se encuentra notablemente reducido o incluso ausente.

Este es el esquema del desarrollo del paso para un pie totalmente normal, con arcos bien individualizados y músculos potentes.

### **3.5. Teoría para la Resolución de Problemas de Inventiva (TRIZ)**

TRIZ es un acrónimo en ruso para “*Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadach*”, que en español se traduce como Teoría de Resolución de Problemas Inventivos. Esta fue desarrollada por el ingeniero mecánico Genrich Altshuller, quien, trabajando en la oficina de patentes de la marina soviética, detectó que todas las invenciones que analizaba, independientemente del campo científico al que pertenecieran, partían de principios similares. Este trabajo de Altshuller inicia en 1946.

Podemos definir a TRIZ como una metodología, un sistema de herramientas, una base de conocimientos y una tecnología basada en modelos para generar ideas y generar soluciones innovadoras de problemas (Córdova, 2012). TRIZ es una metodología que auxilia en el proceso creativo de innovación de productos y se constituye de varias herramientas para apoyar a los proyectistas (Oropeza, R., 2011). TRIZ es un método sistemático para aumentar la creatividad. Se basa en el estudio de modelos de evolución y patentes y en un estudio integrado del análisis de cómo se han resuelto diferentes tipos de problemas. Las personas que resuelven problemas de manera intuitiva, se encuentran con ideas adicionales (Oropeza, R., 2010). TRIZ proporciona las herramientas y los métodos a usar en la formulación de problemas, en el análisis de sistemas, en el análisis de fallas y en los patrones de evolución de los sistemas. Apunta a crear un acercamiento algorítmico a la invención de nuevos sistemas y al refinamiento de sistemas obsoletos.

A partir de los años 80, la teoría se expandió a nivel mundial y actualmente se utiliza por múltiples empresas, integrándose efectivamente con otras estrategias de diseño (Moehrle, 2005). Actualmente, el trabajo investigativo alrededor de la teoría se orienta, entre otros, hacia el uso de principios inventivos derivados de la biología (Vicent et al. 2005), el trabajo multidisciplinar (Gonzalez-Cruz, et al. 2008), el trabajo sinérgico con otras estrategias de diseño y creatividad (Kang 2004) (Aguilar et al. 2008).

La aplicación de esta teoría no está limitada a un simple campo de la ingeniería. Ahora, TRIZ es un gran ente de conocimiento el cual incluye varias técnicas de resolución de problemas basados en los patrones.

Más de 40 años de estudio de patentes, tomadas de diferentes áreas de la ingeniería, resultó en varios descubrimientos importantes los cuales forman la filosofía de TRIZ:

- Todos los sistemas ingenieriles evolución acorde a los mismos patrones, independientemente del campo al cual pertenecen. Estos patrones pueden ser estudiados y usados para eficientizar la resolución de problemas, así como para la previsión de futuras evoluciones de cualquier sistema de ingeniería.
- Los sistemas de ingeniería, así como los sistemas sociales, evolucionan a través de la eliminación de varios tipos de conflictos. El conjunto básico de principios para la eliminación de conflictos es universal para todos los campos de la ingeniería. El origen de los principios es basado en los patrones de desarrollo de los sistemas ingenieriles.
- Cualquier problema de inventiva puede ser representado como un conflicto entre un nuevo requerimiento y los parámetros de un prototipo de sistema ingenieril que ya no es capaz de satisfacer estos requerimientos. Encontrar una solución de inventiva al problema significa resolver un conflicto sin comprometer el sistema.

Cuando se aborda un problema inventivo desde la teoría TRIZ, se conduce el proceso hacia la búsqueda estructurada de soluciones más específicas, pues el problema inicial se convierte en uno general de diseño TRIZ, el cual se basa en el análisis y clasificación de un gran número de problemáticas en diversos campos de la ingeniería. El potencial de la teoría radica en la habilidad para sugerir soluciones desde diferentes, o aparentemente, campos inconvexos y trasladarlas a un problema de diseño que se caracteriza por la innovación (Salamatov, 1999).

Un fuerte aspecto de TRIZ es que una vez que se ha hecho una modificación a un sistema ingenieril de acuerdo con los patrones generales del desarrollo de los sistemas, la modificación puede ser considerada el mejoramiento más progresivo del sistema de ingeniería. El uso de estos patrones hace posible restringir significativamente el espacio de posibles soluciones y garantizar el encontrar la mejor solución en la línea de evolución de los sistemas ingenieriles.

Los conceptos principales de TRIZ son: Contradicciones, Idealidad y Evolución de los Sistemas Técnicos. El último concepto es una técnica de análisis del comportamiento que exhiben los productos en el tiempo, de forma similar a los seres vivos.

### **3.5.1. Contradicciones técnicas y físicas**

En términos generales, la teoría consiste en descubrir las principales contradicciones en un problema de innovación tecnológica o la necesidad de generar un invento, dichas contradicciones se dividen en Contradicciones Técnicas, que son las que involucran a dos elementos de un sistema tecnológico, y Contradicciones Físicas, que corresponden a una sola parte del sistema tecnológico.

Un problema inventivo es un problema que contiene al menos una contradicción. “Desde el punto de vista de la ingeniería, una invención manifiesta siempre la superación completa o parcial de una contradicción” (Altshuller, 1999). Esencialmente, la identificación, formalización y finalmente la supresión de una contradicción es el proceso más eficaz para crear (pero no el único).

Una contradicción surge cuando en un sistema, la tentativa por mejorar un cierto parámetro ocasiona la degradación inaceptable de otro parámetro también útil y viceversa (Cortés, 2003).

Existen dos tipos esenciales de contradicciones: la contradicción técnica y la contradicción física. Sin embargo, otros tipos de contradicciones han sido identificados.

Si no hay ninguna contradicción técnica entonces no se trata de un problema inventivo (no sería problema TRIZ). La contradicción técnica supone un conflicto entre características dentro un sistema: la mejora de un parámetro del sistema causa el deterioro o empeoramiento de otro parámetro. Por ejemplo, el aumento de la potencia de un motor (un efecto deseado) puede hacer que el peso del motor aumente (un efecto negativo).

Una contradicción física es un conflicto entre dos exigencias físicas referentes a un mismo parámetro de un elemento del sistema. Para la solución de problemas, la

formulación de la contradicción física tiene el siguiente formato: “El elemento del sistema debería tener la característica “A” a fin de realizar la función requerida (para solucionar el problema) y este elemento debería tener la característica “no A” a fin de satisfacer las limitaciones y exigencias existentes”.

Para resolver las contradicciones técnicas podemos utilizar dos metodologías. Un camino es resolver la contradicción con la aplicación de los 40 Principios Inventivos que identificó Altshuller y obtener algunas recomendaciones específicas para vencer la contradicción. También identificó 39 características de Sistemas Técnicos que pueden utilizarse para desarrollar y describir una contradicción técnica.

El segundo camino, es transformar la contradicción técnica en una contradicción física y solucionar esta tarea en el nivel físico. Para vencer una contradicción física, hay cuatro principios “físicos” y una base de datos de fenómenos y efecto físicos:

Separación de propiedades contradictorias en el tiempo.

Separación de propiedades contradictorias en el espacio.

Transformaciones del sistema.

Transformaciones de fase, o transformaciones físicas y químicas de sustancias.

### **3.5.2. Evolución de los Sistemas Tecnológicos**

Según Altshuller *“cualquier cosa que se emplea para llevar a cabo alguna tarea específica, es una “Sistema Tecnológico”*. Por otro lado, un sistema tecnológico está integrado por “subsistemas tecnológicos”. Existen también los “Súper Sistemas Tecnológicos” formado por varios sistemas tecnológicos. Dentro de los sistemas tecnológicos existe un nivel de subordinación.

La evolución es la tendencia en el desarrollo de los productos para alcanzar la idealidad, que es la tendencia de un sistema (producto) a desempeñar su función sin consumir materia y energía, mediante la mejora continua de su desempeño. Para el análisis

de la evolución de un producto es necesario representarlo como un Sistema Técnico (ST), compuesto por cuatro elementos: motor, transmisión, herramienta y control con el fin de verificar el cumplimiento de los ocho leyes propuestas por Altshuller. El motor es la parte del sistema que convierte la energía del exterior en otra, para asegurar la función principal; la transmisión conduce la energía desde el motor hacia la herramienta, o unidad de trabajo, asegura el contacto entre el sistema y el objeto donde se realiza la función principal; y el control, reacciona a los cambios del sistema adaptándose automáticamente a su forma, estructura o salida (Cavallucci&Weill 2001).

El estado de un producto (Sistema Técnico) en su proceso evolutivo puede determinarse con el nivel de cumplimientos de las Leyes de Evolución propuestas por Altshuller (Cavallucci 2002), de esta forma, evaluar las leyes en un punto específico del desarrollo de un ST permite identificar oportunidades de innovación futuras.

Esta nueva disciplina encuentra sus principales campos de aplicación en:

La resolución de problemas inventivos o de problemas técnicos complejos.

El desarrollo de la creatividad de ingenieros e inventores.

La predicción en la evolución de un producto o una tecnología.

La reducción de la duración de las fases de investigación y desarrollo de nuevos productos.

La identificación y tratamiento de las fallas de productos industriales, entre otras.

### **3.5.2.1. Clasificación de las Leyes de Evolución**

Leyes estáticas. Son aquellas que permiten evaluar la completitud estructural y funcional del sistema.

Ley 1. Completitud de las partes: establece que un sistema llevará a cabo adecuadamente su función principal cuando presenta sus cuatro partes (motor, transmisión, herramientas y control).

Ley 2. Flujo de energía: establece que debe existir un flujo libre y eficiente de la energía a través de los cuatro elementos del sistema. Las pérdidas pueden estimarse con la diferencia entre la energía de entrada y la de salida, entregada a la herramienta.

Ley 3. Coordinación del ritmo de las partes: establece que un sistema debe tener sincronización en su frecuencia, vibración y periodicidad de todas sus partes. Una diferencia en la coordinación entre los elementos puede causar pérdidas, y otros efectos nocivos, en todo el sistema.

Leyes cinemáticas. Son aquellas que permiten observar el sistema en una visión espacio-temporal desde el pasado para analizar su evolución tecnológica.

Ley 4. Idealidad: establece que todo ST tiene hacia la perfección. El sistema ideal es aquel que lleva a cabo su función principal sin consumo de materia ni energía y con el mínimo costo.

Ley 5. Desarrollo desigual de las partes: establece que cuanto más desigual sea el desarrollo de las partes, el sistema tiende a ser más complejo y menos evolucionado. Estas desigualdades llevan a contradicciones técnicas y físicas, que pueden ser la base de la evolución futura.

Ley 6. Transición al supersistema: establece que cuando un sistema ha alcanzado un alto nivel de desarrollo puede unirse a un supersistema y llegar a ser parte de él.

Leyes dinámicas. Son aquellas que establecen una proyección del sistema en el futuro. Están constituidas por dos leyes excluyentes, es decir, un sistema sólo puede seguir una u otra ley.

Ley 7. Transición de macro nivel a micro nivel: establece la existencia de una tendencia del sistema hacia la miniaturización de sus partes, tales como micro-instrumentos, micro-electrónica y otras.

Ley 8. Aumento de la dinamicidad y controlabilidad: establece que los sistemas rígidos deben orientarse hacia la segmentación, mientras aumenta su control, a través de las transiciones de campos (mecánicos, eléctricos, magnéticos y de electromagnéticos).

Kaplan (1996) establece que los sistemas evolucionan desde su concepción al nacimiento, infancia, madurez y declive, y para que éstos puedan sobrevivir o mantener en vigencia, tiene que ocurrir un salto hacia un nuevo sistema. Estas etapas de evolución de los sistemas se asemejan a los cambios o etapas de desarrollo de los seres vivos. La infancia es la etapa en la que nacen los sistemas tecnológicos, siendo muy ineficientes y bastante alejados de la solución ideal. Posterior a esta etapa está el crecimiento acelerado del sistema tecnológico, ya que a medida que pasa el tiempo, este se va optimizando, producto natural de la mejora continua en la ciencia y la tecnología, haciendo que el sistema vaya acercándose a la idealidad. La madurez es la etapa en la cual el sistema tecnológico llega a cierta estabilidad, el mejorarlo se hace cada vez más difícil, y de lograrse mejoras, éstas se realizan en los subsistemas. La etapa de la vejez es cuando el sistema ha llegado al final de su vida útil u obsolescencia al no poder alcanzar una mejora significativa. En esta etapa está la oportunidad de innovación, el salto hacia un nuevo sistema con un cambio drástico (Córdova Ames, 2008).

### **3.6. Niveles de innovación**

Conforme avanza la ciencia y la tecnología, el grado de dificultad para generar inventos e innovaciones tecnológicas tiende a ser mayor y ello se debe a que no todos los inventos son iguales. El análisis de un gran número de patentes revela que cada invención no es igual en su valor inventivo. Según el Profesor Altshuller, “padre” de la TRIZ; existen cinco niveles en el grado de dificultad para inventar o innovar, a continuación, se describe cada uno de esos niveles.

**Nivel 1.** Una mejora sencilla de un sistema técnico. Requiere el conocimiento disponible dentro de un área de fabricación/aplicación relevante del sistema.

También llamado “standard”. Se refiere a una solución simple de un problema técnico que no requiere de una gran sofisticación y que puede ser resuelto por cualquier persona cercana al problema. La solución existe dentro de un área perfectamente definida de una profesión. Por ejemplo: Se enfrenta el problema de pérdida de calor en una tubería que conduce vapor, de una caldera a otro punto lejano. La solución propuesta es aislar dicha tubería mediante algún medio conocido como puede ser, fibra de vidrio, lana de roca o asbesto. De todos los problemas de innovación tecnológica, este nivel representa el 32% de los casos.

**Nivel 2.** Una invención que incluye la resolución de una contradicción técnica. Requiere el conocimiento de áreas diferentes dentro del espacio de conocimiento relevante del sistema.

Se le define también como “mejora” y por lo tanto requiere de un pensamiento más avanzado que el nivel anterior. El problema y su solución se ubican dentro del entorno de una industria y se resuelve mediante conceptos y principios actuales, perfectamente definidos. Por ejemplo: En el proceso de soldado mediante arco eléctrico, existen áreas que son muy difíciles de observar debido a lo pequeño del visor que tiene la máscara protectora. La solución propuesta es instalar pequeños espejos, en la misma máscara, para así tener un mayor ángulo de visión y resolver el problema. El presente nivel ocupa el 45% de todos los casos de innovación tecnológica.

**Nivel 3.** Una invención que contiene una resolución de una contradicción física. Requiere el conocimiento de otras áreas de conocimiento.

En este caso se habla de una verdadera “invención” que resuelve un problema más complejo que en los niveles anteriores. El problema y su solución se circunscriben al área de una ciencia determinada, como la química, la física, la biología, etc. El ejemplo de todo conocido, dentro de ese nivel, es el desarrollo de la transmisión automática en los automóviles, en lugar de la transmisión estándar. El 19% de los casos de innovación tecnológica están representados en este nivel.

**Nivel 4.** Una invención que contiene resolución de contradicciones con una mejor aproximación al Resultado Final Ideal. Esta nueva tecnología desarrollada que contiene una solución de “ruptura” que requiere el conocimiento de diferentes campos de la ciencia.

En éste caso se habla ya de un “cambio de paradigma” mediante el cual se crea todo un nuevo sistema o proceso tecnológico. El problema se ubica dentro de un entorno de la ciencia y su solución fuera de ese entorno. Por ejemplo, el desarrollo de materiales con “memoria térmica” los cuales se deforman cuando se calientan, pero vuelven a su estado inicial cuando se enfrían. Otro ejemplo es el desarrollo de materiales superconductores de la electricidad a temperaturas cercanas a las ambientales. A este nivel le corresponde el 4% de los problemas de innovación tecnológica estudiados por el Profesor Altshuller.

**Nivel 5.** Descubrimiento de nuevos fenómenos y sustancias. Este nuevo conocimiento asegura el desarrollo de nuevas tecnologías con la utilización de los nuevos fenómenos, resolviendo contradicciones existentes con una mejor aproximación al Resultado Final Ideal.

También llamado de “descubrimiento”. Se refiere a una invención pionera que crea todo un nuevo sistema o proceso. Tanto el problema como su solución se encuentran fuera de los límites de la ciencia conocida en el momento. Para resolver el problema será necesario hacer nuevos descubrimientos científicos y en base a ellos resolver el problema. Los ejemplos más conocidos son: el rayo LASER, las computadoras, los aviones, etc. Según los estudios de Altshuller y otros expertos de TRIZ, este es el nivel más avanzado de innovación tecnológica y corresponde al 0.3% del total.

Con los problemas del primer nivel, el producto (dispositivo o método) no se modifica. En el segundo nivel, el producto se modifica, pero no considerablemente. En el tercer nivel, el producto se modifica esencialmente y en el cuarto, es totalmente modificado. En el quinto nivel, el sistema técnico en que se utiliza este producto se transforma por entero.

Un punto muy importante es la afirmación de la metodología TRIZ de que si no hay ninguna contradicción técnica entonces no estamos ante un problema inventivo (no es un

problema TRIZ). Por lo tanto, si existe la resolución de una contradicción técnica o física durante la resolución del problema implicará que se trata de una invención.

## **4. EVALUACIÓN DEL ESTADO DE EVOLUCIÓN DE LA ÓRTESIS PLANTAR MODULAR**

Dentro de TRIZ, la Evolución en los Sistemas Tecnológicos es una técnica de análisis del comportamiento que exhiben los productos en el tiempo, de forma similar a los seres vivos. Esta base teórica se empleó para evaluar el diseño modular de la órtesis plantar denominada Plantilla Universal, con respecto a otros diseños que se encuentran en el mercado o en base de datos de patentes a nivel mundial. Para esto se realizó una búsqueda, revisión y análisis de plantillas existentes en el mercado de diversas casas comerciales, así como de métodos de evaluación y diagnóstico de pacientes para las formas de elaboración de las mismas.

De acuerdo a la metodología TRIZ, un Sistema Tecnológico es cualquier objeto que lleva a cabo alguna función útil, desde una simple aguja para coser hasta una estación espacial. Siguiendo este concepto, la Plantilla Universal puede ser vista como un Sistema Tecnológico, ya que realiza una función útil muy bien definida. Esta función es la de rectificar y realinear la postura del pie cuando ésta es anormal. Ayuda al pie a soportar el peso corporal y evita la concentración de cargas puntuales, distribuyendo la presión vertical y de cizallamiento que recibe sobre toda la planta, de la manera más conveniente para cada tipo de pie. Aligera las molestias o el dolor en las extremidades inferiores durante la bipedestación y la marcha al oponerse a la fuerza de reacción del suelo que es causada por estas dos actividades, es decir, absorbe la fuerza de impacto. Mejora la movilidad corporal evitando movimientos compensadores anormales y protegen las articulaciones del pie y del miembro inferior. En términos generales, el sistema tiene la capacidad de cumplir con las funciones de realineación (restablecimiento de los ejes) y descarga (equilibrio de presiones).

En este sistema de órtesis plantar podemos identificar a diversos Subsistemas Tecnológicos, los cuales son los módulos (soportes) o las partes que conforman la Plantilla Universal, que son nueve. Cada uno de ellos desarrolla una función específica, y es por esto, que cada módulo puede ser un Sistema Tecnológico. El primer subsistema es la base plantar, la cual permite almohadillar el apoyo del pie en las zonas del tarso y el metatarso.

El segundo subsistema corresponde al arco longitudinal, éste sostiene a la bóveda longitudinal, mejora la estabilidad del esqueleto y el apoyo plantar, equilibrando la presión entre el antepié y el retropié. El tercero subsistema es el arco transversal o botón retrocapital, su función es liberar la concentración de cargas puntuales en la zona posterior de las cabezas centrales del metatarso. El cuarto subsistema es la barra metatarsal, la cual sostiene las cabezas metatarsianas. El subsistema número cinco es la talonera cuya función es nivelar asimetrías del miembro inferior. El número seis es la herradura, la cual amortigua el impacto sobre el calcáneo. La cuña de retropié es el subsistema número siete, ésta reestablece los ejes normales del pie cuando existen deformidades en valgo o en varo manteniéndolo en posición neutra. El octavo subsistema es la cuña lateral, quien se encarga de evitar tanto interna del antepié. Y, por último, el noveno subsistema, el botón, permiten el apilamiento de bases plantares para la asimetría del miembro inferior mayor a 0.05 milímetros.

Todo Sistema Tecnológico presente un nivel de subordinación con ciertas partes del sistema, y la Plantilla Universal no es la excepción. Se identificó que el sistema se encuentra subordinado al subsistema o módulo uno, que es la base plantar. Sin éste módulo el sistema no puede funcionar adecuadamente debido a que es la parte que recibe a los módulos restantes, es decir, los ensambles y ajustes se realizan sobre la base plantar.

En otro concepto, los Sistemas Tecnológicos se unen con otros para formar los Súper Sistemas Tecnológicos. En este sentido, podemos establecer al sistema músculoesquelético como el Súper Sistema Tecnológico que contiene al sistema en cuestión. El sistema músculoesquelético está integrado por varios sistemas tecnológicos, que son las diferentes partes del cuerpo, que realizan funciones específicas, pero que en conjunto tienen relación directa con la movilidad corporal que se asocia con la extremidad inferior y el pie, siendo éste último el que está en contacto directo con el Sistema Tecnológico. En otra perspectiva, cada maquinaria o equipo (fresadora, máquina de inyección de plástico, etc.) que interviene en el proceso de fabricación de la órtesis, es un sistema tecnológico perteneciente a un Súper Sistema Tecnológico, el cual es el taller de maquinado que fabrica la Plantilla Universal.

De la visualización de la órtesis plantar como un Sistema Tecnológico, se estableció la idealidad de éste sistema, el cual parte de su función útil descrita con anterioridad, la cual establece que el sistema debe de tener la capacidad de reestablecer los ejes del pie y equilibrar las presiones plantares.

La determinación del estado de evolución de un producto (sistema), con base en el cumplimiento de las Leyes de Evolución, se realiza a través de una escala relativa y no absoluta. Cavallucci & Weill (2002) sugieren una escala cualitativa de valoración de cero a tres de acuerdo al grado de cumplimiento de la ley; de esta forma, se designa cero (0), si la ley no se cumple; uno (1), si se cumple en algunas situaciones; dos (2), si se verifica en muchas situaciones; y tres (3), si la ley se cumple completamente. En un diagrama de radar se visualiza el estado evolutivo del sistema tecnológico, de acuerdo a las asignaciones de cumplimiento para cada ley.

#### **4.1. Análisis y verificación del cumplimiento de las leyes de evolución para el Sistema Tecnológico.**

Teniendo en cuenta la idealidad del sistema tecnológico, se analiza y evalúa de qué manera el sistema de órtesis plantar cumple con cada una de las leyes.

##### **4.1.1. Leyes estáticas del Sistema**

- Primera Ley, Completitud del Sistema: En la órtesis se puede determinar la presencia de las cuatro partes o subsistemas a las que se refiere ésta ley. El *motor* es el sistema o aparato de locomoción, formado por el esqueleto (el armazón del cuerpo), las articulaciones que unen a los huesos entre sí, y los *músculos*, siendo éstos últimos los responsables de la locomoción, pues permiten que los huesos ejecuten los movimientos, haciendo desplazar la sangre y el movimiento de las extremidades mediante la energía cinética, mecánica y química, por lo tanto, un tipo de energía, produce movimiento para que el resto del sistema se pueda desempeñar

adecuadamente. Los *tendones, ligamentos, huesos y articulaciones* son considerados como el *órgano de transmisión* del sistema, debido a que los tendones unen al músculo con los huesos, y a su vez los ligamentos y articulaciones unen a los huesos entre sí, permitiendo la movilidad y estabilidad del sistema. Por otro lado, la fuerza o presión vertical que llega a la articulación del tobillo se transmite al *arco longitudinal* de la órtesis, haciendo que éste último reparta equitativamente el peso corporal al resto del pie. El *órgano de trabajo o herramienta* es la *órtesis plantar* en cuestión, sobre ésta recae el llevar a cabo directamente las funciones para las cuales el sistema ha sido diseñado. Y por último podemos identificar al *órgano de control* como el *sistema nervioso*, ya que éste coordina la función integrada de todo el organismo y por lo tanto del sistema, y refiriéndonos a la órtesis, la *base plantar* es la que controla el funcionamiento integral de la misma, ésta es la “base” del diseño modular. Debido a la presencia de las cuatro partes a las que se refiere esta ley en el sistema de órtesis plantar, se le asigna un valor de (3) respecto a su nivel de cumplimiento con la primera ley.

- Segunda Ley, Flujo de energía: La energía del sistema que permite realizar un trabajo, en este caso, la marcha o movimiento, es más eficiente, debido a que la fuerza que llega al pie en forma de presión, se reparte de una manera más equitativa a través de los arcos longitudinales que coincide con el vértice mayor de la bóveda plantar. El material con el que está hecha la órtesis, y por ende los arcos, hacen posible que éste reparto de cargas sea lo más eficiente posible. De ésta manera la conducción de la energía del motor al órgano de trabajo se mejora mediante el mecanismo de los arcos ajustables a precisión utilizando un material plástico de alta densidad molecular. El grado de cumplimiento de esta segunda ley en el sistema se evalúa con un valor de (3), pues la utilización de los arcos longitudinales dependerá de la sensación de comodidad que sienta el usuario que está en interacción con la órtesis, y para asegurar esto en la mayoría de los casos, los arcos longitudinales cuentan con diferentes niveles de altura para adaptarse a la cavidad plantar del usuario, y por otro lado, el proceso de fabricación del sistema permite flexibilidad

en la utilización de diversos materiales para abrir el abanico de posibilidades al usuario.

- Tercera Ley, Coordinación del ritmo de las partes: Con el diseño modular se hace posible una armonización entre el órgano de trabajo y los tres subsistemas restantes (motor, transmisión y control). Al colocar al pie en la postura correcta mediante el acomodo de los módulos de la órtesis, se logra una mejor locomoción con una periodicidad constante en la marcha, y por lo tanto el motor y la transmisión del sistema se encuentran en sincronía con el órgano de trabajo. El órgano de control percibe el adecuado funcionamiento de las partes y evita mandar señales de movimientos compensatorios por fallas mecánicas en el apoyo y la marcha, y así todo el sistema se coordina de manera armoniosa. En los casos en el que el sistema interactúa con un usuario que manifiesta asimetrías, es decir, que presenta una pierna de longitud más corta con respecto a su otra extremidad, con diferencia de más de un centímetro, el sistema modular de órtesis plantar, ve rebasado su alcance para la armonización de la locomoción, sólo le es posible, mediante un ensamble de tres bases plantares, lograr 9 mm de compensación de la asimetría. Por tal motivo, su grado de cumplimiento de esta ley se valora con (2).

#### **4.1.2. Leyes cinemáticas del Sistema**

- Cuarta Ley, Aumento en la idealidad: Partiendo de que el Sistema ideal sería aquel cuyo diseño sea personalizado para mejorar el funcionamiento de la órtesis respecto a la realineación y descarga al mismo tiempo, podemos ver en la plantilla que se evalúa la convergencia de todos estos aspectos o requisitos. Por lo tanto, se le asigna un valor de (3), pues el diseño modular permite aumentar el crecimiento de la órtesis hacia alcanzar la idealidad.
- Quinta Ley, Desarrollo desigual de las partes: Los métodos de diagnóstico y exploración del paciente para el establecimiento de las indicaciones técnicas de las plantillas, en mucho de los casos, sigue métodos convencionales que no han sufrido

cambios al pasar de los años. Por otro lado, existe tecnología como la baropodometría que permite realizar evaluaciones más completas y precisas, pero el costo de adquisición de la misma es muy elevado, esto hace que se recaiga en las prácticas de exploración sin alta tecnología. El Sistema en cuestión tiene una parte de involución en este aspecto. Refiriéndonos a los métodos de fabricación de la órtesis, éstos tampoco han cambiado notablemente. En algunos casos, cuando la empresa tiene tecnología para hacerlo, se introduce los sistemas de control numérico computarizado para su elaboración, o impresoras 3D, pero, aun así, en una parte del proceso se recurre a la intervención del técnico ortesista para darle a la plantilla los acabos finales de manera artesanal. En este aspecto, el sistema modular no requiere esto último, ya que evita la fabricación de la órtesis de manera artesanal para cada caso o afectación. Como se explicó, el sistema presenta una involución, pero en su supersistema, los subsistemas que integran el sistema modular, tiene características físicas similares con otros sistemas de órtesis, pero se diferencian en la forma en que se integran para formar todo el sistema tecnológico que se está evaluando, es por ello que se le asigna un nivel de cumplimiento de (2) con respecto a esta ley.

- Sexta Ley, Transición al Supersistema: El sistema modular de órtesis plantar al que se refiere este trabajo no ha llegado a su máximo nivel de desarrollo, pues aún se encuentran áreas de oportunidad para mejorar su utilidad. Todavía se explora la posibilidad de que éste sistema pase a ser un subsistema de un sistema de mayor jerarquía, debido a esto, el cumplimiento que tiene el sistema de órtesis plantar no cumple con esta ley, y se le asigna un valor (0).

#### **4.1.3. Leyes dinámicas del Sistema**

- Séptima Ley, Transición de macro nivel a micro nivel: Esta ley no es aplicable al sistema modular de órtesis plantar, ya que esta se refiere a disminuir de manera micro los componentes del sistema, tal como ocurre en la nanotecnología. Debido a esto la asignación del grado de cumplimiento es (0).

- Octava Ley, Aumento de la dinamicidad y controlabilidad: El sistema modular tiene la capacidad de que sólo unos cuantos subsistemas puedan desempeñar la función de equilibrar presiones plantares y restablecimiento de ejes. Desde esta perspectiva, la órtesis plantar modular tiene la flexibilidad de disminuir la cantidad de subsistemas que la componen para cada usuario. Los subsistemas pueden disponerse, inclusive, de una manera diferente para cada extremidad del usuario, por lo que la adaptabilidad del sistema a los requerimientos específicos del supersistema al que pertenece, se dinamiza y controla de manera más eficiente con este diseño modular. Se le asigna un nivel de cumplimiento con un valor de (3).

#### 4.1.4. Diagrama de resultados

A continuación, se presenta los resultados obtenidos del análisis y evaluación del grado de cumplimiento que tiene el sistema de órtesis plantar modular con cada una de las leyes de evolución de los sistemas tecnológico un diagrama de radar:

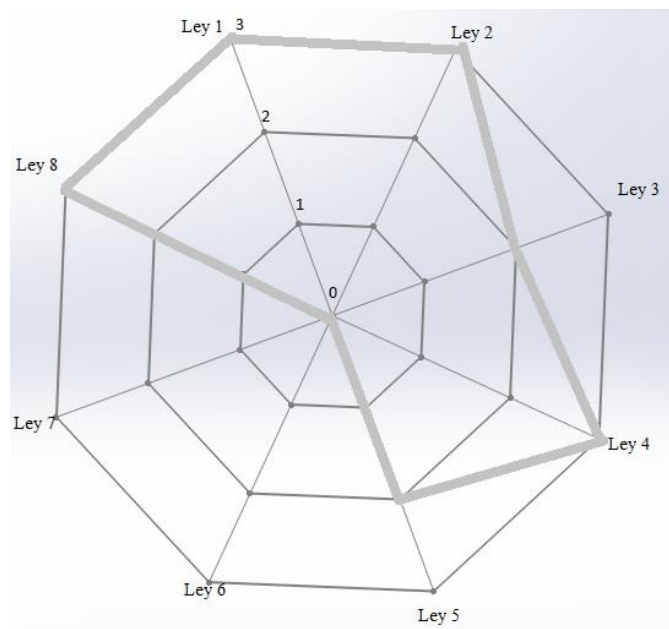


Figura 4. Diagrama de radar. Cumplimiento de las Leyes de Evolución de los Sistemas Tecnológicos del Sistema modular de órtesis plantar.

Fuente: Propia.

Observando y analizando el diagrama presentado, podemos establecer que este sistema se encuentra en la etapa de madurez de su evolución, ya que cumple de manera total o parcial, con seis de las ocho leyes de evolución de los sistemas tecnológicos. Las mejoras que de ahora en adelante el sistema realice deben de considerar cambios significativos y radicales del presente sistema, dando un salto tecnológico importante, sin embargo, aún hay oportunidades de mejora dentro del sistema actual, tal como la evaluación en el cumplimiento de la ley tres y cinco lo expone.

## **5. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE INVENTIVA DEL SISTEMA MODULAR DE ÓRTESIS PLANTAR**

### **5.1. Análisis de contradicciones**

Un problema que requiere de una solución de inventiva presenta al menos una contradicción. Cortés (2003) establece que una contradicción, desde la perspectiva de TRIZ, surge cuando en un sistema, la tentativa por mejorar un cierto parámetro ocasiona la degradación inaceptable de otro parámetro útil y viceversa. Las soluciones en las que se mejora una característica del sistema sin comprometer la óptima funcionalidad de otra característica presentan un cierto grado de innovación. El sistema modular de órtesis plantar se somete a un análisis de contradicciones de la metodología TRIZ. Dicho análisis parte de identificar las contradicciones técnicas, que involucran a dos elementos del sistema tecnológico, y las contradicciones físicas, que corresponden a una sola parte del sistema tecnológico. De esta manera se determina que soluciones tiene el sistema modular para las contradicciones planteadas, o en su caso, detectar áreas de oportunidad para mejoras en el sistema.

#### **5.1.1 Contradicción técnica principal en los sistemas de órtesis plantares**

El hecho de que un sistema presente alguna contradicción técnica significa un problema de inventiva que requiere de una solución innovadora. Los sistemas de órtesis plantares deben de resolver mediante su diseño una contradicción técnica principal, y ésta es que los sistemas deben de obedecer a diseños hechos a la medida del usuario para garantizar un funcionamiento personalizado como lo marcan los especialistas de la salud del pie, sin embargo, esto encarece el costo de dichos sistemas, además de que el proceso de fabricación requiere de un lapso de tiempo antes de ser entregados al cliente. De manera inversa, los sistemas prefabricados tienen un costo de fabricación más bajo y el tiempo de entrega del producto al cliente es de manera inmediata, pero su funcionamiento, en muchos de los casos, no es el óptimo ya que no se asegura que los soportes de la plantilla se ajusten de manera precisa a la forma del pie del usuario.

De la identificación de esta contradicción que presentan los sistemas de órtesis plantares, podemos establecer el sistema ideal. Este sería, un sistema de órtesis plantar cuyo diseño sea personalizado para que su adaptabilidad con el usuario sea precisa y por lo tanto se asegure un diseño ergonómico, que sea de bajo costo debido a su rápido proceso de fabricación, y con un rápido tiempo de entrega al cliente. Además, a esta idealidad, se le suma la función útil para la cual el sistema debe ser diseñado, obtenida del análisis de evolución de los sistemas tecnológicos visto en el capítulo 4, la cual es realineación de ejes y equilibrio de presiones plantares.

Tabla 1. Contradicciones técnicas principales en los sistemas de órtesis plantares.

Problema			Contradicción Técnica	
			Aspecto de mejora	Aspecto que empeora
1	Contradicción técnica directa.	Plantillas a la medida	Adaptación precisa al usuario (ergonómico) para realinear ejes y equilibrar presiones.	Costo elevado, aumenta el tiempo para el proceso de fabricación y el tiempo de entrega.
2	Contradicción técnica inversa.	Plantillas prefabricadas	Costo bajo, proceso de fabricación más rápido (serie) y entrega inmediata.	Adaptación imprecisa al usuario (no ergonómico). La realineación de ejes y el equilibrio de presiones se ven comprometida.

Fuente: Propia

Para que los sistemas se dirijan hacia esa idealidad, hay que vencer el conflicto en el cual se ven inmersos los sistemas de órtesis plantares. Una forma de lograrlo es mediante la utilización de una de las más importantes herramientas de TRIZ, la cual es, la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas. Ésta relaciona 40 principios de resolución de contradicciones y 39 parámetros genéricos. Los parámetros son características de cualquier sistema que entran en conflicto, y los principios guían hacia el descubrimiento de una solución para el problema presentado en el sistema. Ambos, tanto los principios y los parámetros, fueron propuestos por Altshuller, y son producto del análisis de miles de patentes y de varias industrias en las cuales alguna contradicción ha sido resuelta.

El diseño modular se propone como solución inventiva para resolver la contradicción técnica principal de las órtesis plantares. Este sistema modular permite que exista la característica de ser una plantilla personalizada, pero sin comprometer su costo de fabricación y el tiempo de entrega al cliente. Esto se respalda con la identificación de principios inventivos que se aplican para llegar al diseño modular de órtesis plantar evaluada.

Como primer paso, se identifican de los 39 parámetros, los cuales aplican o engloban el concepto de las características del sistema que entran en conflicto.

Tabla 2. Identificación de los 39 parámetros de TRIZ en la contradicción técnica principal del sistema.

#	Parámetro	Definición según TRIZ	¿Aplica en parámetro de mejora?	¿Aplica en parámetro de deterioro?
1	Peso del objeto móvil	Masa del objeto en movimiento, sujeto a un campo gravitacional o fuerza que el mismo objeto ejerce sobre los puntos que lo soportan o suspenden.	No	No
2	Peso del objeto estacionario	Masa del objeto estático en un campo gravitacional o fuerza que el mismo objeto ejerce sobre sus puntos que lo soportan o suspenden.	No	No
3	Longitud del objeto móvil	Cualquiera de las dimensiones lineales de un objeto en movimiento, no necesariamente su longitud.	No	No
4	Longitud del objeto estacionario	Lo mismo que el numeral 3 pero de un objeto estático.	No	No

5	Área del objeto en movimiento	Área o parte de la superficie que ocupa un objeto en movimiento, ya sea interna o externa.	No	No
6	Área del objeto estacionario	Lo mismo que el numeral 5 pero de un objeto estático.	No	No
7	Volumen del objeto en movimiento	Espacio volumétrico que ocupa un objeto cuando se desplaza de un punto a otro.	No	No
8	Volumen del objeto estacionario	Lo mismo que el numeral anterior, pero de un objeto estático.	No	No
9	Velocidad	Velocidad de un objeto. También: Velocidad a que se lleva a cabo un proceso o cualquier tipo de acción que involucra a un sistema tecnológico.	No	Sí. Este parámetro equivale al tiempo de entrega del producto debido a su proceso de fabricación.
10	Fuerza	En TRIZ, se refiere a la fuerza que requiere un objeto para cambiar su posición de un punto a otro.	Sí. Este parámetro se aplica en el restablecimiento de ejes del pie, pues se requiere que el sistema lleve la posición del pie de un punto a otro.	No
11	Esfuerzo o presión	Es la fuerza por unidad de área o la tensión, aplicada a un objeto o la que el objeto ejerce sobre su entorno.	Sí. Este parámetro equivale a la presión que recibe ciertas áreas del pie debido al peso corporal.	No
12	Forma	Contorno externo de un objeto o apariencia de un sistema tecnológico.	Sí. El sistema debe de tener una forma que vaya de acuerdo a la anatomía del pie del usuario para adaptarse a éste.	No
13	Estabilidad de la	Integridad del objeto	Sí. Este parámetro	No

	composición del objeto	o sistema. Relación entre los distintos constituyentes de un objeto. Un incremento en la entropía (desorden) del objeto o del sistema, representa una pérdida de estabilidad.	equivale a la adaptación del sistema al usuario, debido al trabajo armónico entre las distintas partes que constituyen el sistema.	
14	Resistencia	Capacidad de un objeto a resistir un cambio en respuesta a una fuerza aplicada. También, resistencia a la ruptura.	Sí. Este parámetro se aplica en el equilibrio de presiones, ya que el sistema debe resistir la presión que le llega y repartirla equitativamente en la planta del pie.	No
15	Duración de una acción del objeto móvil	Tiempo en el cual un objeto puede llevar a cabo una acción o vida útil de un objeto.	No	No
16	Duración de una acción de un objeto estacionario	Lo mismo que en el numeral 15, pero de un objeto estático.	No	No
17	Temperatura	Condición térmica de un objeto o sistema tecnológico, lo cual puede incluir su capacidad calorífica.	No	No
18	Brillantez	Cualidad lumínica de un objeto o sistema dado en fluxes por unidad de área.	No	No
19	Uso energético del objeto en movimiento	Energía requerida, por el objeto, en movimiento, para llevar a cabo una acción determinada. También, capacidad para llevar a cabo un	No	No

		trabajo determinado.		
20	Uso energético del objeto estacionario	Lo mismo que el numeral 19 pero para un objeto estático.	No	No
21	Potencia	Gradiente del uso de energía. También, tiempo en el que se lleva a cabo un trabajo.	No	No
22	Pérdida de energía	Energía disipada que no contribuye directamente al trabajo requerido.	No	No
23	Pérdida de materia	Pérdida parcial o total, de manera temporal o permanente, de materia del sistema o de los subsistemas del mismo.	No	No
24	Pérdida de información	Lo mismo que el numeral anterior pero referida a la información del sistema lo cual incluye textura, olor, color, etc.	No	No
25	Pérdida de tiempo	Lapso de tiempo que se pierde al llevar a cabo una acción por el objeto o el sistema tecnológico. Reducir la pérdida de tiempo es una característica deseable de un sistema.	No	No
26	Cantidad de sustancia o de materia	Cantidad de sustancia que contiene un objeto, un sistema o los subsistemas que lo integran y que puede cambiar totalmente de manera temporal o definitiva.	No	No
27	Confiabilidad	Seguridad de la	Sí. Este parámetro	No

		habilidad que tiene un sistema para llevar a cabo la función para la cual fue diseñado, en una forma óptima.	se ve presente en la cuestión del diseño ergonómico, ya que debe brindar seguridad al usuario de que el sistema es útil.	
28	Precisión en la medida	Certidumbre con la que es posible medir el valor o característica, de un parámetro, en un sistema tecnológico.	No	No
29	Precisión en la manufactura	Grado de exactitud mediante el cual se puede fabricar un objeto en relación a las especificaciones requeridas de sus componentes.	No	No
30	Daño externo que afecta a un objeto	Susceptibilidad de un sistema a daños infringidos desde el exterior.	No	No
31	Daños generados por el propio objeto	Daños producidos durante la operación de un objeto, un sistema o los subsistemas que lo integran.	No	No
32	Manufacturabilidad o facilidad para la fabricación	Facilidad con la que se puede producir un objeto o un sistema tecnológico.	No	Sí. Este parámetro se ve comprometido al tener un proceso de fabricación más lento.
33	Facilidad de operación	Simplicidad en la operación de un objeto o un sistema. Entre menos componentes o etapas tiene un objeto o un proceso, es de más fácil operación.	No	No
34	Facilidad de	Cualidad que tiene	No	No

	reparación	un objeto, o un sistema de ser reparado de una forma rápida y sencilla.		
35	Adaptabilidad	Flexibilidad con que un objeto o un sistema puede responder a cambios externos. También, capacidad que tiene un objeto o un sistema para ser empleado en varias tareas y en diferentes circunstancias.	Sí. Este parámetro equivale a la característica de adaptabilidad precisa al usuario.	No
36	Complejidad del objeto	Diversidad de elementos que se relacionan entre sí, durante la operación de un objeto. La dificultad para operar un objeto es su grado de complejidad.	No	No
37	Complejidad de control	Grado de dificultad con que se puede controlar la operación de un objeto o un sistema, debido a la complejidad e interrelación de sus componentes.	No	No
38	Nivel de automatización	Capacidad para que un objeto o un sistema tecnológico lleve a cabo la función para la cual fue diseñado sin la intervención humana. El nivel más bajo de automatización será el de un objeto operado	No	No

		manualmente, siendo el nivel máximo de operación aquel en el cual el objeto o sistema funciona independientemente del ser humano, monitoreando su propia operación.		
39	Capacidad/ Productividad	Número de funciones o de operaciones que un objeto o un sistema lleva a cabo por unidad de tiempo. También, la producción por unidad de tiempo o el costo por unidad de tiempo.	No	Sí. Este parámetro equivale a una producción por unidad de tiempo menor y por lo tanto un costo elevado por unidad de tiempo.

Fuente: Adaptado de Maldonado M., Oropeza R., Rico E. (2005). *Innovación Sistémica Mediante TRIZ* (p.36-39).

Realizado lo anterior, se puede establecer nuevamente la contradicción técnica principal de los sistemas de órtesis plantares, pero en lenguaje de TRIZ y en función a los parámetros genéricos, quedando expresada en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de TRIZ aplicados a la contradicción técnica de los sistemas de órtesis plantares personalizadas.

Problema			Contradicción Técnica	
			Aspecto de mejora	Aspecto que empeora
<b>1</b>	Contradicción técnica directa.	Plantillas a la medida	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Fuerza</i> del sistema para restablecimientos de ejes sagitales.</li> <li><i>Presión</i> plantar repartida de forma equitativa por el sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Velocidad</i> del sistema para ser manufacturado, así como para ser entregado al usuario.</li> <li><i>Manufacturabilidad</i> ineficiente.</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Forma</i> anatómica del sistema para adaptarse al pie del usuario.</li> <li>• <i>Estabilidad de composición</i> del sistema mediante la integración armónica de sus partes con el usuario.</li> <li>• <i>Resistencia</i> del sistema contra fuerzas que impidan mantener al pie del usuario en posición neutra y con equilibrio de presiones.</li> <li>• <i>Confiabilidad</i> del sistema para realizar su función útil de manera segura para el usuario.</li> <li>• <i>Adaptabilidad</i> del sistema con el entorno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Capacidad productiva</i> disminuida por la poca producción de partes por unidad de tiempo encareciendo el costo de fabricación.</li> </ul>
--	--	--	--	--

Fuente: Propia

Los parámetros anteriores, identificados como las características que entran en conflicto en los sistemas de órtesis plantares personalizados, se relacionan entre sí en la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas, mostrada en la tabla 4.

Tabla 4. Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas con los parámetros que entran en conflicto en los sistemas de órtesis plantares personalizados.

Característica que se degrada (Y) Característica a mejorar (X)		9	32	39
		Velocidad	Manufacturabilidad o facilidad para la fabricación	Capacidad/Productividad
10	Fuerza	13 28	15 37	3 28
		15 12	18 1	35 37

11	Presión	6 35 36	1 35 16	10 14 35 37
12	Forma	35 15 34 18	1 32 17 28	17 26 34 10
13	Estabilidad de composición	33 15 28 18	35 19	25 35 40 3
14	Resistencia	8 13 26 14	11 3 10 32	29 35 10 14
27	Confiabilidad	21 35 11 28		1 35 29 38
35	Adaptabilidad	35 10 14	1 13 31	35 28 6 37

Fuente: Adaptado de Cortés G. *TRIZ: La Teoría de Resolución de Problemas Inventivos*.

*Una perspectiva de la innovación basada en el conocimiento.*

Los principios inventivos que la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas propone para guiar hacia la solución del conflicto existente entre los parámetros útiles que se degradan debido a la mejora de otros, se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Principios Inventivos propuestos por la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas para los sistemas de órtesis plantares.

Principio	Descripción
1. Segmentación	a) Dividir un objeto en partes independientes. b) Crear un objeto seccionado. c) Incrementar el grado de segmentación de un objeto.
3. Calidad local	a) Cambiar la estructura de un objeto, ambiente externo o influencia externa de un estado homogéneo a un estado heterogéneo. b) Hacer que diferentes partes del objeto llevan a cabo diferentes funciones. c) Colocar cada parte del objeto en las condiciones más favorables para su funcionamiento.

6. Universalidad	a) Consiste en aumentar el número de funciones de un componente, objeto o sub-sistema, con la finalidad de eliminar la necesidad de otras partes.
8. Contrapeso	a) Compensar el peso de un objeto uniéndolo con otro que tenga fuerza de empuje. b) Compensar el peso de un objeto haciéndolo interactuar con el ambiente que lo rodea.
10. Acción previa	a) Llevar a cabo una acción requerida por completo, o al menos una parte. b) Posicionar idealmente un objeto de manera que, entren en acción en el momento adecuado y sin pérdida de tiempo.
11. Amortiguamiento anticipado	a) Compensar la falta de fiabilidad de un objeto, mediante estrategias dispuestas con antelación.
12. Equipotencialidad	a) Cambiar las condiciones de trabajo para que un objeto no necesite ser levantado o bajado.
13. Inversión	a) En lugar de una acción dictada por las especificaciones del problema, implementar una acción opuesta. b) Hacer una parte movable del objeto o el ambiente exterior inamovable y la parte inmóvil hágala movable. c) Voltee el objeto, la parte de arriba hacia abajo.
14. Esferoidalidad	a) Reemplazar las partes, superficies o formas rectilíneas por curvilíneas, superficies planas por esféricas, paralelepípedos por estructuras curvilíneas. b) Usar rodillo, bolas, espirales, domos. c) Reemplazar una traslación por una rotación.
15. Grado de dinamismo/ movilidad	a) Las características de un objeto o del ambiente que le rodean deben modificarse con la finalidad de proveer una eficiencia óptima a cada etapa del proceso. b) Dividir un objeto en múltiples partes móviles las unas con relación a las otras.

	<p>c) Si un objeto o proceso es fijo, volverlo adaptable o movable.</p> <p>d) Incrementar el grado de dinamismo.</p>
16. Acción parcial o excesiva	a) Si es difícil obtener un efecto al 100% por un cierto método, ejecutar algo "de más" o "de menos" para simplificar el problema.
17. Transición a una nueva dimensión	<p>a) Desplazar un objeto en un espacio bidimensional o tridimensional.</p> <p>b) Use un ensamble de objetos en multicapa en lugar de una simple capa.</p> <p>c) Inclinar o reorientar un objeto para que se apoye sobre uno de sus lados.</p> <p>d) Utilizar otro lado de la misma área.</p> <p>e) Proyectar líneas ópticas en sectores circundantes o sobre el reverso de un objeto.</p>
18. Vibración mecánica	<p>a) Poner un objeto en oscilación.</p> <p>b) Si la oscilación existe, incremente su frecuencia, aun tanto como hasta la ultrasónica.</p> <p>c) Usar la frecuencia de resonancia.</p> <p>d) Utilizar la vibración piezo-eléctrica en lugar de la mecánica.</p> <p>e) Combinar la utilización de vibraciones ultrasónicas y campos magnéticos.</p>
19. Acción periódica	<p>a) Reemplazar una acción continua por una periódica o pulsativa.</p> <p>b) Si la acción es ya periódica, modificar su frecuencia o amplitud.</p> <p>c) Utilizar las pausas entre cada impulso para realizar otra función.</p>
21. Modificación de la velocidad	a) Conducir un proceso o ciertas etapas de este a gran velocidad, para evitar las acciones nocivas.
25. Autoservicio	<p>a) Hacer que el objeto tenga su propio servicio y ejecute operaciones de reparación suplementarias.</p> <p>b) Hacer uso de desperdicios de material y energía.</p>
26. Copiado	a) Usar copias baratas o simplificadas en lugar de un objeto complejo, caro, frágil o de uso inconveniente.

	<p>b) Reemplazar un objeto, un proceso, un sistema o conjunto de objetos, por una copia óptica, que puede ser reducida o amplificada.</p> <p>c) Si se usa ya una copia óptica, utilizar copias infrarrojas o ultravioletas.</p>
28. Reemplazar los sistemas mecánicos	<p>a) Reemplazar los sistemas mecánicos por un sistema sensorial.</p> <p>b) Utilizar campos magnéticos, eléctricos u electromagnéticos para interactuar con el objeto.</p> <p>c) Reemplazar un campo estático por uno móvil, un campo fijo contra uno variable en el tiempo y finalmente, los campos variables por campos estructurados.</p> <p>d) Utilizar los campos con partículas activadas por esos campos.</p>
29. Uso de una construcción neumática o hidráulica.	<p>a) Reemplazar las partes sólidas de un objeto por gas o líquido. Estas partes pueden usar aire o agua para inflarse o utilizar cojines hidrostáticos.</p>
31. Materiales porosos	<p>a) Hacer un objeto poroso o adicionarle elementos porosos.</p> <p>b) Si el objeto ya es poroso, rellenar los poros con alguna sustancia.</p>
32. Cambio de color	<p>a) Modificar el color de un objeto o de su ambiente externo.</p> <p>b) Modificar el grado de transparencia de un objeto o de su ambiente externo.</p> <p>c) A fin de mejorar la visibilidad de un objeto, agregar una sustancia luminiscente o un aditivo colorante.</p> <p>d) Modificar las propiedades de emisión de un objeto que está bajo el efecto de fuentes de calor.</p>
33. Homogeneidad	<p>a) Hacer que los objetos interactúen con un objeto primario que sea del mismo material o que esté cerca de él en comportamiento.</p>
34. Restauración y regeneración de	<p>a) Después de que completan su función o se hace inútil, rechazar o modificar un elemento de un objeto (descartar, disolver o</p>

partes	evaporar). b) Restaurar completamente cualquier parte usada de un objeto.
35. Transformación de propiedades	a) Transformar el estado físico de un objeto (gas, líquido, sólido). b) Cambiar la concentración o la consistencia. c) Cambiar el grado de flexibilidad. d) Modificar la temperatura o el volumen. e) Modificar la presión. f) Modificación de otros parámetros.
36. Transición de fase	a) Utilizar los fenómenos asociados al cambio de fase (cambio de volumen, pérdida u absorción de calor, etc.).
37. Expansión térmica	a) Usar la expansión o contracción de un material por calor. b) Usar varios materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica.
38. Oxidación	a) Reemplazar aire normal con aire enriquecido. b) Reemplace aire enriquecido con oxígeno. c) Tratar al aire o al oxígeno con radiaciones ionizantes. d) Usar oxígeno ionizado.
40. Materiales compuestos	a) Reemplazar un material homogéneo por uno compuesto.

Fuente: Cortés G. *TRIZ: La Teoría de Resolución de Problemas Inventivos. Una perspectiva de la innovación basada en el conocimiento.*

De los parámetros que se mejoran con las plantillas personalizadas, el más representativo o significativo, es la adaptabilidad, ya que es la característica principal de dichos sistemas. De los parámetros que empeoran, el más crítico es la manufacturabilidad, pues es la característica que más se sacrifica en pro de la adaptabilidad. Si ubicamos la intersección de estos parámetros en la matriz, se obtiene que la posible solución más viable para que dichas características no entren en conflicto es el principio 1, el cual se refieren a la segmentación. Es principio establece que un objeto se divida en partes independientes, o que un objeto sea seccionado, o que se incremente el grado de segmentación de un objeto. Este principio se ve aplicado en el diseño modular, pues el sistema está conformado por

diversos módulos o partes que son independientes entre sí. Este diseño modular está dividido en secciones, las cuales presentan partes para el antepié, el mediopié y el antepié. Este sistema permite fabricarse de una manera más fácil, rápida y a bajo costo. Un segundo principio que la matriz ofrece para los parámetros adaptabilidad vs manufacturabilidad es el principio 13, inversión. Este propone implementar una acción opuesta a la dictada por las especificaciones del problema. En nuestro caso de estudio, la problemática parte de las plantillas que son personalizadas, las cuales son especificadas por la literatura y por los profesionales de la salud del pie. El diseño modular aplica este principio en el hecho de realizar una acción contraria a la especificación, la cual es ser una plantilla prefabricada con partes móviles, que en este caso son los módulos, lo cual es otro aspecto que este principio describe. Por último, la relación en la matriz de éstos parámetros en cuestión, también da como posible solución la aplicación del principio número 31, el cual hace alusión a que un objeto se haga poroso. Esto se ve en el diseño de la órtesis plantar, la cual cuenta con una pluralidad de orificios en sus módulos para permitir el ensamble entre ellos. Y, por otro lado, con dicha pluralidad de orificios, la cantidad de material empleado para la fabricación de la plantilla es menor. El segmentar las plantillas en partes independientes, invertir la especificación de diseño personalizado creando uno móvil, utilizando porosidad, son características que posee el diseño modular de órtesis plantar que se está evaluado, además de que el proceso de moldeo por inyección, por el cual el sistema se fabrica, le da un atributo de manufacturabilidad ágil y económico, y de ésta manera el producto está listo para ser adaptado y entregado al usuario en cuestión de minutos.

Otros principios inventivos que la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas propone mediante las celdas de intersección entre los parámetros de mejora y los parámetros de deterioro, y que se identifican en el diseño modular, se enlistan a continuación.

- Principio 3, Calidad local. El diseño modular tiene una estructura heterogénea, ya que está conformado por diversos elementos (módulos) con características y funciones diferentes. Cada módulo tiene la capacidad de desplazarse sobre la

base plantar (módulo principal) y ser colocado en la zona precisa del pie que requiere atención. Con esta estructura heterogénea, varios módulos pueden actuar a la vez para realizar la función de realineación y descarga. Con este diseño se facilita el armado del sistema debido a la cantidad de opciones de módulos con la que cuenta. Este principio mejora la fuerza y resistencia del sistema sin perjudicar la capacidad/productividad del sistema y su manufacturabilidad o facilidad para la fabricación.

- Principio 6, Universalidad. El diseño modular permite ser configurado para tratar diversas afecciones del pie, por lo que el número de funciones que este sistema pueden desempeñar es mayor que un sistema convencional de órtesis plantar. El sistema aumenta la adaptabilidad de la órtesis al usuario de una manera rápida, por el amplio abanico de posibilidades para ser configurado o armado.
- Principio 8, Contrapeso. El sistema modular al interactuar con el usuario, puede ser visto como un sistema interactuando con el sistema musculo esquelético de éste. Una de las funciones que desempeña el sistema es equilibrar la presión que recibe el pie debido al peso corporal del usuario, y evitar cargas puntuales en ciertas zonas del pie, es decir, el sistema es un contrapeso al peso corporal de la persona que está en interacción directa con la órtesis a través de su pie. Este principio mejora la resistencia del sistema al mantener un equilibrio entre el peso del usuario y la fuerza soportada por la órtesis.
- Principio 10, Acción previa. El sistema modular permite posicionar al módulo de manera precisa en la zona del pie que requiere tratamiento mediante su mecanismo ajustable, para que, en un trabajo armónico entre módulos, todos realicen sus funciones al mismo tiempo.
- Principio 11, Amortiguamiento anticipado. Si los módulos del sistema no quedasen ensamblados en las zonas precisas del pie, causarían incomodidad al

usuario y su funcionamiento no sería el apropiado. Con este diseño se prevé esa posibilidad y por tal motivo los módulos son desplazables, para que en determinado momento el usuario pueda reposicionar el módulo en la zona que era necesaria. De esta manera aseguramos que el sistema verdaderamente cumpla con su función de manera óptima.

- Principio 14, Esferoidalidad. El sistema modular basa su diseño, visto en dos dimensiones, en círculos, semicírculos, arcos y radios. Extruido el diseño, es decir, visto en tres dimensiones, existen concavidades y convexidades en la mayoría de los módulos. La base plantar, módulo principal, tiene en la zona del talón una concavidad con el objetivo amortiguar el impacto sobre el hueso calcáneo. Los arcos, tanto longitudinales como transversos, presentan en su cara superior una terminación convexa para ajustarse mejor a la anatomía del pie.
- Principio 15, Dinamicidad/Movilidad. El sistema modular está diseñado para que sus diversas partes se relacionen entre sí mediante un mecanismo de ensamble perno-orificio, siendo éstas partes adaptables y móviles. Este principio le da velocidad en la configuración del sistema para cada usuario y en el proceso de fabricación del mismo.
- Principio 17, Transición a una nueva dimensión. El sistema modular utiliza el ensamblaje para cambiar la dimensión de su configuración inicial. Los arcos longitudinales son de cuatro niveles de altura. La base plantar y la talonera pueden ensamblarse en multicapas para brindar una dimensión de mayor altura. Este aspecto es una forma de aumentar la capacidad del sistema para realizar más funciones.
- Principio 21, Modificación de la velocidad. El sistema modular permite que el proceso para configurar una órtesis con ciertas especificaciones sea mucho más rápido en comparación con los procesos de confección de órtesis convencionales.

- Principio 33, Homogeneidad. El sistema modular cuenta con una parte primaria o principal, la cual es la base plantar, quien tiene relación con los demás módulos del sistema, todos estos están hecho del mismo material lo cual permite que el sistema sea homogéneo respecto a las características del material. Y, por otro lado, el mismo material para todos los módulos, permite emplear el proceso de moldeo por inyección para la fabricación de cada componente del sistema.
- Principio 34, Restauración y regeneración de partes. El sistema modular permite modificar la configuración de armado de la plantilla cada vez que sea necesario, y en determinado momento, retirar algún módulo, cuando éste ya no se requerido por el usuario debido a que ya cumplió su función o necesitar ser reemplazado por otro.
- Principio 35, Transformación de propiedades. El sistema de órtesis plantar con diseño modular que se evalúa en esta investigación, ve en este principio, su mayor respaldo, ya que permite conservar todos los parámetros que mejoran el sistema sin degradar o afectar ningún otro. El sistema modular es flexible, tanto en su proceso de fabricación como en su configuración de armado. Permite emplear cualquier polímero que reúna las condiciones o características que se requiere para ofrecer al usuario una sensación de confort sin disminuir la capacidad de resistencia al rompimiento del material. Y, por otro lado, las configuraciones de armado son muy variadas, por lo que el usuario puede tener la confiabilidad de que el sistema se adaptará a sus necesidades de atención, aun cuando estas cambien en el transcurso de su interacción con el sistema. De esta manera el sistema no se ve mermado en su capacidad para cumplir con varias funciones a la vez, y su manufacturabilidad no se encuentra comprometida en ningún momento por falta de recursos materiales, puesto que cualquier polímero que cumpla o se acerque más a los requisitos antes mencionados podrá ser utilizado.

- Principio 36, Transición de fase. Este principio puede verse aplicado en el proceso de fabricación de cada componente del sistema. En el proceso de moldeo por inyección el material es introducido al sistema de alimentación de la máquina en forma de gránulos, para pasar a una cámara de calefacción que derrite el material para poder ser inyectado, por lo que hubo una transición de fase en el material.
- Principio 37, Expansión térmica. Este principio, de igual manera, se hace presente en el proceso de moldeo por inyección mediante el cual se fabrica el sistema. El calor aplicado al material durante el proceso, hace que éste cambie a un estado viscoso, esto permite que sea inyectado al molde, distribuyéndose en todo su volumen. Al dejarse enfriar, el material se contrae y permite desmontarse del molde.

Aparte de los principios que la matriz sugiere, es posible aplicar cualquier otro de los principios inventivos que se crea pertinente en la búsqueda de solución. En este caso, es posible identificar, además de lo propuesto en la tabla 4, los siguientes principios inventivos.

- Principio 2, Extracción. El extraer únicamente la parte o propiedad necesaria de un sistema, es un aspecto que establece este principio. El principio de extracción se armoniza con el sistema modular en cuestión, debido a que el sistema se configura para el usuario, extrayendo o retirando los módulos que éste no necesita, o visto de otra manera, el armado de la órtesis se realiza extrayendo de entre todos los módulos del sistema, aquellos que el usuario requiere para atender o tratar su afectación.
- Principio 4, Asimetría. El principio de asimetría indica que se reemplace una forma simétrica de un objeto por una asimétrica, y si ya existe asimetría en el objeto incrementar el grado de esta. Considerando que la asimetría es la no correspondencia exacta en tamaño, forma y posición de los elementos de un conjunto, podemos considerar que el sistema modular presenta este principio, que se exhibe en la capacidad de posicionar a los módulos del sistema de una

forma o manera distinta para cada base plantar. De igual manera, el tamaño de algunos módulos puede variar en la configuración o integración de éstos a cada base plantar.

- Principio 5, Combinado. Una de las opciones para aplicar este principio es consolidar, en tiempo, operaciones simultáneas. Los módulos que se integran a la base plantar realizan funciones en específico armonizadas en el tiempo. De esta manera el usuario puede obtener soportes para el retropié, mediopié y antepié al mismo tiempo, solo integrando los módulos para cada zona.
- Principio 7, Anidación. El principio de anidación se aplica haciendo que un objeto pase a través de la cavidad de otro. El mecanismo de ensamble de los módulos del sistema con el módulo principal y, en algunos casos, entre los mismos módulos, obedece a este principio, ya que la sección de pernos dispuestos en cada módulo pasa a través de la pluralidad de orificios o cavidades de éstos.
- Principio 24, Mediador. Usar un objeto intermediario para transferir o llevar a cabo una acción es un aspecto de este principio. El segundo aspecto que este principio establece es que temporalmente se conecte un objeto a otro y después quitar uno de ellos. El diseño modular utiliza este principio haciendo que la base plantar sea ese elemento intermediario, puesto que los módulos al ensamblarse con la base pueden realizar sus funciones. Por otro lado, el segundo aspecto de este principio también es empleado puesto que un módulo del sistema, el cual está ensamblado a otro, puede retirarse posteriormente, debido a que éste solo era requerido de manera temporal, o ya cumplió la función para la cual fue puesto.

Con lo anterior, se puede determinar que son 22 principios inventivos referidos en el sistema tecnológico en cuestión. Algunos de éstos están presentes en el supersistema tecnológico que contiene al sistema modular, y que tiene influencia en el desempeño óptimo del mismo, otros se identifican en los subsistemas. Todos los principios detectados

en el sistema modular parten tanto de la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas como de los 40 principios en general, y tienen como finalidad respaldar a la órtesis modular como el sistema que resuelve el conflicto técnico entre parámetros o características que no pueden coexistir debido a la especificación de diseño personalizado que las órtesis plantares deben atender.

### **5.1.2. Contradicción física principal en los sistemas de órtesis plantares**

Otra forma de respaldar el sistema modular de órtesis plantar es mediante la formulación de la contradicción física que el sistema personalizado presenta. En ocasiones resulta muy conveniente convertir una contradicción técnica en contradicción física por resultar teóricamente más fácil de resolver en un nivel físico. Para ello se deben aplicar los principios de separación.

- Separación en el espacio: Este principio se aplica cuando un requerimiento o parámetro puede estar en un lugar y ausentarse de otro. El aspecto positivo y negativo del requerimiento no necesitan estar en todos los lugares del sistema, hay un espacio en el que no es necesario su coexistencia.
- Separación en el tiempo: Este principio se aplica cuando un requerimiento o parámetro puede estar presente durante un periodo de tiempo y ausentarse en otro intervalo de tiempo. El aspecto positivo y negativo del requerimiento no necesita estar todo el tiempo presente en el sistema.
- Separación entre las partes y el todo: tiempo: Este principio se aplica cuando un requerimiento o parámetro existe en una parte del sistema, pero no existe en un subsistema del mismo, o en el supersistema al cual pertenece.
- Separación de acuerdo a una condición: Este principio se aplica cuando un requerimiento o parámetro existe bajo una condición o se ausenta bajo otra.

Para poder identificar el principio que se ve aplicado en el sistema modular de órtesis plantar, se plantea la contradicción física del sistema, la cual parte de la contradicción

técnica directa, cuyo problema son los parámetros que entran en conflicto con los diseños de plantillas personalizadas, y de la contradicción técnica inversa, cuyo problema son los parámetros que entran en conflicto con los diseños de plantillas prefabricados (ver tabla 1). Por lo anterior, la contradicción física de los sistemas de órtesis plantares se enuncia de la siguiente manera:

“El diseño de los sistemas de órtesis plantares debe ser personalizado para adaptarse de manera precisa al usuario y poder cumplir con sus funciones de realineación de ejes y equilibrio de presiones de una forma óptima, pero deber ser no personalizado para que tenga un proceso de fabricación más ágil, menor costo y menor tiempo de entrega al cliente.”

El sistema modular como parte del supersistema, se visualiza como un producto fabricado en un sistema de producción semicontinuo, desde este punto de vista, se comporta como un sistema no personalizado. Pero cuando el sistema modular se visualiza como un todo, éste se puede separar en parte aplicando el principio inventivo 1, correspondiente a la segmentación para tener adaptabilidad al usuario. De esta manera el sistema modular vence la contradicción física de ser un sistema personalizado y prefabricado a la vez.

### **5.1.3. Contradicciones en el diseño modular de órtesis plantar**

El sistema de órtesis plantar que se está evaluando también presenta contradicciones entre los subsistemas que integran el sistema modular, y entre dichos subsistemas con el pie del usuario. Estas contradicciones se enlistan a continuación.

Contradicción técnica:

- 1) La base plantar de  $\frac{3}{4}$  de longitud deja en libertad el movimiento los dedos del pie y permite que la plantilla se adapte a la mayoría del calzado, pero al no ser una plantilla de longitud completa deja desprotegida las cabezas metatarsales, además que ésta, en algunos casos, tiende a deslizarse hacia la puntera del calzado.

Tabla 6. Contradicción técnica del sistema modular de órtesis plantar

Problema	Contradicción técnica	
	Aspecto de mejora	Aspecto que empeora
Plantillas de $\frac{3}{4}$ de longitud.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptabilidad en la mayoría del calzado</li> <li>• Libertad de movimiento de los dedos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deslizamiento indeseado de la plantilla hacia la puntera del calzado.</li> <li>• Desprotección a las cabezas metatarsales.</li> </ul>
	Aspecto de mejora en lenguaje TRIZ	Aspecto que empeora en lenguaje TRIZ
Longitud del objeto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetro 35: Adaptabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetro 5: Área del objeto en movimiento.</li> </ul>

Fuente: Propia.

Tabla 7. Contradicción física del sistema modular de órtesis plantar

Característica que entra en conflicto consigo mismo	Contradicción física	
	Debe ser:	Y al mismo tiempo debe de ser:
Longitud de la plantilla	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De <math>\frac{3}{4}</math> de longitud.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De longitud completa.</li> </ul>

Fuente: Propia

Para resolver la contradicción técnica del sistema modular se utiliza la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Matriz de Resolución de Contradicción Técnica aplicada para el sistema modular de órtesis plantar.

Característica que se degrada (Y)		5	
		Área del objeto en movimiento	
Característica a mejorar (X)			
35	Adaptabilidad	35	30
		29	7

Fuente: Adaptado de Cortés G. *TRIZ: La Teoría de Resolución de Problemas Inventivos. Una perspectiva de la innovación basada en el conocimiento.*

La matriz anterior sugiere la aplicación de los principios inventivos 35 (transformación de los estados físicos y químicos de un objeto), 30 (película flexible o membranas delgadas), 29 (uso de una construcción neumática o hidráulica) y 7 (anidación), para resolver el conflicto entre los parámetros de adaptabilidad de la plantilla al calzado y el movimiento de ésta hacia la puntera del calzado durante la marcha del usuario. No todos los principios forzosamente se tienen que aplicar, el que mejor ha dado resultado como solución genérica es el principio inventivo 35, por lo que se sugiere empezar la búsqueda de solución aplicando este principio.

La contradicción física planteada para este caso únicamente se toma para establecer el parámetro crítico del sistema, y poder asegurar que la resolución de la contradicción técnica lo tome en consideración para establecer la solución de la problemática.

#### 5.1.4. Nivel de inventiva del sistema modular de órtesis plantar

Hasta este momento, se han planteado las contradicciones que presentan los sistemas de órtesis plantares personalizados, los cuales son indicados por los especialistas en el cuidado de la salud del pie, por lo dichos insumos para la salud deben atender a esta especificación, sin embargo, como ya se ha visto, las órtesis personalizadas conllevan a que

ciertos parámetros del sistema se vean afectados, mientras que su diseño antagónico, es decir, las ortesis prefabricadas salvaguardan la funcionalidad de los parámetros que las ortesis personalizadas degradan, pero afectando a los parámetros que se optimizaban con las personalizadas.

El diseño modular de ortesis plantar se ha propuesto como alternativa de solución a las contradicciones planteadas. Como se vio con anterioridad, en este diseño se ve aplicado varios Principio Inventivos. Esto permite establecer que el diseño de la ortesis estudiada posee actividad inventiva, y es necesario, para los objetivos que persigue esta investigación, determinar el grado de innovación que el sistema modular presenta con respecto a los sistemas de ortesis plantares convencionales, tanto personalizados como prefabricados, que hasta el momento se han podido encontrar en el mercado y en base de datos de patentes a nivel nacional y mundial.

Altshuller propuso clasificar una innovación de acuerdo al grado de mejora que realiza un sistema. Esta jerarquización se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Niveles de Inventiva

Nivel	Grado de inventiva	Porcentaje de soluciones	Fuente de conocimiento	No. Aproximado de soluciones consideradas (ensayo-error)
1	Solución clara	32%	Conocimiento personal	10
2	Mejora menor	45%	Conocimiento dentro de la compañía	100
3	Mejora mayor	18%	Conocimiento dentro de la industria	1,000
4	Nuevo concepto	4%	Conocimiento fuera de la industria	100,000
5	Descubrimiento	1%	Todo el conocimiento posible	1,000,00

Fuente: Terninko J., Zusman A., Zlotin B. (2000).

De acuerdo a la tabla anterior, el sistema modular de órtesis plantar se ubica en el nivel 3 de inventiva, puesto que su diseño resuelve contradicciones técnicas y físicas, y por lo tanto se considera como una mejora mayor de los sistemas de órtesis plantares existentes. Este diseño implica la convergencia de diversas áreas de la ingeniería, biología y medicina, pero principalmente la ingeniería es la que más aporta al diseño, al visualizar al pie como una estructura mecánica que requiere de soportes para darle estabilidad y soportar el impacto vibracional al que es expuesto al caminar. Por otro lado, el proceso de manufactura denominado moldeo por inyección influyó en el diseño de la órtesis estudiada, debido a que para poder utilizar este proceso en la fabricación del sistema de manera fácil y a bajo costo, se tuvo que segmentar el producto en diferentes partes, las cuales son obtenidas a través de dicho proceso.

Con todo lo realizado hasta el momento en este trabajo de investigación, estamos en posibilidad de establecer la conclusión a la presente evaluación de este sistema modular de órtesis plantar, así como de proporcionar recomendaciones para mejorar el sistema, y poder determinar el nivel de innovación que este sistema representa en el campo de los insumos médicos, específicamente en el de las órtesis plantares.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

Con el análisis hecho al sistema modular de órtesis plantar denominado Plantilla Universal se ha llegado a establecer las siguientes conclusiones:

El sistema modular de órtesis plantar cumple con los lineamientos de diseño ergonómico de producto, debido a que éste sistema está orientado a adaptarse a las características de cada usuario, es decir a sus necesidades particulares, considerando el asegurar que el usuario siempre obtenga los máximo beneficios, debido a las amplias alternativas de configuración con las que cuenta el sistema. Este grado de flexibilidad y adaptabilidad al usuario es la característica principal de éste sistema que se compagina con el concepto de ergonomía en un producto. Por lo anterior, se respalda a este dispositivo médico, como un insumo para la salud del pie, confiable, seguro y que reúne características que lo distinguen de los demás productos de éste giro en el mercado.

También se concluye enfáticamente que este sistema es novedoso, debido a que en la búsqueda en base de datos de patentes que se ha realizado a la fecha, ha constatado que no se ha encontrado nada exactamente igual al producto que se evalúa en esta investigación. Sin embargo, sí existen características de modularidad en otros sistemas de órtesis plantares, pero no en el mismo grado de segmentación y dinamismo que este sistema evaluado lo hace. Tampoco comparten la misma forma de integración e interacción de los distintos módulos que integran el sistema.

Se puede establecer que este diseño modular presenta actividad inventiva. Esto lo respaldan los 40 principios inventivos que la metodología TRIZ propone aplicar para encontrar soluciones a problemas inventivos. Veintidós de éstos pudieron ser identificados en el diseño de la órtesis plantar, el cual es el objeto de estudio de esta investigación. Con ello, se puede establecer que este sistema es una solución con un cierto nivel de inventiva, debido a que se ve aplicado conocimiento de otras industrias, y por lo tanto no se ha hecho evidente para el sector de dispositivos médicos, el diseño de un sistema como éste.

Este sistema tiene un gran potencial para su aplicación industrial, debido a la forma en que puede ser manufacturado ya que permite el uso de cualquier polímero para su fabricación; estas cualidades hacen que éste sistema de órtesis sea de bajo costo tanto para la empresa manufacturera como para el cliente.

Desde la perspectiva del análisis que se ha hecho al sistema modular de órtesis plantar, mediante el uso de herramientas de la metodología TRIZ, se le asigna a éste sistema un nivel de innovación de grado 3, debido a que:

Se han expuesto las razones por las cuales el sistema modular es la solución para resolver la contradicción principal que presentan los sistemas de órtesis plantares, tanto técnica como física. Este diseño permite acercarse al sistema ideal de órtesis plantar, para lo cual ha sido necesario la conjugación de conocimiento de varios campos científicos e industriales. Este nivel de innovación permite conjuntar tres aspectos como los son la novedad, la actividad inventiva y la aplicación industrial, lo cual le otorga a este sistema la factibilidad de ser patentado.

Se encuentra en su etapa media de madurez, ya que la característica de modularidad del sistema se encuentra bien definida y establecida. Este sistema se encuentra en el proceso de obtener una patente, sin embargo, éste concepto ha obtenido una patente previa, y un modelo de utilidad. El número de usuarios que tiene este sistema va en aumento y está en el proceso de realizarse mejoras para acercarse a la idealidad.

Con todo lo anterior, se afirma que los objetivos específicos se lograron cumplir de una manera satisfactoria, ya TRIZ brindó las herramientas necesarias para considerar que el diseño modular posee características innovadoras, las cuales permiten posicionar a este sistema como una de las alternativas más dinámicas y flexibles, para solucionar la mayoría de las afectaciones de los miembros inferiores.

Por otro lado, esta investigación ha sido un claro ejemplo del trabajo en vinculación con el sector empresarial. Se considera que el resultado de esta tesis beneficia a la investigación de nuevas técnicas o formas para diseñar dispositivos ortopédicos con lineamientos ergonómicos, para que puedan ser adoptadas en las empresas que se dedican a este giro o sector. Particularmente, la empresa que fabrica y comercializa a la Plantilla

Universal, con esta investigación obtiene un estudio metodológico de las características ergonómicas y funcionales que el diseño modular de este sistema posee, para respaldar su contribución innovadora al campo de las órtesis plantares. Producto de esto, se ha sometido una solicitud de patente para este sistema modular de órtesis plantar ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Por último, se concluye, que este trabajo contribuye con la difusión y aplicación de la metodología TRIZ en nuestro país, para analizar problemas en los cuales su solución no resulta evidente en el campo que surge dicho problema, y poder obtener soluciones extrapoladas de otros campos científicos o industrias.

## **6.2. Recomendaciones**

Las siguientes recomendaciones parten del análisis de la evolución del sistema tecnológico y de las contradicciones del sistema. El tomarlas en cuenta permitirá desarrollar una nueva mejora al sistema, o en su caso una nueva invención.

- Existe un área de oportunidad en el tratamiento de asimetrías de más de un centímetro de altura, ya que el sistema modular sólo permite ensambles de hasta tres bases plantares que dan un máximo de altura de 9 mm.
- Ver la posibilidad de introducir una capa delgada de algún material sobre la superficie de la base plantar para evitar el deslizamiento de la plantilla hacia la puntera del calzado.
- Introducir este dispositivo médico en el catálogo de insumos para la salud, ello para proveer al sector salud de un nuevo producto de órtesis plantar.

- Seguir utilizando la metodología TRIZ como una herramienta para guiar el diseño ergonómico de productos hacia resultados con nivel de inventiva significativo.

## 7. REFERENCIAS

- Aguilar-Zambrano, J. A., Valencia, M. V., Martínez, M. F., Quinceno, C. A., & Sandoval, C. M. (2012). Uso de la Teoría de Solución de Problemas Inventivos (TRIZ) en el análisis de productos de apoyo a la movilidad para detectar oportunidades de innovación. *Ingeniería y Competitividad*, 14(1), 137-151.
- Alexander, I. J. (1990). *El pie exploración y diagnóstico*. Barcelona: JIMS.
- Asociación Mexicana de TRIZ, A.C. (31 de Marzo de 2016). *Estructura del TRIZ Clásico: AMETRIZ*. Obtenido de <http://www.ametriz.com/index.php/estructura-del-triz-clasico>
- Avent, R. T., Yang, P. C., & Lundy, C. E. (2012). *México Patente n° MX305825B*.
- CASE, J. P., & Galbraith, J. A. (2013). *USA Patente n° US20130219744A1*.
- Céspedes Céspedes, T., Dorca Coll, A., Sacristan Valero, S., & Cuevas Gómez, R. (23 de Octubre de 2015). *Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona*. Obtenido de <http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/21097/1/104734.pdf>
- Chang, W.-T. (2013). *USA Patente n° US20130047462A1*.
- Cohí, O., & Salinas, F. (2003). Ortesis plantares. *El pie en reumatología*, 74-79.
- Comité Técnico de Insumos para la Salud. (3 de Mayo de 2016). *Criterios para la clasificación de dispositivos médicos con base a su nivel de riesgo sanitario*. Obtenido de [http://www.cofepris.gob.mx/AS/Documents/RegistroDispositivosMedicos/6criterios\\_clasif\\_riesgosan\\_DM\\_251108.pdf](http://www.cofepris.gob.mx/AS/Documents/RegistroDispositivosMedicos/6criterios_clasif_riesgosan_DM_251108.pdf)
- Córdova Ames, W. (2008). TRIZ, la herramienta del pensamiento e innovación sistemática. *Contabilidad y Negocios*, 38-46.
- Coronado Maldonado, M., Oropeza Monterrubio, R., & Rico Arzate, E. (2005). *Innovación Sistemática mediante TRIZ*.

Cortés Robles, G. (s.f.). TRIZ: La Teoría de Resolución de Problemas Inventivos. Una perspectiva de la innovación basada en el conocimiento.

Donzis, D., & Donzis, A. (2012). *USA Patente nº US20120246971A1*.

Flores Téllez , G., Garnica González, J., Medina Marín, J., & Millán Rivera, E. A. (2015). Ergonomía asistida por computadora y la metodología TRIZ: una sinergia en la innovación y diseño de productos. *Compendio Investigativo de Academia Journals Celaya*, 1714-1719.

García, I., & Zambudio R. (26 de Abril de 2016). *Ortesis, Calzado y Prótesis*. Obtenido de [http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bio/ortesis\\_calzado\\_y\\_protesis.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bio/ortesis_calzado_y_protesis.pdf)

Henrich Saavedra, M., & Rojas Lozano, O. (2013). Aplicación de la metodología TRIZ en el diseño ergonómico de estaciones de trabajo. *Industrial Data*, 102-107.

*Innovación Sistemática*. (28 de Octubre de 2015). Obtenido de <http://www.innovacion-sistemica.net/>

Lelièvre, J., & Lelièvre, J.-F. (1987). *Patología del pie*. Barcelona: Masson, S.A.

Muñoz, J. (26 de Abril de 2016). *Deformidades del pie*. Obtenido de [http://apps.elsevier.es/watermark/ctl\\_servlet?\\_f=10&pidet\\_articulo=80000202&pidet\\_usuario=0&pcontactid=&pidet\\_revista=51&ty=75&accion=L&origen=apcco ntinuada&web=www.apcontinuada.com&lan=es&fichero=v4n4a202pdf001.pdf](http://apps.elsevier.es/watermark/ctl_servlet?_f=10&pidet_articulo=80000202&pidet_usuario=0&pcontactid=&pidet_revista=51&ty=75&accion=L&origen=apcco ntinuada&web=www.apcontinuada.com&lan=es&fichero=v4n4a202pdf001.pdf)

Najafi, B., Barnica, E., Wrobel, J., & Burns, J. (2012). Dynamic plantar loading index: Understanding the benefit of custom foot orthoses for painful pes cavus. *Journal of Biomechanics*, 1705-1711.

Organización Mundial de la Salud. (2012). *Dispositivos médicos: La gestión de la discordancia*. Francia: OMS.

Periyasamy, R., & Anand, S. (2013). The effect of foot arch on plantar pressure distribution during standing. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 342-347.

- ProMéxico. (11 de Mayo de 2014). *Sectores: Dispositivos Médicos*. Obtenido de [http://mim.promexico.gob.mx/wb/mim/vida\\_perfil\\_del\\_sector](http://mim.promexico.gob.mx/wb/mim/vida_perfil_del_sector)
- Rodríguez Ordaz, R., Contreras Gallardo, J. G., & Gallardo Sánchez, A. M. (2007). Aplicaciones de Metodología TRIZ, para eliminar accidentes de trabajar y diseñar sistemas ergonómicos en movimiento de herramental pesado. *2do Congreso Iberoamericano de Innovación Tecnológica*, 3-8.
- Sanjurjo Castelao, G., & Fernández Faes, R. (2006). Productos de apoyo para personas con discapacidad: clasificación y terminología. *Revista Asturiana de Terapia Ocupacional*, 11-13.
- Scofield, R. K. (2010). *USA Patente n° US7770309B2*.
- Secretaria de Economía. (11 de mayo de 2013). *La industria de los dispositivos médicos 2012*. Obtenido de [http://mim.promexico.gob.mx/work/sites/mim/resources/LocalContent/68/2/130815\\_DS\\_Dispositivos\\_Medicos\\_ES.pdf](http://mim.promexico.gob.mx/work/sites/mim/resources/LocalContent/68/2/130815_DS_Dispositivos_Medicos_ES.pdf)
- Secretaria de Salud. (21 de Octubre de 2015). *Centro de Documentación Institucional*. Obtenido de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/compi/ris.html>
- Secretaria de Salud. (30 de Septiembre de 2015). *Diario Oficial de la Federación: SEGOB*. Obtenido de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5376857&fecha=22/12/2014](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5376857&fecha=22/12/2014)
- Solis, G., Hennessy, M., & Saxby, T. (2000). Pes cavus: a review. *Foot and Ankle Surgery*, 145-153.
- Sushkov, V. V., Mars, N. J., & Wognum, P. M. (1995). Introduction to TIPS: a theory for creative design. *ELSEVIER*, 177-189.
- Terninko, J., Zusman, A., & Zlotin, B. (2010). *Systematic innovation: an introduction to TRIZ*. New York: CRC Press.

- Vallejo González, J. L. (2004). Tapetes y plantillas antifatiga. ¿Cuáles son sus verdaderos beneficios? *Revista Latinoamericana de la Salud en el Trabajo*, 35-38.
- Verleysen, J. (1977). *Compendio de Podología*. Zaragoza: Cometa, S.A.
- Viladot Pericé, A. (1981). *Diez lecciones sobre patología del pie*. Barcelona: Ediciones Toray, S.A.
- Vito, R. A. (2011). *USA Patente nº US20110302805A1*.
- Witana, C. P., Goonetilleke, R. S., Xiong, S., & Au, E. Y. (2009). Effects of surface characteristics on the plantar shape of feet and subjects perceived sensations. *Applied Ergonomics*, 267-279.