

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO DE UN SISTEMA PARA
MODIFICACIÓN DE MALLAS QUIRÚRGICAS
PARA HERNIA ABDOMINAL

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MARICARMEN GUILLÉN MANDUJANO

TUTOR PRINCIPAL:
DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ FACULTAD DE INGENIERÍA
JURIQUILLA, QRO.

CIUDAD UNIVERSITARIA, C.D.M.X., MAYO DE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Vicente Borja Ramírez
Secretario: Dr. Leopoldo Adrián González González
1^{er}. Vocal: Dr. Jesús Manuel Dorador González
2^{do}. Vocal: Dr. Adrián Espinosa Bautista
3^{er}. Vocal: Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Jesús Manuel Dorador González



FIRMA

Resumen

La patología herniaria de la pared abdominal representa un serio problema de salud pública, tanto a nivel nacional como mundial. En la actualidad, la hernioplastia o reparación de hernia por empleo de una malla o material protésico para el refuerzo de la pared abdominal, es el método predominante para su atención, ya que ha probado disminuir la recurrencia de las hernias.

A pesar de que la aplicación de una malla quirúrgica en la reparación de hernias presenta grandes ventajas, aún no se cuenta con una malla que presente el comportamiento ideal, pues aquellas que son empleadas en la mayoría de los casos, a nivel nacional, no pueden ser colocadas en la posición intraperitoneal, presentando una gran cantidad de complicaciones.

El presente trabajo de investigación parte de la identificación de la necesidad de buscar una solución que permita contar con una malla compuesta o combinada, bifásica, que permita tanto la integración con la pared abdominal, como la no adherencia en una de sus caras, de manera que pueda ser colocada en contacto con la región visceral.

Para ello, se propone la aplicación de una metodología de diseño con enfoque en el diseño mecánico, para el planteamiento de un sistema capaz de realizar modificaciones en una de las superficies de la malla para hernioplastia, a través de la aplicación de un recubrimiento empleando el método de inmersión.

Se presenta el desarrollo completo de las etapas de diseño conceptual y materialización del concepto, concluyendo con la generación de dos modelos analíticos para la visualización de la configuración propuesta, así como la validación del subsistema de desplazamiento. Finalmente se plantean las rutas para continuación de la investigación, como trabajo futuro.

Abstract

Abdominal wall hernia pathology represents a serious public health problem, both nationally and globally. Currently, hernioplasty or hernia repair by using a mesh or prosthetic material to reinforce the abdominal wall, is the predominant method for addressing this issue; since it has been proven to decrease the recurrence of hernias.

Despite the fact that the application of a surgical mesh for hernia repair presents great advantages, there is still no mesh that exhibits ideal behavior, particularly the ones being used in most cases, at the national level, which cannot be placed in the intraperitoneal position, presenting numerous complications.

This research starts from the need to look for a solution that allows having a compound, or combined biphasic mesh that allows both integration with the abdominal tissue, and non-adherence on one of its faces, so it can be placed in contact with the visceral region.

For this purpose, a design methodology with focus on mechanical design is applied in order to develop a system capable of modifying one of the surfaces of the surgical mesh, through the application of a coating using the dip coating method.

The complete development of the conceptual design and materialization of the concept stages are presented, concluding with the generation of two analytical models for the visualization of the proposed configuration, as well as the validation of the displacement subsystem. Finally, the paths for continuation of the research are presented as future work.

Contenido

Resumen	i
Abstract	ii
Contenido	iii
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Introducción	1
Objetivos y alcance	4
Capítulo 1- Antecedentes y Marco Teórico	5
1.1. Justificación	5
1.2. Mallas para hernioplastia	8
1.2.1. Propiedades de las mallas	9
1.2.2. Clasificación de mallas	12
1.2.3. Problemática derivada de la implantación de mallas abdominales	18
1.3. Estado del arte (mallas)	21
1.3.1. Materiales para fabricación de mallas quirúrgicas	22
1.3.2. Materiales empleados para evitar adhesión	25
1.3.3. Mallas compuestas o mixtas	28
Capítulo II- Diseño Conceptual	32
2.1. Metodología de diseño	32
2.2. Diseño conceptual: definición y etapas	34
2.2.1 Clarificación de la tarea y configuración de la lista de requisitos	35
2.2.2 Abstracción para identificar los problemas esenciales	37
2.2.3 Establecimiento de estructuras funcionales	42
2.2.4. Búsqueda de principios de funcionamiento/solución	48
2.2.5 Combinación de principios de funcionamiento/solución	54
2.2.6 Confirmación de alternativas de solución	58
2.2.7 Evaluación de las alternativas de solución	58
2.2.8 Selección del concepto	59

Capítulo III- Materialización del concepto	62
3.1 Arquitectura de sistema	63
3.1.1 Esquema del Producto	65
3.1.2 Disposición geométrica aproximada	67
3.1.3 Identificación de las interacciones fundamentales e incidentales	74
3.2 Diseño de configuración	75
3.2.1 Propuestas de configuración	79
3.2.2 Selección de la configuración del sistema	107
Capítulo IV- Modelos del sistema	109
4.1 Modelo tridimensional del sistema	110
4.1.1 Generación del modelo tridimensional del sistema	111
4.1.2 Resultados	113
4.2 Modelo matemático del sistema	119
4.2.1 Generación del modelo matemático	119
4.2.2 Resultados	127
Capítulo V- Conclusiones y trabajo futuro	129
5.1 Conclusiones	129
5.2 Trabajo futuro	131
Referencias	132
Apéndices	142
Apéndice A- Matriz QFD	142
Apéndice B- Comparativa dip coaters comerciales	143
Apéndice C- Comparativa dip coaters desarrollados para investigación	144
Apéndice D- Tabla de compatibilidad para eliminación de soluciones	145
Apéndice E- Matriz de comparación por pares para ponderación de los criterios de evaluación	146
Apéndice F- Matriz de decisión para selección del concepto	147
Apéndice G- - Propuestas de Distribución Geométrica Aproximada del Sistema	148

Índice de Tablas

Capítulo 1- Antecedentes y Marco Teórico	5
Tabla 1.1- Clasificación de mallas por cantidad de material	13
Tabla 1.2- Clasificación de mallas por tamaño de poro	16
Tabla 1.3.- Ejemplos de mallas no absorbibles fabricadas con materiales sintéticos, disponibles en el mercado	24
Tabla 1.4- Ejemplos de mallas compuestas disponibles en el mercado	31
Capítulo II- Diseño Conceptual	32
Tabla 2.1- Requerimientos del sistema	41
Tabla 2.1- Especificaciones objetivo para el sistema	42
Tabla 2.3- Relación de sistemas-funciones-medios	48
Tabla 2.4- Cuadro comparativo de soluciones para el sistema de sujeción	50
Tabla 2.5- Cuadro comparativo de soluciones para el sistema de desplazamiento	51
Tabla 2.6- Cuadro comparativo de soluciones para el sistema de recubrimiento	52
Tabla 2.7- Cuadro comparativo de soluciones para el sistema de procesamiento	53
Tabla 2.8- Conceptos generados	59
Tabla 2.9- Criterios de evaluación empelados para la evaluación de conceptos	60
Capítulo III- Materialización del concepto	62
Tabla 3.1- Relación de los módulos, sus funciones e interfaces	68
Tabla 3.2- Relación de los módulos y sus funciones con los requerimientos del sistema	77
Tabla 3.3- Selección de configuraciones	108
Capítulo IV- Modelos del sistema	109
Tabla 4.1- Lista de elementos generados para el modelo CAD	112
Tabla 4.2- Ratos recopilados de la literatura, para la prueba del modelo matemático	121
Tabla 4.3- Resultados de velocidad de rotación y frecuencia del tren de pulsos	128

Índice de Figuras

Capítulo 1- Antecedentes y Marco Teórico	5
Figura 1.1- Clasificación de mallas quirúrgicas	12
Capítulo II- Diseño Conceptual	32
Figura 2.1- Fases del proceso de diseño	33
Figura 2.2- Etapas del diseño conceptual	35
Figura 2.3- Procesos para generar recubrimientos	37
Figura 2.4- Etapas del proceso de recubrimiento por inmersión	39
Figura 2.5- Diagrama de caja negra del sistema para modificación de mallas para hernia	44
Figura 2.6- Elementos principales de un sistema de recubrimiento por inmersión (dip coater)	45
Figura 2.7- Diagrama de descomposición funcional del sistema	46
Figura 2.8- Diagrama de descomposición funcional a dos niveles de abstracción más específicos	47
Figura 2.9- Matriz morfológica para generación de conceptos	54
Figura 2.10- Matriz morfológica reducida	56
Figura 2.11- Proceso de generación de conceptos por medio de combinación de soluciones	57
Figura 2.12- Conceptos mejor evaluados en la matriz de decisión	61
Figura 2.13- Comparativa de los perfiles de valor de los tres conceptos mejor evaluados.	61
Capítulo III- Materialización del concepto	62
Figura 3.1- Tipos de arquitectura modular	64
Figura 3.2- Esquema de la arquitectura del sistema para modificación de mallas quirúrgicas	66
Figura 3.3- Ejemplos de configuraciones de dispositivos para recubrimiento por inmersión	69
Figura 3.4- Impresora de concreto	70
Figura 3.5- Ejemplos de configuración de impresoras 3D de tipo cartesiano	72

Figura 3.6- Propuestas de disposición geométrica para el sistema de modificación de mallas para hernia abdominal	73
Figura 3.7- Diagrama de interacción del sistema para modificación de mallas quirúrgicas	75
Figura 3.8- Primer boceto de elemento de sujeción para el sistema de modificación de mallas quirúrgicas	80
Figura 3.9- Muestras de mallas quirúrgicas para reparación de hernias con distintos tamaños de poro	81
Figura 3.10- Prueba de puntos para tensión con modelos de cartón	81
Figura 3.11- Modelo de cartón con puntos para tensión. Muestra de 15cm x 15cm, con malla de poro de 2mm	82
Figura 3.12- Propuestas de configuración del elemento de sujeción	82
Figura 3.13- Propuestas de configuración para el módulo de sujeción con respecto al módulo de desplazamiento	83
Figura 3.14- Interacción de fuerzas en etapa de retirada en el proceso de recubrimiento por inmersión	85
Figura 3.15- Relación de velocidad de retirada vs. espesor de capa	87
Figura 3.16- Tipos de rosca en husillos	88
Figura 3.17- Elementos del mecanismo de desplazamiento tornillo-tuerca	89
Figura 3.18- Tipos de montaje para el mecanismo husillo-tuerca y sus factores de corrección	90
Figura 3.19- a) Acople flexible de aluminio, para unión del motor al husillo; b) rodamiento lineal, para el ajuste del elemento móvil a los ejes guía.	91
Figura 3.20- Motor paso a paso NEMA 17	92
Figura 3.21- Propuestas de configuración del sistema de desplazamiento	94
Figura 3.22- Propuestas de configuración del módulo de recubrimiento	96
Figura 3.23- Tarjeta de desarrollo Arduino UNO	97
Figura 3.24- Propuestas de configuración del módulo de procesamiento, junto con el elemento de despliegue de información y el controlador del motor	98
Figura 3.25- Ejemplos de sensores de fin de carrera	99
Figura 3.26- Interruptor de fin de carrera	100
Figura 3.27- Propuestas de configuración del módulo de sensores	101
Figura 3.28- Dispositivo de pantalla de cristal líquido	102
Figura 3.29- Driver A4988 para controlar motor a pasos	104
Figura 3.30- Fuente de poder	104

Figura 3.31 – Propuestas de configuración módulo de estructura	106
Capítulo IV- Modelos del sistema	109
Figura 4.1- Ejemplo de modelado 3D de una pieza especializada del sistema	113
Figura 4.2- Modelo tridimensional (CAD) del sistema con la pinza para malla de a) 7.5 cm x7.5 cm y b) 15 cm x 15 cm	114
Figura 4.3- Representación fotorrealista (render) del sistema	114
Figura 4.4- Explosivo de la estructura del sistema	115
Figura 4.5- Explosivo del módulo de procesamiento	115
Figura 4.6- Explosivo del sistema (sin módulo de procesamiento ni estructura)	116
Figura 4.7 Visualización previa del proceso de manufactura aditiva de a) el soporte para pinzas de sujeción y b) parte superior de la pinza para malla de 7.5 cm	117
Figura 4.8- Visualización previa del proceso de manufactura aditiva de la parte superior de la pinza de sujeción para malla de 15 cm, con reposicionamiento de la pieza .	118
Figura 4.9- Dibujo esquemático del modelo para a) generación de capa sobre el sustrato y b) sistema de desplazamiento, para el sistema de modificación de mallas para hernia	120
Figura 4.10- Hoja de datos generada para la evaluación del modelo matemático del sistema	126
Figura 4.11- Valores de desplazamiento del husillo, velocidad máxima y carga máxima permitidas, obtenidas por medio del modelo matemático generado	127
Figura 4.12- Resultados obtenidos por medio del modelo correspondientes a las velocidades de desplazamiento de a) 1.5, b)10 c) 80, d) 250, e) 1200 y f) 9000, todas en mm/min	128

Introducción

La patología herniaria de la pared abdominal, que consiste en la generación de una ruptura en la continuidad de las estructuras musculares, permitiendo la salida del tejido visceral; representa un serio problema de salud pública, tanto a nivel nacional como mundial, afectando del 10% - 15% de la población general.

En la actualidad, la hernioplastia o reparación de hernia por empleo de una malla o material protésico para el refuerzo de la pared abdominal es el método predominante para su atención. Este método ha probado disminuir la recurrencia de las hernias de un 44-55% que se generaba con las técnicas a tensión, a sólo del 3 al 10%.

A pesar de que la aplicación de una malla quirúrgica, que se entiende como un elemento protésico de material sintético o natural, empleado en la reparación de hernias presenta grandes ventajas, aún no se cuenta con una malla que presente el comportamiento ideal.

En la mayoría de instituciones públicas de atención médica de nuestro país, como es el caso del Hospital General Dr. Manuel Gea González ubicado en la Ciudad de México, donde los pacientes deben adquirir el material para la reparación de la hernia, las mallas empleadas para esta intervención, son aquellas que resultan menos costosas, fabricadas principalmente de polipropileno y que no pueden ser colocadas en la posición ideal: intraperitoneal.

Se identificó la necesidad de buscar una solución que permita contar con una malla compuesta o combinada, bifásica, que permita tanto la integración con la pared abdominal, como la no adherencia en una de sus caras, de manera que pueda ser colocada en contacto con la región visceral. Lo anterior debido a que, a pesar de que existen materiales de este tipo, su elevado costo y dificultad de adquisición los mantienen fuera del alcance de la mayoría de los pacientes atendidos en México.

En la primera sección del presente trabajo de investigación, se integra una revisión bibliográfica que abarca las generalidades de las mallas quirúrgicas para hernioplastia: los tipos existentes, sus diferentes categorías de clasificación y una comparativa entre algunos modelos existentes en el mercado, así como los materiales y procesos empleados para su fabricación y modificación.

De igual manera, se identifican los principales problemas derivados de la implantación de mallas en la reparación de hernias abdominales, así como las características y parámetros que afectan en el diseño

y modificación de las mismas. Además, se revisan los diferentes tipos de materiales empleados para evitar adhesiones.

A partir de la necesidad identificada, se plantea como posible solución la generación de un sistema capaz de modificar las mallas comerciales existentes, para brindarles las características deseadas con el fin de lograr su colocación intraperitoneal. Asimismo, se establece como objetivo simultáneo en el desarrollo de este proyecto, la selección y aplicación de una metodología de diseño, para garantizar el seguimiento de los requerimientos y especificaciones a lo largo de la generación de la propuesta de solución.

En el segundo capítulo se presenta la etapa de Diseño Conceptual del sistema, iniciando con la presentación de la metodología de diseño a emplear en el proyecto. Posteriormente describe el desarrollo de la investigación correspondiente al diseño conceptual del sistema para modificación de mallas para hernioplastia.

En esta sección de la investigación, se identifica la falta de productos en el mercado o referencias en la literatura respecto a sistemas o dispositivos que puedan llevar a cabo la modificación de las mallas existentes, reforzando el objetivo del proyecto. Asimismo, se realiza la selección del método a emplear para el recubrimiento de las mallas, la descripción y descomposición funcional del sistema y la generación de propuestas de solución para las funciones principales; culminando con el planteamiento del concepto a desarrollar.

La sección de Materialización del concepto, desarrollada en el tercer capítulo, presenta la descripción completa de las características correspondientes a los módulos o subsistemas que lo componen, así como los elementos necesarios para la materialización del concepto propuesto.

Se presenta también la identificación de las interacciones principales entre los módulos, así como la propuesta de diferentes disposiciones geométricas, tanto por módulo, como del sistema en general.

Posteriormente, en el cuarto capítulo, se presenta la generación de los modelos del sistema. Se plantean dos modelos de tipo analítico para la evaluación de la factibilidad del sistema, empleando las ecuaciones del modelo matemático planteado por Landau- Levich, así como otras formulaciones correspondientes a los fenómenos de la física asociados al funcionamiento del sistema, para la estimación del espesor de capa generado, en función de la velocidad de desplazamiento.

Además, se presenta un tridimensional del sistema, el cual se generó empleando las características dimensionales de los elementos y disposición seleccionada que se describen en el tercer capítulo, a través del modelado digital de todos los componentes, ensamblados con el fin de detectar interferencias geométricas. El modelo tridimensional desarrollado cumple también con la función de representar claramente la apariencia y características de forma y ensamble el sistema propuesto.

Finalmente, en el quinto capítulo, se presentan las conclusiones del trabajo completado junto con el planteamiento de las actividades a realizar en el trabajo futuro, con el fin de resumir el trabajo de investigación realizado, que culmina con la propuesta conceptual del sistema para modificación de mallas para hernia abdominal, pero presenta las rutas a seguir para culminar con la búsqueda de solución al complejo problema planteado en un inicio.

Objetivos y alcance

Objetivo general:

Diseñar un sistema capaz de modificar las superficies de las mallas quirúrgicas empleadas en la reparación de hernias abdominales, con el fin de adecuar sus propiedades de adherencia con respecto al tejido de contacto.

Alcances u objetivos específicos:

Recopilación de información y revisión correspondiente a la reparación de hernias abdominales, los materiales y procesos empleados para su reparación (mallas quirúrgicas), así como las características de fabricación y modificación de éstas.

Identificación de los principales problemas derivados de la implantación de mallas en la reparación de hernias abdominales.

Identificación de las características y establecimiento de los parámetros involucrados en los procesos para la modificación de las mallas quirúrgicas.

Selección de una metodología de diseño para el seguimiento de los requerimientos a lo largo del desarrollo de una solución a la problemática identificada.

Propuesta de diseño de un sistema capaz de llevar a cabo la modificación de las mallas.

I. Antecedentes y Marco Teórico

1.1. Justificación

La patología herniaria de la pared abdominal representa un serio problema de salud pública, tanto nacional como mundial, afectando del 10 al 15% de la población general. De acuerdo con el reporte elaborado por el SINAIS (Sistema Nacional de Información en Salud) en el 2008, esta patología genera una alta repercusión en el desempeño social y laboral, ya que afecta hasta al 25% de la población económicamente activa (30-59 años) [1].

Asimismo, debido a la frecuencia de su incidencia y recurrencia, además de las complicaciones derivadas de la presencia de hernias, como la incarceration y estrangulación, que producen un 20% de mortalidad asociada a este padecimiento, hacen indispensable la operación de las hernias en cuanto son diagnosticadas.

Lo anterior coloca a la reparación de hernias entre los procedimientos más comúnmente practicados en el mundo. En México, representa la segunda causa de consulta en cirugía general, practicándose un aproximado de 400,000 operaciones de hernia al año [3], mientras que en los E.E. U.U. se estiman más de 200,000 reparaciones de hernia al año [13].

En la actualidad, los métodos tensionantes de reparación de hernias (sutura directa) han quedado prácticamente en desuso, siendo la hernioplastia (reparación de hernia por empleo de una malla o material protésico para el refuerzo de la pared) el método predominante, ya que se identificó una gran disminución en la recurrencia de las hernias, del 44 al 55% generado con técnicas a tensión, contra el 3 al 10% con reparación sin tensión [1].

Sin embargo, aún existen distintos fenómenos que pueden causar fallas en la hernioplastia. Algunos de los principales problemas derivados de este procedimiento son el desplazamiento de las mallas, la generación de las adherencias del tejido visceral y la infección generada por la proliferación de bacterias y respuesta natural a cuerpos ajenos o cuerpo extraño, entre otras [16]. Existe evidencia que indica relaciones directas entre las complicaciones mencionadas y el diseño de las mallas, por lo que se hace evidente la necesidad del énfasis que la investigación y el diseño desde la perspectiva de la Ingeniería [5] ya que, hoy en día, aún no se cuenta con una malla ideal para cada cirugía.

Aunado a la gran importancia social que conlleva el desarrollo, mejora e implementación de las mallas existentes, se debe considerar el amplio campo que existe para la investigación y desarrollo tecnológico involucrado con la patología herniaria, que refleja las necesidades de un mercado global de dispositivos y consumibles, cuyo valor estimado para el año 2020 es de aproximadamente \$6.1 miles de millones de dólares [12].

Problemática en México: caso del Hospital General Dr. Manuel Gea González

El Hospital General Dr. Manuel Gea González, es una dependencia médica del gobierno, encargada de brindar servicios de salud de calidad, atendiendo principalmente a pacientes que no sean derechohabientes de instituciones como el IMSS, ISSSTE, PEMEX o la SEDENA, incluyendo a las personas incorporadas al Seguro Popular (aproximadamente 48% de la población nacional), así como a pacientes de bajos recursos económicos y carentes de seguridad social.

Como se mencionó anteriormente, uno de los procedimientos más practicados dentro del país, y, por tanto, en esta institución, es la hernioplastia, siendo uno de sus principales actores el ex director del hospital y especialista en Cirugía General, Endoscopía y Laparoscopía, el doctor Mucio Moreno Portillo.

Es precisamente a partir de una solicitud presentada por el doctor Mucio Moreno, dentro del marco de las actividades de colaboración entre el Hospital General Dr. Manuel Gea González y la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a través del Departamento de Ingeniería en Sistemas Biomédicos, que surge la propuesta del presente proyecto.

De acuerdo con lo mencionado por el doctor Mucio Moreno en una primera entrevista, el principal problema al que se enfrentan al realizar una hernioplastia, es que la malla sea aceptada por el organismo, es decir, que la reacción de cuerpo extraño detonada por los mecanismos de defensa ante la presencia de cualquier material ajeno sea mínima. Lo anterior afecta a todo el procedimiento, ya que dependiendo del tipo de malla e intensidad de reacción que ésta provoque, tanto el tiempo de colocación como el nivel de complejidad técnica, y por consecuencia la recuperación, serán mayores o menores.

En la cavidad abdominal se encuentra el tejido celular subcutáneo, seguido del tejido muscular, cubierto por el tejido fuerte de la aponeurosis. Es precisamente en la aponeurosis dónde se detectan y corrigen los defectos, que son causados por una debilidad o falla de la misma, y que son reparados por medio de la fijación del material protésico a su duro tejido. Entre la aponeurosis y los intestinos se

encuentre el peritoneo, una capa milimétrica de gran importancia, pues separa las vísceras de la pared abdominal.

Si la malla es colocada entre el peritoneo y el músculo, no existe mayor reacción a cuerpo extraño y la integración se lleva a cabo con un mínimo de complicaciones, sin embargo, si la malla se coloca dentro del peritoneo, las vísceras la secuestran y llegan a absorber, formando un proceso cicatricial muy severo y eventualmente la oclusión del intestino del paciente.

La problemática anteriormente descrita se presentó en algunos pacientes de los primeros casos donde se realizaron implantes de malla, resultando en la oclusión del intestino, reintervención del paciente, y remoción de la sección de intestino dañada; propiciando también cambios en la técnica de sutura para garantizar que el peritoneo quede completamente cerrado.

Debido a ello es que, como comenta el doctor Mucio Moreno, en el Hospital Gea González actualmente se realizan de manera extraperitoneal casi todas las intervenciones de hernioplastia, siguiendo un proceso que consiste en retirar la capa del peritoneo, colocar la malla y sujetarla a la pared abdominal, cerrando nuevamente el peritoneo para finalizar.

Dicho procedimiento implica tres veces más el tiempo quirúrgico que si se realizara una implantación directa de la malla de manera intraperitoneal, evitando la disección de tejidos (peritoneo) y la posible lesión de vasos y nervios, entre otras condiciones que ralentizan e incrementan la complejidad técnica de la hernioplastia cuando se realiza extraperitonealmente.

Sin embargo, existen casos en los que, ya sea por el tamaño del defecto o por casos de catástrofe abdominal (pancreatitis y otros casos de múltiples intervenciones) que han debilitado o eliminado la presencia del peritoneo, no se puede emplear la técnica extraperitoneal. Es únicamente en este tipo de casos, que representan menos del 3% de los casos atendidos, en los que se llegan a emplear las mallas comercialmente disponibles que están diseñadas para su aplicación intraperitoneal (mallas compuestas), cuyo costo llega a exceder incluso el precio de la cirugía.

Con base en todo lo anterior es que surge la propuesta de buscar una forma de modificar las mallas económicas, empleadas para la reparación extraperitoneal, de manera que se garantice que la cara que queda en contacto con las vísceras no sea detectada (no inicie reacción a cuerpo extraño y proceso de inflamación) y por lo tanto no genere adhesiones, para poder ser colocada de manera ambulatoria e intraperitoneal, reduciendo la complejidad técnica y el tiempo de cirugía.

Este proyecto busca encontrar el material o materiales adecuados, así como la forma (procedimiento y/o maquinaria) para modificar dichas mallas de manera confiable.

1.2. Mallas para hernioplastia

Se define a la hernia de pared abdominal como un defecto o ruptura en la continuidad de las estructuras de la pared abdominal que permite la salida o protrusión de peritoneo o tejido cicatricial, acompañado o no de vísceras abdominales, a través de una zona u orificio de la pared abdominal debilitada quirúrgica o traumáticamente [1]. Por orden de frecuencia y localización anatómica o topográfica se identifican los siguientes tipos de hernias: inguinal, umbilical, incisional (en sitios de cicatrices quirúrgicas), femoral, epigástrica, para-media, lumbar, subcostal, Spiegel (músculos abdominales en la zona intestinal), y piso pélvico.

A su vez, las mallas quirúrgicas son elementos protésicos de material aloplástico (de naturaleza inerte, destinado a su implantación dentro del organismo), sintéticos o naturales, empelados para la reparación de las hernias, con la finalidad de reforzar o suplir los defectos parietales, reestablecer la continuidad de los planos músculo-aponeuróticos y mejorar la función de la pared abdominal [5].

El empleo de mallas para la reparación de hernias ha permitido reducir las recidivas a menos del 10%, debido a que proporciona soporte a la pared abdominal, disminuyendo la tensión sobre el área del defecto, además de que proporciona una matriz para fomentar la formación de tejido conjuntivo, a través del incremento de fibroblastos y angiogénesis (generación de vasos sanguíneos nuevos a partir de vasos existentes), con la finalidad de reforzar el tejido dañado [1].

La respuesta tisular ante la presencia de una malla, que afecta la calidad de vida del paciente después de la cirugía, depende de la interacción entre las características del paciente (sistema inmunológico y estado nutricional, principalmente), y las características de la malla implantada.

Aunque se han realizado grandes avances en el desarrollo de mallas para hernia, hoy en día sigue sin existir una malla capaz de funcionar eficientemente en cada uno de los casos.

No obstante, existen algunas características en términos generales que todas las mallas deben poseer, como propiedades mecánicas adecuadas para la estabilización de la pared abdominal, maniobrabilidad

adecuada para su implantación, fomento de respuesta de huésped deseable e integración con el tejido circundante [15].

De manera más específica, se ha identificado que, para obtener o acercarse a la malla ideal, las características que ésta debe poseer se enlistan a continuación:

- No carcinogénica.
- Impermeable a fluidos corporales.
- Biológicamente compatible.
- De bajo costo.
- No desencadena reacción de cuerpo extraño o inflamatoria (químicamente inerte).
- Alta fuerza tensil (resistente a infecciones y esfuerzos mecánicos).
- Permanecer elástica (manteniendo flexibilidad de tejidos) una vez implantada.
- Esterilizable (resistente a altas temperaturas).
- No causa alergia o hipersensibilidad.
- Rápidamente infiltrado por tejido conectivo (respuesta del huésped).
- Evita o contribuye de manera mínima a formación de adhesiones indeseadas.

1.2.1. Propiedades de las mallas

Para generar mallas que cumplan con las características anteriormente mencionadas, es necesario entender y tomar en cuenta ciertos parámetros de diseño y construcción de estas. En este apartado se mencionan las principales propiedades empleadas para la evaluación y clasificación de la mayoría de las mallas comerciales [6].

1. Fuerza tensil y elasticidad

Se entiende como fuerza tensil el valor de máxima tensión que un material sujeto a una carga de estiramiento puede resistir sin romperse o romperse [7].

Con la finalidad de diseñar una malla eficiente para la reparación de hernias, se debe considerar la capacidad del material protésico para imitar la naturaleza biomecánica de la estructura de la pared abdominal, formada por músculos con forma laminar y fibras tendinosas orientadas en distintas direcciones. Asimismo, debe resistir las máximas presiones y fuerzas de tensión a las que se encuentra

sometida la pared abdominal. De acuerdo con la literatura, las máximas presiones intraabdominales registradas en adultos saludables, con un valor estimado de 170 mmHg, ocurren durante el salto y el tosido. Actualmente, todas las mallas en el mercado, incluyendo las más ligeras, tienen la capacidad de soportar más de lo requerido [8].

Con respecto a la elasticidad, el término hacer referencia a la propiedad que tiene un material por la cual cambia su forma y tamaño bajo la acción de fuerzas opuestas, recuperando su configuración original cuando se eliminan dichas fuerzas [7].

Las mallas para reparación de hernias deben considerar y buscar imitar la flexibilidad de la pared abdominal, que es de aproximadamente 38% (considerando una fuerza tensil de 32 N/cm), para evitar restricciones en la movilidad, que provocan molestias y dolor [15]. Las mallas de baja densidad tienen aproximadamente 20-35% de elasticidad (a 16 N/cm), mientras que las mallas de alta densidad tienen menos de la mitad de este valor (4-16% a 16 N/cm), resultando en restricciones en la distensión natural del abdomen.

2. Tamaño de poro

El tamaño de poro se refiere a la relación entre espacio abierto y espacio sólido con respecto al volumen, área o peso de la malla. Debido a que resulta directamente proporcional al grado de incorporación al tejido, así como a la reacción de este, es considerado como una de las propiedades más determinantes en el diseño de las mallas [17].

De acuerdo con la literatura, el tamaño de poro debe ser mayor a 75 μm , para permitir la infiltración de macrófagos, fibroblastos, vasos sanguíneos y colágeno, permitiendo el mayor crecimiento de tejido, conservando la flexibilidad y evitando la unión de granulomas.

No obstante, las mallas con tamaño de poro grande o macroporosas ($> 1 \text{ mm}$) presentan una desventaja fundamental que es el riesgo de adhesión a las vísceras internas, por lo que una malla ideal diseñada para su implantación en contacto tanto con la región parietal como la visceral, contendría una superficie macroporosa, para permitir el crecimiento de tejido del lado parietal, y una superficie microporosa, para evitar adherencias al estar en contacto con los órganos internos [15].

3. *Peso o densidad*

El peso de la malla depende del material y cantidad del mismo empleado en la fabricación de la malla. Es una propiedad asociada al tamaño del poro, pues este determina la cantidad de material empleado en la fabricación.

El conjunto de varias propiedades físicas como grosor, peso, resistencia máxima a la tracción y módulo de elasticidad definen la clasificación de las mallas como livianas, pesadas o de peso medio.

Las mallas de mayor densidad, usualmente formadas por fibras más gruesas, menor tamaño de poro, gran área superficial y alta resistencia a la tracción, están asociadas a reacciones tisulares y de cicatrización más densas y profundas, provocando disminución en la conformidad de la pared abdominal, dolor crónico, adherencias, contracción de la malla, entre otras.

Por otra parte, las mallas ligeras o livianas producen menor reacción inflamatoria y formación de fibrosis, al representar una menor cantidad de material extraño (menor reacción tisular negativa), conservando elasticidad y con menor reacción de encogimiento. Si bien poseen una menor fuerza tensil que las mallas de alta densidad, su resistencia mecánica es suficiente y logra soportar presiones mayores a la requerida [15].

4. *Contracción*

La contracción hace referencia a la reducción del área superficial de la malla, es decir, el encogimiento de la misma. Es una reacción producida por causa de la contracción del tejido de cicatrización alrededor de la misma y por la reacción de cuerpo extraño.

Aunque la contracción de la malla, que va del 5 al 28%, o hasta del 20 al 50% de su tamaño, se produce independientemente del tipo de malla, es un factor que, junto con su sino su capacidad de estiramiento anisótropo debe ser anticipado y tomado en cuenta para el diseño de la prótesis, así como su buen desempeño en la reparación de hernias [10].

Se ha observado mayor tasa de contracción en las mallas con naturaleza hidrofóbica, como aquellas fabricadas con politetrafluoroetileno expandido (PTFE-e), debido a la formación de cápsulas y contracción resultante del material, de manera que se sugiere el desarrollo de mallas hidrófilas para

minimizar dicha contracción. Asimismo, la literatura sugiere el uso de fijación por sutura permanente, para asegurar la cobertura y prevención de defectos, minimizando la contracción de la malla [10].

5. *Reactividad o Biocompatibilidad*

La reactividad o biocompatibilidad de la malla quirúrgica es una propiedad que se mide a través de las reacciones a cuerpo extraño y respuestas inflamatorias provocadas por la implantación del material protésico en el organismo huésped.

Ninguno de los biomateriales empleados actualmente para la fabricación de mallas (polipropileno, tereftalato de polietileno, politetrafluoroetileno) es completamente inerte en términos de biocompatibilidad, ya que todos producen efectos de reacción al cuerpo extraño, con resultados como inflamación, fibrosis, calcificación, trombosis, formación de granulomas, seromas y fístulas e infección, así como un retraso en la sustitución de colágeno tipo III por colágeno tipo I, necesario para la cicatrización normal y estable mecánicamente.

Aunque este tipo de reacciones es bastante uniforme, sin importar el tipo de material, la reacción depende de la cantidad de material, directamente asociado al tamaño de poro, así como a las propiedades fisicoquímicas en la superficie de la malla [15].

1.2.2. Clasificación de mallas

Las propiedades anteriormente mencionadas son tomadas como principales criterios en el diseño de mallas para la reparación de hernias. De acuerdo con la literatura, se puede clasificar las mallas que existen actualmente, con respecto a algunas de estas propiedades, así como otras características, de la manera que se muestra en la **Figura 1.1**.

Dicha clasificación se describe en esta sección.

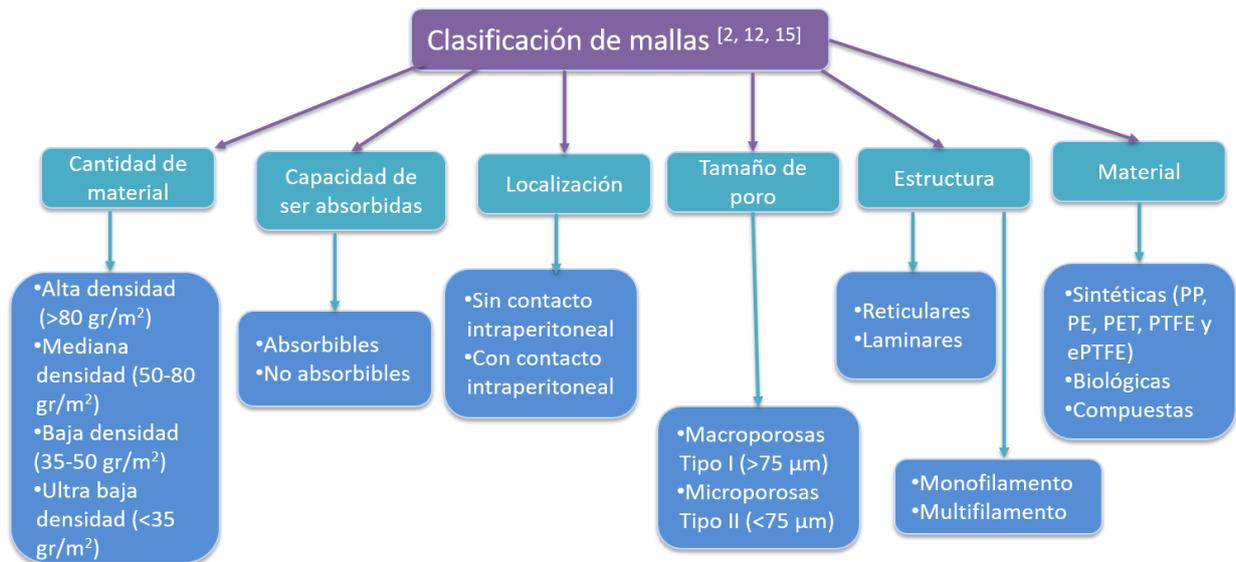


Figura 1.1- Clasificación de mallas quirúrgicas. Imagen creada por autora.

1. Clasificación por cantidad de material

De acuerdo con la cantidad de material, las mallas protésicas se pueden clasificar en:

- a) **De alta densidad o pesadas (>80 g/m²):** son el tipo de mallas más pesado, usualmente de polipropileno cristalizado, tienen poros pequeños y gran resistencia tensil.
- b) **Mediana densidad o de peso mediano (45-80 g/m²):** de menor peso que las de alta densidad, fabricadas principalmente de polipropileno convencional, generan menor reacción a cuerpo extraño por la disminución de material.
- c) **Baja densidad o ligeras (35-45 g/m²):** mallas con área superficial más pequeña (tamaño de poro grande, 3-5 mm), diseñadas para disminuir reacción de cuerpo extraño por menor cantidad de material implantado [11], tienen mejor desempeño al sufrir menor contracción, mayor elasticidad y flexibilidad, pero presentan complicaciones como recurrencia, infección y formación de adhesiones.
- d) **De muy baja densidad o ultraligeras (<35 g/m²):** mucha menor cantidad de material, por lo que genera menor reacción inflamatoria.

Clasificación de mallas por cantidad de material/peso

Alta densidad (pesadas)	>80 g/m ²
Mediana densidad (peso mediano)	45-80 g/m ²
Baja densidad (ligeras)	35-45 g/m ²
Muy baja densidad (ultraligeras)	<35 g/m ²

Tabla 1.3- Clasificación de mallas por cantidad de material. Modificado de [12, 15].

2. Clasificación por su capacidad de ser absorbidas

De acuerdo con la capacidad que tiene la malla de ser absorbida por el cuerpo huésped, se pueden clasificar en:

- a) **No absorbible:** el tipo de malla más utilizado cumple la función de reforzamiento y reemplazo de tejido en los defectos parietales sin ser absorbidas. Generan mayor respuesta a cuerpo extraño que las mallas parcial y totalmente absorbibles, además de que son asociadas a mayor riesgo de infección, formación de fístulas, dolor crónico, restricción de movimiento y, en algunos casos, obstaculizar el crecimiento normal del tejido [12].
- b) **Totalmente absorbibles:** como su nombre indica, van siendo absorbidas por el cuerpo hasta su completa desintegración. Este tipo de mallas minimiza la cantidad de material extraño que queda para el cuerpo, siendo capaces de aliviar el intenso cuerpo extraño y la respuesta inmune que se observa con mallas no absorbibles [12]. Sin embargo, al no poder controlar el tiempo en que son absorbidas, usualmente no cumplen la función de reforzamiento a largo plazo, lo que hace que sean menormente utilizadas.
- c) **Parcialmente absorbibles o mixtas:** mallas con una parte de material absorbible, usualmente una capa o recubrimiento, y otra de material permanente. Este tipo de mallas reduce la cantidad de material implantado a largo plazo, disminuyendo la reacción a cuerpo extraño, sin perder totalmente su función de reforzamiento, pues fomentan la generación de fibrosis en el sitio de reparación [17].

3. Clasificación por su localización (colocación)

La malla puede colocarse en distintos niveles de la pared abdominal, dependiendo de su ubicación con respecto al peritoneo y el defecto. De esta manera, existe una clasificación generalizada de las mallas respecto a su localización, siendo identificadas como mallas **con contacto visceral** (intraperitoneales)

o **sin contacto visceral** (extraperitoneales). Una clasificación más amplia se describe a continuación [1]:

- a) **Retro-muscular (*underlay* o *sublay*, en inglés):** Como su nombre indica, se coloca en la sección más posterior (interior) respecto a la pared muscular. Es la colocación que genera menor número de recidivas, debido a que aprovecha la presión intraabdominal para posicionarse firmemente. Puede colocarse en diferentes modalidades:
 - I. *Intraperitoneal:* se coloca por debajo del peritoneo, en contacto directo con los intestinos, ya sea por vía abierta o laparoscópica. Es más resistente a la dislocación de la malla, pero requiere uso de mallas separadoras de tejido (antiadherentes a vísceras).
 - II. *Pre-peritoneal retro-muscular:* Se coloca entre el peritoneo y la aponeurosis posterior; por vía abierta o laparoscópica, indistintamente. Requiere el cierre posterior de los tejidos que deban levantarse o recortarse para el acceso y colocación de la malla.
 - III. *Sub-aponeurótica pre-muscular:* La colocación de la malla se realiza por encima de los músculos, debajo de la aponeurosis anterior. La disección en este plano genera mayores sangrados y trauma que la región retro-muscular, por lo que es recomendable únicamente en casos donde el defecto herniario no sea muy grande y se involucre la línea media de músculos rectos, pues de lo contrario la malla no conserva su estabilidad.
- b) **Supra-aponeurótica o pre-aponeurótica (*onlay*):** Como indica su nombre, la colocación de la malla se realiza por encima de la aponeurótica anterior, siempre por vía abierta. Se debe colocar después de cerrar con tensión el defecto, el cual debe ser cerrado con suturas para generar efectividad parecida a la colocación pre-peritoneal. Debido a que involucra mayor disección de piel y tejido subcutáneo, favorece infecciones, así como generación de hematomas y seromas.
- c) **En/a los bordes del defecto (*inlay*):** Acorde a su nombre, la malla se coloca, siempre por vía abierta, a los bordes del defecto, suturándose directamente, sin cierre del mismo. El material colocado debe tener el tamaño justo del defecto. Genera un alto número de recidivas.
- d) **Mixta (*sándwich*):** Como el nombre lo indica, conlleva la colocación de más de un segmento de malla, en dos secciones distintas, por ejemplo, un segmento pre-peritoneal retro-muscular o intraperitoneal, y otro supra-aponeurótico.

4. Clasificación por tamaño de poro:

De acuerdo con el tamaño de poro, es decir, a la relación entre espacio abierto y espacio sólido con respecto al volumen, área o peso de la malla, éstas se pueden clasificar en [2]:

- a) **Macroporosas (Tipo I):** mallas con tamaño de poro mayor a 75 μm . Permiten el paso de macrófagos, fibroblastos, proliferación de vasos sanguíneos y fibras de colágena. Los materiales frecuentemente empleados son Polipropileno (PP) y Polietileno (PE).
- b) **Microporosas (Tipo II):** tamaño de poro menor a los 75 μm . Permiten el paso de bacterias, pero no de macrófagos, lo que aumenta riesgo de infección. Los materiales empleados para este tipo de malla son generalmente Politetrafluoroetileno (PTFE) y Poliéster (vieja generación).
- c) **Microporosas (Tipo III):** el tamaño de poro, al igual que las Tipo II, es menor los 75 μm , pero presentan propiedades antiadherentes en la cara visceral. Materiales comúnmente empleados son Poliuretano o Politetrafluoroetileno expandido (PTFE-e o e-PFTE)
- d) **Orgánicas (Tipo IV):** son mallas de matriz dérmica acelular, mucosa intestinal porcina, colágena dérmica porcina, pericardio bovino, entre otros, por lo que su tamaño de poro depende de las características del tejido de origen.

Otra manera de clasificar las mallas por tamaño de poro, de manera más específica, se muestra en la Tabla 2:

Clasificación de mallas por tamaño de poro	
Poro muy grande	>2000 μm (>2mm)
Poro grande	1000 – 2000 μm (1 - 2mm)
Poro mediano	600 – 1000 μm (0.6 - 1 mm)
Poro pequeño	100 – 600 μm (0.1 – 0.6 mm)
Microporo (hoja/lámina)	<100 μm (<1 mm)

Tabla 1.4- Clasificación de mallas por tamaño de poro. Modificado de [12].

5. Clasificación por su estructura y constitución (filamento):

De acuerdo con su estructura, es decir, al tipo de tejido o entramado empleado para su fabricación, las mallas se pueden clasificar en [15]:

- a) **Reticulares:** tienen una óptima integración tisular, ya que el anclaje con el tejido receptor es excelente. Asimismo, desde el punto de vista mecánico, se adapta mejor a las propiedades fisiológicas (tensiones anisotrópicas) de la pared abdominal. Sin embargo, tienen mayor propensión a generar adherencias cuando se colocan en contacto con las vísceras, por lo que deben ser colocadas siempre en una interfaz tejido-tejido.
- b) **Laminares:** su integración, de tipo celular, se lleva a cabo por encapsulación, de manera que la interfaz con el tejido receptor es débil, desde el punto de vista mecánico. Sin embargo, cuando el material se coloca en contacto con las vísceras, tienen mejor comportamiento antiadherente que las reticulares, además de que permiten el desarrollo de tejido peritoneal nuevo.

Las mallas se fabrican a partir de polímeros, en extrusión como un único filamento o un tejido de varios filamentos, de manera que pueden ser clasificadas es por su constitución o estructura de filamento en [15]:

- a) **Monofilamento:** formadas a partir de un solo filamento que se entreteje para generar la malla. Son resistentes a infección, tienen mayor permeabilidad molecular, flexibilidad y funcionalidad mecánica, que las mallas de muchos filamentos.
- b) **Multifilamento trenzado o parches:** como su nombre indica, consisten en varias fibras de polímero trenzadas para formar el filamento que genera la malla. Debido a los pequeños intersticios producidos entre las fibras, que pueden permitir el ingreso de bacterias, presentan mayor riesgo de infección, formación de granuloma y tracto sinusal, así como mayor respuesta inflamatoria.

6. *Clasificación por tipo de material:*

De acuerdo con el material con el que se fabrican, las mallas para hernia pueden clasificarse en [13]:

- a) **Sintéticas:** fabricadas a partir de polímeros sintéticos, pueden ser fabricadas en distintas formas y tamaños, proporcionan un soporte adecuado, y son de menor costo que las orgánicas. Sin embargo, su biocompatibilidad es menor, además de que presentan riesgo de infección y adhesión o erosión visceral, así como mayores efectos de encogimiento o contracción, que resulta en migración de la malla.

- b) **Biológicas:** son mallas fabricadas en diferentes patrones matriciales, partir de materiales base colágeno (de origen porcino, bovino y humano). Se comportan mejor en ambientes contaminados, presentan menor riesgo de adhesiones, seromas y necesidad de explantación (retiro) de la malla, sin embargo, su costo es considerablemente mayor al de las mallas sintéticas, además de que presentan problemas de disminución en la fuerza del material e incluso la degradación de la malla.
- c) **Compuestas o mixtas:** fabricadas a partir de un polímero sintético, son mallas que buscan disminuir las desventajas del comportamiento de estos materiales, a partir de la incorporación de recubrimientos como titanio, colágeno, omega-3, ácidos grasos, hialuronato, poliácido glótico, entre otros.

El tipo de materiales con los que se fabrican las mallas actualmente disponibles de manera comercial, así como sus características, se describen con mayor detalle en secciones posteriores.

1.2.3. Problemática derivada de la implantación de mallas abdominales

A pesar del progreso que se ha logrado en el diseño de materiales para la reparación de hernias, siguen existiendo grandes desafíos para lograr resultados óptimos. El limitar la aguda y crónica respuesta a cuerpo extraño respecto al material implantado, prevenir y controlar la generación de infecciones en el periodo post operatorio, incrementar el crecimiento interno del tejido y la vascularización, así como alcanzar las propiedades mecánicas fisiológicamente adecuadas y compatibles, son algunos de los principales ejemplos de estos desafíos.

El hecho de que la reparación de las hernias siga dependiendo de materiales no degradables (en su mayoría), materializados en parches o secciones de tamaños únicos (no modificables) y con una capacidad reducida o casi nula para evitar la respuesta al cuerpo extraño y estimular de forma activa la regeneración tisular, da como resultado una serie de complicaciones post operatorias, de entre las cuales, las más importantes o de mayor ocurrencia se enlistan a continuación.

1) Riesgo de infección

Se trata de un padecimiento asociado a factores de manejo inadecuado de la malla como exposición del material a entornos no asépticos, colocación inadecuada sobre compresas quirúrgicas que pueden propiciar la adherencia de filamentos de algodón u otros materiales que favorezcan la reacción

inmunológica; el uso de mallas re-esterilizadas de modo inadecuado; el contacto de la malla con la piel del paciente durante su colocación [1].

Este padecimiento se presenta con mayor frecuencia en campos inicialmente infectados, como operaciones de hernia paraestomal. Sin embargo, es muy temida ya que su manifestación puede ser aparente hasta varios años después de la implantación y casi siempre conlleva la explantación (remoción) de la malla para su erradicación [8].

Con respecto a la relación entre las características físicas o mecánicas de la malla y el riesgo de infección, se ha observado que se determina principalmente por el tipo de filamento y el tamaño de poro con el que está fabricado el material protésico, siendo las malas microporosas y multifilamento, las más propensas a favorecer la infección, ya que la presencia de poros de tamaño menor a 10 μm permite el paso de bacterias, pero no de macrófagos y neutrófilos que puedan eliminarlas. Las mallas macroporosas, principalmente aquellas fabricadas con monofilamento de polipropileno y tamaño de poro mayor a 75 μm , son las que resultan más resistentes ante el riesgo de infección [8].

2) *Recurrencia*

La recurrencia se refiere a la reaparición de la hernia o la formación de nuevas hernias, cercanas a la zona de defecto que fue reparada. Si bien el uso de las mallas reduce la recurrencia de las hernias, existen algunos factores del paciente (presión intraabdominal elevada, mala calidad de tejidos, etc.) y técnicos (infección en sitio quirúrgico, fijación inadecuada o colocación incorrecta, tamaño de hernia, falla en la detección de otra hernia, etc.), que se han identificado como los principales causantes de recurrencia de hernia en los bordes de las mallas [1].

3) *Dolor*

Aunque el dolor es un padecimiento inherente de cualquier intervención quirúrgica como resultado de la disección y generación de heridas, y por consecuencia cicatrización, se han reportado casos de incremento o disminución del dolor postoperatorio asociados a la implantación de mallas, principalmente en relación con la característica de elasticidad o encogimiento de estas, mencionado anteriormente. Si bien se ha reportado poca diferencia entre el dolor postoperatorio agudo y el tipo de malla empleado, las mallas macroporosas y mallas absorbibles presentan reducciones en el dolor crónico, debido a su mayor flexibilidad y disminución de cantidad de material extraño (y por tanto reacción inflamatoria ante éste) [1].

4) *Degradación de la malla*

La degradación de la malla, como dice su nombre, hace referencia a la disminución en la calidad del material, resultando en la fragilidad y pérdida de resistencia mecánica y, por tanto, su funcionalidad como material de soporte para la pared abdominal. Puede ocurrir debido a procesos como hidrólisis o calcificación. Aunque es un padecimiento no muy frecuente, se asocia al tipo de material con que son fabricadas las mallas, siendo aquellas de poliéster o tejido biológico las que presentan mayor riesgo de degradación [1].

5) *Formación de seromas*

Un seroma es una acumulación de líquido, llamado suero, debajo de la superficie de la piel, que se desarrolla de inmediato o incluso semanas después de un procedimiento quirúrgico, en la zona de incisión. Es la más frecuente de las complicaciones, presentándose en un 5-20% de los casos, y su aparición se incrementa después de procedimientos extensos, donde se rompe gran cantidad de tejido, en casos donde el defecto tiene un tamaño mayor a los 6 cm, cuando se deja mucha superficie de contacto entre la malla implantada y el tejido celular subcutáneo (mallas supra-aponeuróticas u *onlay*) y cuando se ocupan mallas microporosas laminares, siendo menor el riesgo con mallas macroporosas [5].

6) *Desplazamiento de la malla*

Se entiende por desplazamiento de la malla a cualquier cambio de ésta respecto al centro (lugar del defecto) donde fue colocada. Este padecimiento no es raro, puede ocasionar una reducción en la superposición de la malla y la pared, disminuyendo la acción reparadora y favoreciendo la recidiva (recurrencia). Si bien no se ha encontrado una relación directa entre las características de la malla y el grado de riesgo de desplazamiento de la misma, algunos factores como fijación deficiente (causado por errores técnicos o falta de superficie para superposición), así como la contracción de la malla, han sido identificados como los principales causantes de esta complicación. Debido a lo anterior, entre las posibles soluciones se incluyen el incremento del área de superposición de la malla con el tejido y algunas mejoras en los puntos y elementos de unión, entre otros [14].

7) *Riesgo de adhesión*

La adhesión es causada por el exudado de fibrina (proteína que posee propiedades adhesivas) involucrada en la respuesta inmunológica para la cicatrización ante cualquier tipo de trauma, y cuya absorción se ve retardada en la presencia de inflamación o cuerpos extraños como las mallas [1, 19].

El riesgo de adhesión se presenta en los casos en los que se coloca la malla en contacto con las vísceras y ya que las adhesiones de fibrina pueden evolucionar en adhesiones tisulares, causando dolor crónico, formación de fístulas (unión anormal de tejidos), obstrucciones y perforaciones intestinales, así como la migración o desplazamiento de la malla [1,12,19].

La prevención del riesgo de adhesión se puede conseguir principalmente a través de la inhibición de la inflamación y proliferación de fibroblastos (células de tejido conectivo involucradas en la reparación de tejido dañado); evitando el contacto de la herida con otros tejidos, así como la deposición de fibrina; promoviendo su disolución y absorción. Las estrategias para la prevención de adhesiones, en general, considera dos tipos de métodos: aquellos con base en el tejido, que busca restringir los procesos de adhesión aliviando la inflamación y exudación de tejidos locales, limitando la deposición y coagulación de la fibrina y protegiendo la superficie de la herida ante la fricción, a través de métodos que suprimen la generación de fibroblastos, actuando directamente sobre los tejidos. Por otra parte, los métodos con base en los biomateriales hacen uso de las ventajas físicas y químicas de los materiales, de tal modo que actúen como barreras físicas y agentes bioactivos que disminuyan o supriman la formación de adhesión [19].

Si bien no existe realmente una malla que evite completamente la formación de adhesiones cuando se implanta en contacto con las vísceras, se ha identificado una asociación entre la extensión y magnitud del riesgo de formación de adhesiones, así como la regeneración del tejido dañado, con algunos parámetros del diseño y construcción de la malla, como el tamaño de poro, la estructura de filamento, el área superficial y el tipo de material [12].

De manera específica, se ha identificado que las mallas de estructura reticular, (generalmente fabricadas con polipropileno monofilamento) facilitan la aparición de adhesiones, atribuyéndole a la estructura reticular y a su efecto en la deposición de las células mesoteliales sobre esta, más que a la composición química del material, la influencia en la generación del padecimiento [15]. Por el contrario, las mallas microporosas, de estructura laminar (principalmente de PTFE-e) no permiten la proliferación de fibroblastos, evitando adhesiones, pero resultando también incapaces de integrarse de manera favorable a la pared abdominal, para llevar a cabo su función [15].

1.3. Estado del arte (mallas)

En la actualidad existen más de doscientos tipos de mallas quirúrgicas disponibles en el mercado, volviendo complicada la elección de la malla más adecuada, principalmente porque dicha selección se

lleva a cabo comúnmente tomando en consideración únicamente la experiencia de los cirujanos, las o recomendaciones de expertos o proveedores y los protocolos de compra (contratos con empresas o distribuidores) del hospital [13].

Debido a la importancia que tiene la elección del material sobre los efectos para favorecer el bienestar del paciente, a través de la búsqueda de reducir la cantidad total de material implantado, minimizar la reacción inflamatoria y conseguir una cicatriz menos rígida, más delgada y elástica, se consideró la observación del tipo de materiales empleados en la fabricación de mallas como el punto de comparación durante la investigación del estado del arte, que se describe a continuación.

1.3.1. Materiales para fabricación de mallas quirúrgicas

Toda sustancia o material, derivado de fuentes naturales o sintéticas, que es empleado para tratar, aumentar o reemplazar cualquier tejido, órgano o función corporal, es conocido como biomaterial [9].

El comportamiento adecuado de cualquier biomaterial o implante protésico, como es el caso de las mallas para reparación de hernias, depende principalmente de tres factores: sus propiedades (mecánicas, químicas y tribológicas); la condición de salud del receptor y habilidad del cirujano; y la biocompatibilidad del material [12]. Esto último se debe a la característica conocida de respuesta activada por el sistema inmune del huésped ante la introducción de cualquier material no nativo en el cuerpo (reacción de cuerpo extraño), de manera que cualquier material empleado en aplicaciones biomédicas debe acoplarse y funcionar de forma armónica con las células vivas sin provocar reacciones adversas [9,12].

De manera generalizada, los biomateriales empleados para implantes o prótesis se identifican como materiales sintéticos (absorbibles, no absorbibles, compuestos, recubiertos o impregnados) y materiales biológicos (xenoinjertos y aloinjertos). En esta sección se describen los principales materiales empleados en la fabricación de mallas para reparación de hernias.

1.3.1.1. Materiales sintéticos

En la actualidad existen una gran cantidad de polímeros empleados para aplicaciones médicas, entre los cuales se encuentran el polietileno (PE), poliuretano (PU), politetrafluoroetileno (PTFE), poliacetal (PA), polimetacrilato de metilo (PMMA), politereftalato de etileno (PET), caucho de silicona (SR), polisulfona (PS), polietereetercetona (PEEK), poliácido láctico (PLA) y poliácido glicólico (PGA), sin embargo, los materiales empleados en la actualidad para la fabricación de prótesis para hernia son el polipropileno (PP), el politetrafluoroetileno expandido (PTFE-e) y algunos poliésteres (PE) como el politereftalato de etileno (PET) [12,16].

Polipropileno

Este material se emplea para generar mallas de naturaleza sintética, no absorbibles, principalmente de bajo o mediano peso, monofilamento y macroporosas; con gran flexibilidad y mejor manejo, comparado con otras mallas no absorbibles. Asimismo, mantienen alta fuerza tensil, independiente del tamaño de poro [17], se asocian a menores riesgos de infección, encogimientos menores y disminución en las molestias postoperatorias. Por sus características, permiten la infiltración e integración del tejido del huésped en el implante, o lo que favorecen la adhesión al tejido a reparar. No obstante, esta misma característica representa una de sus principales debilidades, pues no puede ser empleada en contacto directo con los órganos y tejidos viscerales, siendo posible únicamente su colocación de forma extraperitoneal. Otras de las desventajas asociadas a estas mallas es que son susceptibles a oxidación y generación de seromas en la superficie de la malla [17].

Poliéster

Las mallas fabricadas con este material presentan tamaño de poro variable, siendo más plegables que las mallas de polipropileno u otros materiales, además de poder ser tanto maleables como rígidas. Son fabricadas empleando varios filamentos (multifilamento), por lo que son más propensas a las infecciones, además de tener otras desventajas como generar reacción a cuerpo extraño crónica y susceptibilidad ante la hidrólisis, por lo que se pueden llegar a degradar algunos meses después de ser implantadas. Si bien aún existen algunas marcas en el mercado que manejan este tipo de material, su uso es menos frecuente que el del polipropileno [12].

Politetrafluoroetileno expandido

El politetrafluoroetileno expandido, es una versión procesada del PTFE (comúnmente conocido como teflón), que contiene una estructura porosa fibrosa continua y altamente uniforme con mejoras en la resistencia mecánica.

Las mallas fabricadas con PTFE-e son no absorbibles, microporosas e impermeables, que presentan menor respuesta inflamatoria y de reacción crónicas. Su principal ventaja es que no se adhiere a los tejidos circundantes, por lo que puede ser aplicada de forma intraperitoneal, sin embargo, no refuerza la pared abdominal directamente ya que no promueve el crecimiento del tejido parietal del huésped, por lo que no genera adhesión con el mismo. Otra de sus desventajas es que, al poseer poros muy pequeños, no permite el paso de macrófagos, teniendo gran propensión a las infecciones [12].

La Tabla 3. enlista algunos de los productos disponibles en el mercado, fabricados con los materiales anteriores, enlistando sus características generales y un precio aproximado¹.

1.3.1.2. Materiales biológicos

Las mallas generadas con material biológico, también conocidas como bioprótesis, son fabricadas con productos de origen natural, principalmente derivados de colágeno, que tienen como objetivo generar la reparación del tejido a través de la regeneración, más que la cicatrización, actuando como andamios activos que permitan el acomodamiento de células nativas en el proceso de remodelación. Se pueden clasificar de acuerdo a su origen como xenógenos o de origen animal, y autógenos o de origen humano. Algunos ejemplos hallados en la literatura son los tejidos acelulares de submucosa dérmica y del intestino delgado, matrices acelulares de vejiga, submucosa vesical porcina, y otros materiales como proteoglicano, elastina y hialuronano, entre otros [1, 15].

¹ Precios estimados a la fecha de realización de esta investigación: julio 2018.

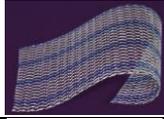
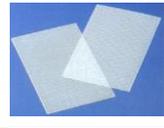
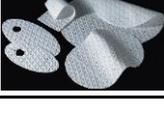
Material	Producto	Características	Imagen	Precio aproximado
Polipropileno (PP)	Prolene (Ethicon)	Poros: 0.8-1.6 mm; Peso: 105-108 g/cm ² ; Monofilamento.		30,76 - 151,85 USD (584,14 - 2884,08 MXN)
	Parietene (Covidien)	Poros: 1.0-1.6 mm; Peso: 75 g/cm ² ; Monofilamento.		99,67 - 133,28 USD (1893,04 - 2531,31 MXN)
	Surgipro (Covidien)	Poros: 0.8 mm; Peso: 110 g/cm ² ; Monofilamento + multifilamento.		64.30 - 124,38 USD (1221,25 - 2362,36 MXN)
	Optilene (B-Braun)	Poros: 1.0 mm; Peso: 36-48 g/cm ² ; Monofilamento.		120,79 USD (2294,18 MXN)
Poli (terefetalato de etilo) (PET)	Mersilene (Ethicon)	Poros: 1.0 mm; Peso: 33-40 g/cm ² ; Multifilamento.		35 - 210 USD (664,76 - 3988,55 MXN)
	Perietex (Covidien)	Poros: 1.0-1.6 mm; Peso: 38 g/cm ² ; Multifilamento.		407,34 - 1247,93 USD (7736,65 - 23702,06 MXN)
Poli (tetrafluoro etileno) (PTFE)	DualMesh (Gore)	Poros: 0.003/0,022 µm; Peso: 110 g/cm ² ; Lámina.		19 - 102,5 USD (360,87 - 1946,79 MXN)
	MycroMesh (Gore)	Poros: 0,025/0,3 mm; Peso: 95 g/cm ² ; Lámina con perforaciones de 2 mm.		100 - 200 USD (1899,31 - 3798,62 MXN)

Tabla 1.5.- Ejemplos de mallas no absorbibles fabricadas con materiales sintéticos, disponibles en el mercado.

Entre las principales ventajas de los materiales biológicos en su aplicación como prótesis para hernia se encuentra la mínima reacción a cuerpo extraño, que conlleva menores riesgos de infección crónica y erosión de piel y vísceras, además de que pueden colocarse en contacto con las vísceras pues generan adherencias menores y su aplicación es posible en casos en que no exista suficiente superficie cutánea para cerrar la herida. Sin embargo, presentan dos principales desventajas: su elevado costo, ya que el costo de las mallas biológicas puede ser hasta diez veces mayor al de las mallas sintéticas; y la falta de estudios clínicos a largo plazo que respalden su eficiencia [15].

1.3.2. Materiales empleados para evitar adhesión

La aplicación de recubrimientos con materiales biológicos (e.g. colágeno, quitosano, fibroína de seda, fibrina y células madre [6,18] y factores de crecimiento [2]) para la reducción de respuesta inflamatoria y facilitar la aceleración del proceso de regeneración; así como la adición de medicamentos antiinflamatorios [6], antibacteriales [14], y otros materiales para prevenir adhesiones viscerales [13], ha sido también centro de atención en la investigación del diseño de mallas.

Algunos materiales que se han estudiado con la finalidad de evitar adhesiones indeseadas entre los implantes y el tejido nativo se mencionan a continuación, clasificándose de acuerdo a su origen.

Materiales de origen natural

- 1) **Ácido Hialurónico (AH):** son polisacáridos hidrofílicos no específicos, de estructura lineal que, en arreglos matriciales de alto peso molecular ($>1 \times 10^6$ Da), proveen microestructuras tridimensionales que favorecen al adhesión celular y proliferación para la regeneración, a la vez que funcionan como una barrera física para las adhesiones no deseadas. Lo anterior tiene origen en la carga negativa intrínseca del AH, que disminuye el sangrado e inhibe la proliferación, migración y deposición de los fibroblastos, causantes de las adhesiones entre tejidos. Aunque este material presenta características altamente prometedoras en cuanto a su aplicación para evitar adhesiones, los resultados de estudios in vivo presentan falta de resistencia, necesaria para su aplicación posterior, por lo que trabajos para la funcionalización y composición del AH permanecen pendientes [19].
- 2) **Quitosano:** es una glucosamina, producto de la desacetilación de la quitina (principal componente del exoesqueleto de los crustáceos). El quitosano presenta biocompatibilidad y bioactividad considerables, además de reducir la adhesión al suprimir la proliferación de fibroblastos. En la literatura se presentan resultados respecto a la aplicación de hidrogeles fabricados con quitosano, composiciones de quitosano y dextrano, quitosano carboximetilado (estructura molecular similar al AH); que refuerzan la expansión del uso del quitosano en aplicaciones para evitar adhesiones, considerando su preparación y funcionalización [19].
- 3) **Trehalosa:** es un disacárido de estructura rígida, cuyos monómeros se conectan a través de enlaces glucosídicos, dotándolo de propiedades fisicoquímicas únicas, que lo adecúan para proteger la integridad de las células mesoteliales además de evitar la adhesión. Si bien ha sido estudiada menos que los elementos anteriormente mencionados, se han realizado algunas pruebas que mostraron la reducción de adhesiones intestinales, por lo que la Trehalosa

presenta gran potencial como estrategia para evitar la adhesión cuando se combina con barreras físicas [19].

- 4) **Pululano:** es un polisacárido con estructura compleja y ramificada (similar a la del dextrano y la goma xantana), que posee gran capacidad para estirarse y solubilidad en agua, requerimientos mínimos para funcionar como barrera física entre el tejido en reparación y otros tejidos. Además, su biodegradabilidad elimina la necesidad de volver a operar para retirar la barrera, una vez se ha llevado a cabo la reparación. En la literatura se registran resultados de pruebas *in vivo* mostrando las fuertes propiedades anti-adhesión de una versión inyectable de pululano funcionalizado, en una reacción con peroxidasa de rábano picante (*horseradish* en inglés), además de experimentos *in vitro* que respaldan el posible empleo de este material en aplicaciones que requieran evitar adhesiones [19].
- 5) **Fosfolípidos:** Son componentes principales de las membranas biológicas y componentes naturales del abdomen, que tienen terminaciones hidrofílicas con nitrógeno o fósforo, y una cadena de hidrocarburo hidrofóbica. Dichas características le brindan la capacidad de reducir la tensión superficial y la hidrofobicidad de la membrana, al producir una barrera líquida que separa las distintas superficies, reduciendo la adhesión, ya que restringe la generación de fibrosis por parte de las células mesoteliales, además de que ayuda a aliviar la inflamación [19].
- 6) **Gelatina:** Es un producto obtenido de la degradación del colágeno (principal proteína de origen animal), que posee tanto excelentes propiedades mecánicas, como biocompatibilidad. La gelatina presenta fuertes efectos adhesivos hacia la superficie de la herida, promoción selectiva y supresión de diferentes células que favorecen su empleo como material para evitar adhesiones. De acuerdo con la literatura, combinaciones de gelatina con dexametasona; grupos activos como amino y carboxilo; y películas entrecruzadas de gelatina con quitosano, prometen efectividad para la hemostasia y prevención de adhesiones en tejido cicatricial [19].

Materiales sintéticos

Los materiales de origen natural mencionados anteriormente provienen de un amplio rango de fuentes y poseen mayor biodegradabilidad y biocompatibilidad que los materiales sintéticos, sin embargo, presentan (en la mayoría de los casos) propiedades mecánicas y estabilidad menores o insuficientes para su aplicación en la reparación de hernias abdominales considerando la prevención de adhesiones.

Para ello, existe una variedad de materiales de origen sintético cuyas características permiten su empleo como barreras físicas en aplicaciones para evitar adhesiones, ya que poseen mejor estabilidad química y propiedades mecánicas que los materiales naturales, además de presentar mayor facilidad de síntesis para su modificación y funcionalización, según sea requerido [19].

Algunos de los polímeros que se han empleado para estas aplicaciones son el poliácido láctico (PLA, por sus siglas en inglés), co-poliácido láctico-glicólico (PLGA), polialcohol vinílico (PVA), la policaprolactona (PCL), además del conocido politetrafluoroetileno expandido (e-PTFE).

Éste último presenta mayor elasticidad y flexibilidad que le permite doblarse a conveniencia, tiene gran biocompatibilidad y resistencia al envejecimiento. La literatura reporta casos en los que se ha demostrado la efectividad del PTFE-e empleado como barrera física para evitar adhesiones, siendo una combinación de este material con PLA la más prometedora.

Incorporación de medicamentos para prevenir adhesión

Si bien los biomateriales juegan un importante papel importante en la prevención de adhesiones y reparación de defectos en la cavidad abdominal, un único material usualmente no es suficiente para satisfacer la necesidad clínica, lo que hace imperante la ingeniería de materiales simples o compuesto con estructuras diferentes y funcionalizaciones posteriores que puedan dar solución a todos los aspectos de la necesidad médica.

Existen mecanismos físicos para evitar la adhesión de tejidos, como es el caso de la mayoría de los materiales anteriormente mencionados, sin embargo también se ha estudiado el empleo de medicamentos y otras sustancias como la mitomicina C, 10-hidroxicamptotecina (10-HCPT), rosuvastatina, metotrexato, indometacina, pirfenidona, ácido de romero, N-acetil cisteína, sugammadex (gamma-ciclodextrina) y la *bletilla jacinto* (una especie de orquídea), entre otros, para la prevención eficaz de la adhesión intestinal.

Lo anterior se debe a que las sustancias mencionadas promueven generalmente la inducción de la apoptosis (muerte programada) de fibroblastos; la supresión de la replicación, traducción y transcripción de ADN; actividades antiinflamatorias y antioxidantes; la hemostasia; la supresión de factores de crecimiento inductores de tejido fibroso y la regulación de circulación sanguínea; que son eficientes mecanismos para la prevención de adhesiones.

No obstante, la falta de especificidad de las sustancias orientadas al ADN conlleva la posibilidad de promover cáncer, así como la posible generación de coágulos y trombos resultantes del uso de agentes

hemostáticos, hacen que sea necesaria la constante mejora del empleo de medicamentos y sustancias en combinación con los biomateriales para prevenir adhesiones y mejorar el tratamiento de heridas [6,16,19].

1.3.3. Mallas compuestas o mixtas

Con la finalidad de obtener las características básicas esperadas en un implante para reparación de la pared abdominal (buena integración celular, buen comportamiento peritoneal y resistencia mecánica), se han generado mallas que asocian las ventajas de distintas prótesis, promoviendo el crecimiento interno del tejido, al tiempo que disminuyen o atenúan la formación de fístulas y adhesión intestinal. El producto resultante es conocido como malla compuesta, combinada o mixta [12,15].

Las prótesis compuestas más conocidas son las de doble capa o *composites* en inglés. Estas mallas comprenden dos componentes que pueden ser un biomaterial principal (primer componente) al que se le añade otro material (segundo componente), con características superficiales diferentes, de tal forma que el primer componente, permita la integración tisular con la pared abdominal y el segundo componente pueda ser colocado en contacto directo con el tejido visceral [12,15].

Por lo anterior, los materiales empleados para formar el primer componente suelen ser polímeros sintéticos (PP, PE) con estructura tipo reticular macroporosa, mientras que el segundo componente suele tener estructura laminar y estar formado por materiales absorbibles (barrera física) y/o no absorbibles (barrera química). Ambos componentes suelen estar unidos mediante pegamentos acrílicos, termo sellado o sutura [15].

La composición estándar de las mallas compuestas es una mezcla de polipropileno como primer componente y PTFE-e, poliglactina 910, polidioxanona, AH, colágena hidrofílica, celulosa oxigenada regenerada, o cualquier otro material absorbible o no absorbible que disminuya el proceso inflamatorio y evite adhesiones indeseables [1]. Algunas mallas compuestas que han sido comparadas a través de estudios *in vivo* [11,18], se describen brevemente a continuación. Asimismo, en la Tabla 4 se presenta una comparativa similar a la presentada en la Tabla 4, donde se enlistan algunas de las características de mallas compuestas disponibles en el mercado y su precio aproximado.

- *DualMesh*®: Elaborada por la empresa Gore®, es una malla de politetrafluoroetileno expandido, formada por dos capas, una macroporosa corrugada y rugosa (primer componente) y una capa microporosa (segundo componente); unidas a través de un método de fusión (patentado por la

empresa). De acuerdo con los resultados reportados [11] no se observaron adherencias intestinales, confirmando la seguridad de su empleo en colocación intraparietal a largo plazo.

- *Composix*®: Producto de la empresa Bard®, se trata de una malla compuesta por una capa de polipropileno de alta densidad (primer componente) y una capa delgada, microporosa y lisa fabricada con PTFE-e (segundo componente). Los resultados de los estudios presentaron tasas estadísticamente significativas de formación de adherencias al emplear la malla *Composix*®, mismas que son más altas que al emplear la *DualMesh*®. Se maneja como suposición que la diferencia radica en la fabricación del PTFE-e empleado para la fabricación de ambas [11].

- *Proceed*®: Este producto, fabricado por la línea Ethicon® de la empresa Johnson & Johnson®, se compone por tres distintas capas: una de polipropileno ligero para la cara parietal, una capa reabsorbible antiadherente de celulosa regenerada oxidada empleada en la cara visceral y una película de polímero de polidioxanona que une las dos capas anteriores [18].

- *Ventrex ST*®: Fabricado por la empresa Bard®, el parche *Ventrex*, diseñado para la reparación de hernias umbilicales, se compone de una capa monofilamento de polipropileno y una cara de fibras de poliácido glicólico (PGA) absorbible. Esta última se encuentra recubierta con un hidrogel modificado químicamente que contiene hialuronato de sodio, carboximetilcelulosa y polietilenglicol [18].

- *Parietex*®: Este producto de la empresa Covidien® consiste en una malla con dos caras, compuestas por poliéster monofilamento (no absorbible) y recubierta por una capa absorbible de colágeno hidrofílico. Si bien los estudios indican que tanto la *Ventrex*® como la *Parietex*® tienen buen comportamiento antiadherente en la colocación intraperitoneal, la malla *Parietex*® presenta una mejor incorporación a la pared abdominal [18].

1.3.3.1. Mallas recubiertas

Dentro del concepto de mallas compuestas, existe un tipo que aprovecha las propiedades mecánicas de polímeros convencionales no absorbibles (PET, PP), a la vez que reducen la cantidad de material (y por tanto el peso) de la malla, por medio del uso de fibras y otros materiales absorbibles. A este tipo de mallas se les conoce como *mallas recubiertas o revestidas*, ya que el segundo componente se coloca en capas o películas muy delgadas, o recubrimientos, usualmente tratándose de substratos para mejorar la bio-funcionalidad y regeneración celular, reduciendo respuesta inflamatoria y de cuerpo extraño, así como evitando la formación de adherencias [12].

Algunos de los revestimientos de malla empleados comúnmente incluyen fármacos y factores de crecimiento, materiales bioderivados (quitosano, colágeno, matriz extracelular dérmica), poliácido láctico (PLA) y poliácido glicólico (PGA), polietilenglicol (PEG) y otros materiales con base en polímeros sintéticos [12].

Ejemplos comerciales de este tipo de malla se muestran tanto en la tabla 4 (Parietex Composite®, Parietene Composite®, Physiomesh®). En el caso de la primera, se trata de una malla fabricada con polipropileno y polietileno, con recubrimiento de colágena, PEG y glicerol, absorbible en tres semanas; mientras que la segunda está formada por tres capas: una capa de polipropileno monofilamento, una capa de celulosa oxidada regenerada y una malla de polidioxanona absorbible para unión entre las dos capas mencionadas, por último, la Physiomesh® es una malla [12].

1.3.4. Funcionalización de mallas

Tanto los materiales de origen natural como los polímeros sintéticos pueden ser trabajados a través de la ingeniería para obtener distintas propiedades biológicas, mecánicas e incluso para funciones como la liberación de fármacos [19]. A la serie de tratamientos biológicos, físicos y/o químicos a los que se somete a los materiales con el fin de modificar u obtener nuevas características, funciones, capacidades o propiedades del mismo se le denomina funcionalización [12].

Algunos ejemplos de funcionalización de mallas que se encuentran en la literatura mencionan el pretratamiento de materiales de tipo reticular, tanto en prótesis de alta densidad como de baja, con un recubrimiento de titanio o de fluoruro de polifluoruro de vinilideno (PVDF). De igual modo, con la final de generar mallas auto-fijables, se han estudiado funcionalizaciones de prótesis fabricadas con polipropileno y poliácido glicólico, así como prótesis reticulares de PTFE no expandido (mediana densidad), usando poliácido acrílico sintetizado por polimerización por plasma (PPAA, por sus siglas en inglés) y añadiendo nanopartículas de plata metálica con propiedades antimicrobianas a las superficies funcionalizadas [15,16].

Otros ejemplos mencionan el reforzamiento del PTFE-e con etileno-propileno fluorado (FERPePTFE), con el fin de incrementar la flexibilidad e integridad del material. Para esta modificación, las superficies de PTFE fueron tratadas con plasma, ya que este procedimiento incrementa la hidrofobicidad del material, favoreciendo la unión celular y atenuación de respuestas inflamatorias [16,20]. Sin embargo, los efectos de esta modificación fueron evaluados únicamente a tres meses, por lo que se desconocen los efectos adversos que dichos implantes puedan tener en el largo plazo.

Los tratamientos con plasma han sido objeto de atención debido a su gran capacidad de realizar modificaciones únicamente a nivel superficial, sin alterar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del material. Dichas modificaciones deben procurar mantener la porosidad de la malla abierta para no obstaculizar la integración de la malla con el tejido [16].

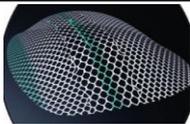
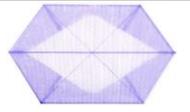
Producto	Características	Imagen	Precio aproximado
Composix (Bard)	PP macroporoso en lado parietal. PTFE-e en lado visceral. Malla de peso ligero.		99.99 - 145 USD (1903.45 - 2754 MXN)
UltraPro (Ethicon)	PP monofilamento con suplemento de copolímero de PLG y PCL monofilamento. Peso aproximado de 50 g/cm ² . Tamaño de poro >3 mm		249,78 - 431.51 USD (2412,93 - 8161,54 MXN)
Dynamesh IPOM (FEG textiltechnik)	PP monofilamento en lado parietal. PVDF (polifluoruro de vinilideno) monofilamento en lado visceral. Tamaño de poro de 1 a 2 mm.		1291,46 - 9,528 USD (24426,55 - 180,21 MXN)
Parietex Composite Mesh (Covidien)	Doble capa de PET en lado parietal, tamaño de poro 700 µm. Membrana hidrofílica de colágeno tipo I, polietilenglicol (PEG) y glicerol, en lado visceral.		189- 450 USD (3597,88 - 8204 MXN)
DualMesh (GORE)	Malla de ePTFE con una capa macroporosa corrugada y rugosa que promueve el crecimiento del tejido y una capa microporosa que limita la unión del tejido.		19 - 102,5 USD (360,87 - 1946,79 MXN)
Proceed (Ethicon)	Malla de PP encapsulado con polidioxanona en la cara parietal, con recubrimiento de celulosa oxigenada regenerada en cara visceral.		500 - 1695.54 USD (9456,95 - 32094,01 MXN)
Ventrex ST (Bard)	Malla monofilamento de polipropileno y poliácido glicólico (PGA) con barrera de hidrogel de hialuronato de sodio, carboximetilcelulosa y polietilén glicol. (Parche para hernia umbilical).		246 - 489 USD (4500 - 8915 MXN)
Physiomesa (Ethicon)	Malla de PP monofilamento, recubierto con copolímero de glicolida y épsilon-caprolactona (monocryl) en cara eritoneal y subcutánea. Capa de polidioxona una recubrimiento con malla.		665 - 1206.83 USD (12587,45 - 22843,47 MXN)

Tabla 1.6- Ejemplos de mallas compuestas disponibles en el mercado.

II. Diseño conceptual

2.1 Metodología de diseño

Partiendo del término en inglés «design», que hace referencia al conjunto de planteamientos y acciones llevadas a cabo para la realización, ejecución o concretización de una idea, se puede entender entonces al *diseño* como la actividad sistemática para la transformación de información, iniciando con la identificación de una necesidad, posteriormente traducida en requisitos y demandas, hasta finalizar en la descripción y construcción o implementación de una estructura o producto que da solución al problema inicial [28].

Se considera que el *proceso de diseño* consiste en la ejecución de tres etapas o acciones principales [28,29], con el fin de lograr la transformación de información anteriormente mencionada. Dichas etapas son: *análisis (divergencia)*, donde se divide el problema en partes para simplificar su estudio, así como identificar la mayor cantidad de aspectos involucrados; *síntesis (transformación)*, donde se reestructura, organiza y condensa la información para ir obteniendo soluciones; y la *evaluación (convergencia)*, donde se ponen a prueba la nueva organización de la información, así como las soluciones obtenidas, para verificar su capacidad de satisfacción de la necesidad.

A lo largo de la historia del estudio del proceso de diseño se han generado gran cantidad de modelos que sirven para representarlo, limitándose a describir o mostrar las actividades secuenciales que ocurren dentro del diseño (*modelos descriptivos*); para guiar su ejecución, describiendo e indicando cómo desarrollar cada fase o etapa del proceso (*modelos prescriptivos*); para entenderlo, explicando el comportamiento y actividad cognitiva del diseñador (*modelos cognitivos*); o para automatizarlo, expresando las formas en que una computadora puede desarrollar el proceso de diseño (*modelos computacionales*) [28,29].

En el caso del presente trabajo, se tomó como referencia para la metodología de diseño, el modelo prescriptivo comúnmente empleado en el Diseño Mecánico [23,28] que consiste en las cinco etapas o fases ilustradas en la **Figura 2.1** y descritas a continuación:

- 1) *Identificación de la necesidad*: la fase inicial consiste en la determinación y reconocimiento de la problemática que se buscará resolver. Esta etapa puede ser presentada directamente por

un cliente o usuario, o surgir a partir del análisis de información obtenida por observación, estudios de mercado, etcétera.

- 2) *Diseño conceptual*: etapa inicial del diseño, dónde se y se establecen los requerimientos y especificaciones que guiarán el proceso de diseño. A partir de dichos requerimientos, se lleva a cabo también la descomposición funcional del producto o sistema, para plantear y generar principios de solución que son evaluados hasta obtener una propuesta que se desarrollará hasta lograr el diseño final.
- 3) *Diseño preliminar*: esta etapa parte del concepto elegido durante el diseño conceptual, desarrollando la configuración del mismo a través de la definición de los componentes, formas, interacciones, movimientos, conexiones y otras características que lo conforman como conjunto organizado.
- 4) *Diseño de detalle*: Etapa de refinamiento de la solución, donde se eligen y plasman las decisiones finales acerca de los materiales, colocación, dimensiones, entre otras características del sistema, generando las especificaciones necesarias a través de planos de detalle. Estos planos deben incluir los parámetros, tolerancias y descripciones precisas para la producción.
- 5) *Diseño final*: implementación (materialización) a nivel producto de la solución diseñada.

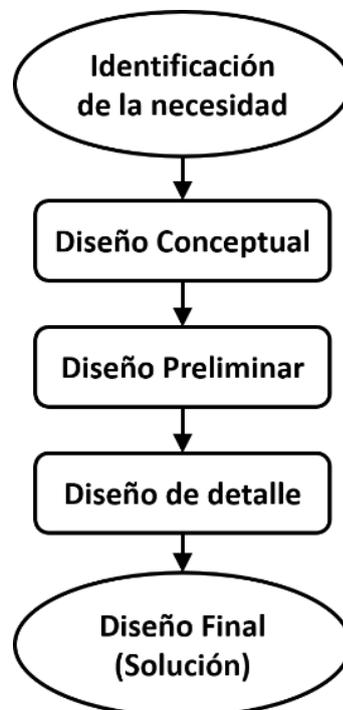


Figura 2.1- Fases del proceso de diseño. Modificado de [23]

2.2 Diseño conceptual: definición y etapas

De acuerdo con la mayoría de los autores, la fase de diseño conceptual es aquella donde se conciben u originan las ideas de solución al problema identificado. En esta fase, que es la más temprana en el desarrollo del producto, se parte de la identificación del problema esencial (necesidad) y se busca establecer estructuras funcionales que ayuden a encontrar alternativas para generar uno o más conceptos que sirvan de base para la elaboración del producto o solución [23,27,28].

Esta fase se divide principalmente en cuatro etapas: clarificación de especificaciones, establecimiento de estructuras funcionales, búsqueda de principios de trabajo (solución) apropiados y sus combinaciones; y evaluación de alternativas conceptuales (selección del concepto) [23]. Algunos modelos desglosan las etapas en pasos específicos, como la clasificación y formulación del problema de diseño, la obtención de restricciones y parámetro de diseño, el establecimiento de interfaces, la búsqueda de soluciones, la exploración del espacio de soluciones y selección de conceptos que satisfagan las especificaciones, la selección y validación de un concepto de producto [26].

Para el presente trabajo, se llevó a cabo el desarrollo de la fase de diseño conceptual siguiendo el modelo propuesto por Pahl y Beitz [23], quienes desglosan el diseño conceptual en los siguientes pasos:

- 1) Clarificación de la tarea y configuración de la lista de requisitos
- 2) Abstracción para identificar los Problemas Esenciales
- 3) Establecimiento de estructuras funcionales
- 4) Búsqueda de principios de funcionamiento/ solución
- 5) Combinación de principios de funcionamiento/ solución
- 6) Selección de combinaciones adecuadas
- 7) Reafirmación de las alternativas de solución
- 8) Evaluación de las alternativas de solución

En la **Figura 2.2** se ilustran las cuatro etapas principales que se llevan a cabo dentro de la fase del diseño conceptual, del lado izquierdo, y las etapas propuestas por Pahl y Beitz, del lado derecho. En las secciones que se presentan a continuación se describe cada una de estas etapas aplicadas

en el caso particular del diseño de un sistema de para el recubrimiento de mallas quirúrgicas para hernia abdominal.



Figura 2.2- Etapas del diseño conceptual.

2.2.1 Clarificación de la tarea y configuración de la lista de requisitos

Para poder iniciar el desarrollo de la solución, se debe tener bien identificada la problemática a resolver. A través de la síntesis de información recopilada del estado del arte presentada en el capítulo anterior, se identificaron algunas de las áreas de oportunidad del diseño mecánico en la fabricación de mallas para reparación de hernia abdominal [30]. De entre estas áreas de oportunidad, y de acuerdo a la necesidad manifestada por parte del Hospital General Manuel Gea González, se consideró como problema inicial para el presente proyecto la modificación de las mallas quirúrgicas empleadas en la reparación de hernias abdominales, a través de la aplicación de un recubrimiento con algún material que fomente una disminución en las adherencias del tejido intraperitoneal con la malla.

De acuerdo con la literatura, dichas mallas deben también cumplir con las siguientes características:

- Ser fabricadas con un material no carcinogénico, biológicamente compatible y químicamente inerte
- No causar alergia ni hipersensibilidad

- Ser resistente a la infección
- Esterilizable (resistente a altas temperaturas)
- Impermeable a fluidos corporales
- Resistente al esfuerzo mecánico
- Permanecer flexible/elástica
- Permitir ser infiltrado rápidamente por tejido conectivo
- Generar mínima o nula formación de adhesiones con el tejido intraperitoneal

Con base en lo anterior, se tomaron como base para el proyecto las mallas fabricadas con polipropileno (PP), monofilamento, macro porosas, de mediana o baja densidad. De igual forma, se seleccionó al politetrafluoroetileno (PTFE) como material a emplear para el recubrimiento, ya que ha sido probado en distintas aplicaciones para evitar adherencia [35,37,40,45,55], además de que presenta características de compatibilidad y propiedades favorables para la modificación de las mallas [55,57].

Siguiendo la metodología propuesta, se generó lista de requerimientos o requisitos para el sistema, que se presenta a continuación:

- a) El sistema debe generar un recubrimiento con propiedades antiadherentes en una de las caras de la malla
- b) El sistema no debe modificar a nivel significativo las propiedades mecánicas de la malla
- c) El sistema debe permitir trabajar con los materiales elegidos
- d) El sistema debe poder generar capas de espesor uniforme en todo el sustrato (malla)
- e) El sistema debe poder repetir el proceso en más de una ocasión
- f) El sistema debe funcionar de manera programada, automática, o con la mínima intervención humana posible
- g) El sistema debe ser seguro y no representar un riesgo para la salud de los usuarios y/o el ambiente
- h) El sistema debe consumir la menor cantidad de recursos energéticos
- i) El sistema debe realizar el proceso de manera rápida
- j) El sistema debe ocupar el menor espacio posible
- k) El sistema no debe ser muy complejo en cuanto a su manejo y operación

Es importante mencionar que la lista de requisitos anterior funcionó como guía en la etapa inicial de la búsqueda de soluciones, sin embargo, fue refinada tras el paso descrito en la sección 2.2.2, que se describe a continuación, por lo que la lista de requerimientos y especificaciones establecidos para el presente proyecto se enlistan en la **Tabla 2.1** y **Tabla 2.2**, respectivamente.

2.2.2 Abstracción para identificar los problemas esenciales

Para evitar el apego a ideas o principios de trabajo convencionales, así como para ampliar el campo de análisis con el fin de enfatizar lo que es esencial y lo general dentro de la problemática a resolver, se recomienda realizar una etapa de abstracción, de manera que se pueda identificar el *quid* o tarea principal que el sistema debe realizar [23].

Para ello, se procedió a realizar una revisión de la literatura y de mercado, enfocada en los tipos de procesos para generar recubrimiento, con el fin de identificar cuáles de ellos podrían satisfacer de mejor manera los requerimientos, acotando así la tarea del sistema.

La **Figura 2.3** muestra un resumen de los principales procesos para realizar recubrimientos identificados en la literatura [39,41,44,54,61] clasificados procesos de deposición atómica, deposición de partículas, recubrimientos por volumen y procesos de modificación de superficie.

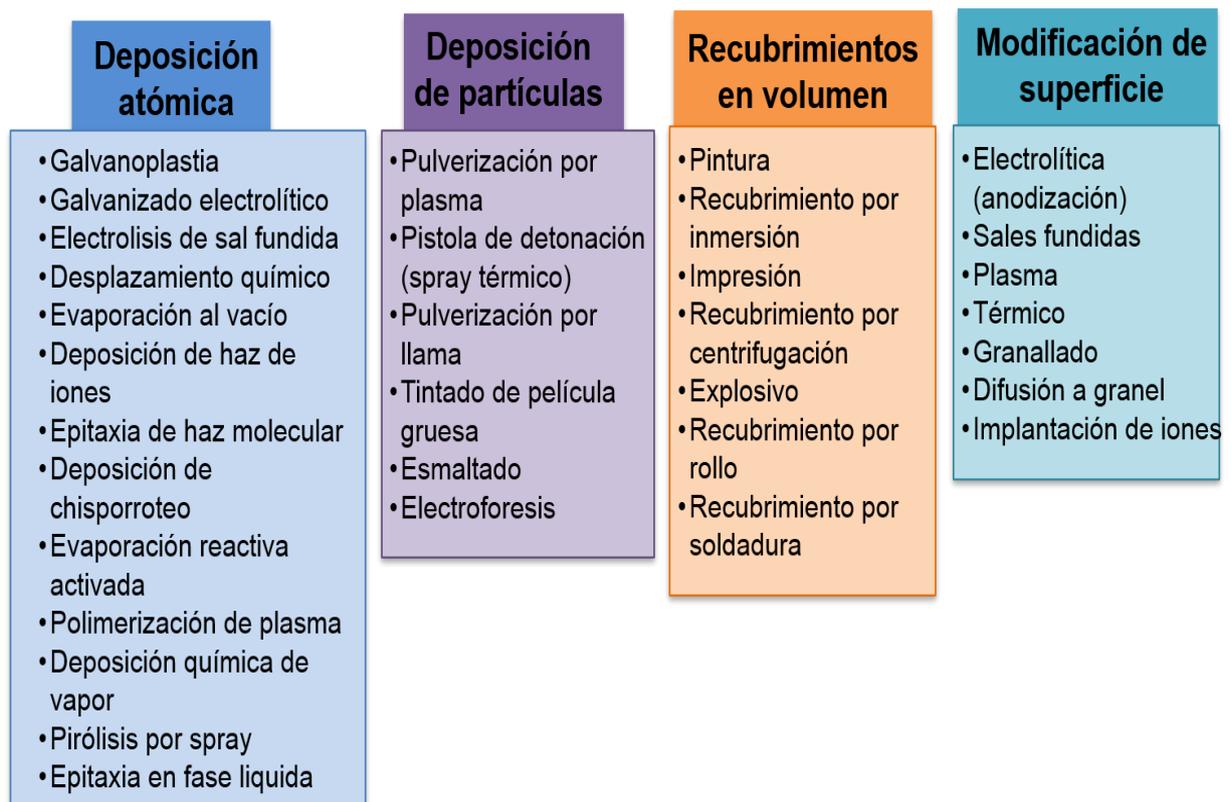


Figura 2.3- Procesos para generar recubrimientos.

Para poder acotar las posibles soluciones, se llevó a cabo una selección del proceso de recubrimiento a emplear, tomando como base los criterios de selección recomendados por Bunshah [41], que consideran el material a depositarse, las limitaciones dadas por el sustrato, la energía requerida, la tecnología requerida y su disponibilidad, el costo, condiciones ecológicas, entre otros aspectos.

De los procesos enlistados en la Figura 2.3, se seleccionaron aquellos procesos que, de acuerdo con la literatura, han sido probados en la aplicación de recubrimientos empleando PTFE como material [37,40, 43,45, 50,51,59,66].

Dichos procesos son:

- Evaporación al vacío
- Deposición por chisporroteo
- Polimerización por plasma
- Deposición química por vapor
- Pulverización por plasma
- Pistola de detonación (spray térmico)
- Pulverización por llama
- Pintura
- Recubrimiento por inmersión
- Recubrimiento por centrifugación
- Recubrimiento por rodillo

De la revisión en la literatura se encontró únicamente un trabajo de investigación con enfoque similar al que aquí se presenta, en donde emplearon la técnica de aplicación por brocha y una máquina centrífuga (spin-coater) para generar un recubrimiento antiadherente y una orilla para la apertura automática de la malla, respectivamente, empleando como material un silicón de grado médico (NuSil MED-6215) [64]. Las desventajas de esta propuesta son principalmente el alto grado de intervención humana que requiere la aplicación del material sobre la malla y su instalación en la máquina centrífuga, que el material empleado no tiene antecedentes de uso en anti adherencia de las mallas quirúrgicas y que el proceso de aplicación por brocha del recubrimiento no tiene un control repetible y medible, por lo que no se puede garantizar la uniformidad de las capas. Estas desventajas no cumplen los requisitos iniciales identificados para el sistema, por lo que este tipo de proceso quedó eliminado de las posibles soluciones.

Tomando en consideración los criterios mencionados anteriormente, y contrastando con los requerimientos que se identificaron inicialmente para el sistema, se eligió el proceso de recubrimiento

por inmersión o dip-coating. Dicho proceso consiste en la aplicación de un recubrimiento sobre un sustrato que es sumergido en un material que se encuentra en estado líquido, para después ser retirado y dejado a secar [43,45,48,54,59,60,65,66,86]. Las etapas principales de este proceso (inmersión y fijado; retracción, deposición y drenado y evaporación o secado) se ilustran en la **Figura 2.4**, en los incisos **a**, **b** y **c**, respectivamente.

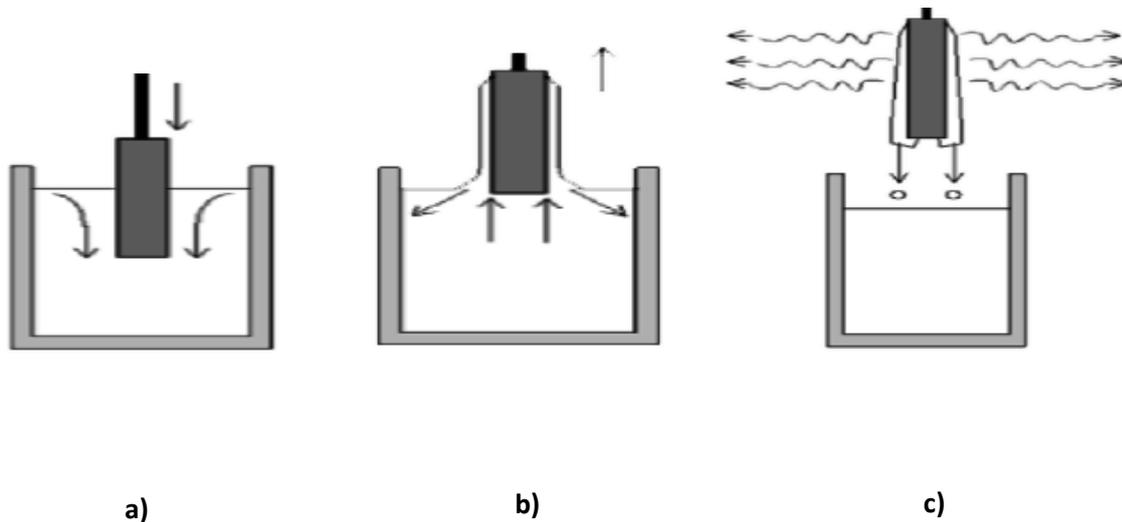


Figura 2.4- Etapas del proceso de recubrimiento por inmersión.

Otras ventajas del empleo de este proceso se encuentran que puede generar capas delgadas uniformes, tiene capacidad de cubrir distintos tipos de superficies, no únicamente superficies planas y lisas, como otros procesos; además de que requiere de equipo mucho menos costoso, más asequible y fácil de controlar que otros procesos como la deposición asistida por plasma. Asimismo, este proceso no genera afectaciones a las propiedades del material original [45,48,59,60,67,68,86].

Lista de requerimientos y establecimiento de especificaciones objetivo

Una vez elegido el proceso de recubrimiento que se iba a usar, se procedió a generar una nueva lista de requerimientos para el sistema, la cual se presenta en la Tabla 2.1.

Estos requerimientos, que representan algún atributo que se espera que el sistema propuesto lleve a cabo para satisfacer la necesidad, fueron clasificados por nivel de importancia, con el valor que se muestra en la Tabla 2.1. Se empleó una escala del 1 al 5, donde 1 representa la menor importancia y 5 la mayor, considerando como más importantes los requerimientos que guardan mayor relación con el cumplimiento del objetivo establecido. Es importante aclarar que esta ponderación se realizó con base

en la información recopilada en la investigación de la literatura, así como en los conocimientos de la diseñadora.

Asimismo, las especificaciones pueden ser clasificadas por importancia o por tipo (técnicas, económicas, legales, etc.), siendo las especificaciones técnicas las más importantes en la fase de diseño conceptual, ya que indican el punto inicial del desarrollo de la solución, además de llevar a cabo la documentación actualizada y en constante revisión del trabajo relacionado en función de la satisfacción de la necesidad [23-25,32].

Las características técnicas objetivo propuestas para el presente proyecto se enlistan en la Tabla 2.2, junto con el valor de importancia asignado a cada una. Para esta jerarquización se empleó una escala similar a la de los requerimientos.

Los requerimientos (Tabla 2.1) y especificaciones (Tabla 2.2) fueron relacionados a través de la herramienta del despliegue de la función a de calidad (QFD por sus siglas en inglés), que se presenta en el **APÉNDICE A**. Esta herramienta ayuda a capturar y procesar sistemáticamente los deseos del cliente para transformarlos en indicadores para la búsqueda de soluciones que conduzcan todo el proceso de diseño [23,32].

Igualmente, a través de la comparación de la evaluación y la correlación de los requisitos técnicos se determinan las áreas que representarán mayor dificultad técnica y en las cuales será necesario enfocarse durante el desarrollo del producto, para lograr un mayor nivel en función de la satisfacción de la necesidad.

Para el presente proyecto, resultaron de la evaluación a través de la matriz QFD como requisitos de mayor atención técnica la reproducibilidad, el desplazamiento y la sujeción; y como especificaciones la intervención de usuarios, la variabilidad de espesores generados y el grado de desnivel del sustrato.

Id.	Requerimiento	Importancia
a	Que sostenga la malla	5
b	Que mantenga la misma posición en todo el sustrato/ generar capas uniformes	5
c	Que se pueda trabajar con el material elegido	4
d	Que pueda contener el material a ocupar	4
e	Que pueda mover el sustrato y ponerlo en contacto con la solución	5
f	Que esté integrado en un solo dispositivo, o tenga el menor número de elementos.	4
g	Que el proceso sea repetible	5
h	Que funcione de manera automática/programada	3
i	Que sea seguro/ no genere daños a salud y/o ambiente	3
j	Que sea rápido	1
k	Que no ocupe demasiado espacio	2
l	Que no sea muy complejo en cuanto a su operación	4
m	Que consuma la menor cantidad de recursos energéticos	2

Tabla 2.1- Requerimientos del sistema.

Especificaciones objetivo				
No.	Métrica/Parámetro	Unidad	Valor	Importancia
I	Fuerza sobre sustrato	N/m	16 a 32	4
II	Espesor de la capa	µm	1 a 15	4
III	Peso final sustrato	g/cm ²	75 a 110	2
IV	Tensión de la malla	N/cm	8 a 30*	5
V	Desnivel	%**	< 100	5
VI	Material	n/a	n/a	4
VII	Variabilidad (de espesores bajo mismas condiciones)	%	< 1	4
VIII	Intervención de usuarios	subjetiva	n/a	4
IX	Variación de velocidades desplazamiento	mm/min	1 a 200	4
X	Velocidad de procesamiento	MHz	5 a 150	3
XI	Número de etapas o subprocesos	#	3 a 5	2
XII	Dimensiones	cm x cm x cm	60 x 50 x 75	2
XIII	Volumen del sistema (interior)	m ³	0,0094 aprox. (0.25 x 0.25 x 0.15)	2
XIV	Voltaje de operación	V	110 a 220	1

Tabla 2.2- Especificaciones objetivo para el sistema

2.2.3 Establecimiento de estructuras funcionales

El término *función* ha recibido distintas definiciones dentro del ámbito de la investigación en diseño, pero muchos autores coinciden en dos nociones: la función de propósito (intención del diseñador o propósito de diseño, abstracto y subjetivo) y la función de acción (abstracción de cómo se desea que funcione el producto) [24].

Algunas otras definiciones de función hacen relación a la transformación de entradas a salidas, que pueden ser material, energía o señal; al ejecutar o hacer algo; al cambio de estado de un objeto causado por uno o más flujos (de energía, materia o información) [23]. Pahl y Beitz, por su parte, describen la relación de entrada-salida esperada de un sistema cuyo propósito es cumplir una tarea;

en otras palabras, la tarea es la conversión de la entrada (de materia, energía o información) en salida, y la función es la abstracción de dicha tarea [23].

Para el establecimiento de estructuras funcionales es necesario identificar dos tipos de funciones:

- Función primaria, principal, general o global: se refiere al trabajo específico que todo el sistema o producto está diseñado para cumplir.
- Sub-funciones o funciones secundarias: aquellas funciones o actividades adicionales necesarias para que se lleve a cabo la función primaria o las que resulten de la ejecución de ésta.

Identificación de la función principal

De la fase anterior (abstracción y generación de lista de requerimientos) se obtuvo la función general o función principal del sistema que, como se mencionó anteriormente, representa la tarea general que se espera que el sistema lleve a cabo, es decir, la relación entre las entradas y las salidas esperadas para el sistema [23-25,47].

En el caso de la presente investigación, la función general del sistema es la modificación de la malla para hernia abdominal, siendo su sub-función principal la aplicación de un recubrimiento de PTFE a través del método de inmersión.

Una herramienta que se sugiere para la representación de la estructura funcional del sistema, es el diagrama de caja negra, el cual se muestra en la **Figura 2.5**. En este diagrama ilustra el sistema de forma general y con el mayor grado de abstracción, identificando las entradas de materia, energía e información principales, así como las salidas esperadas, sin tomar una forma de solución particular. En otras palabras, presenta al sistema como un conjunto, denotando el *qué* hace, sin especificar el *cómo*.

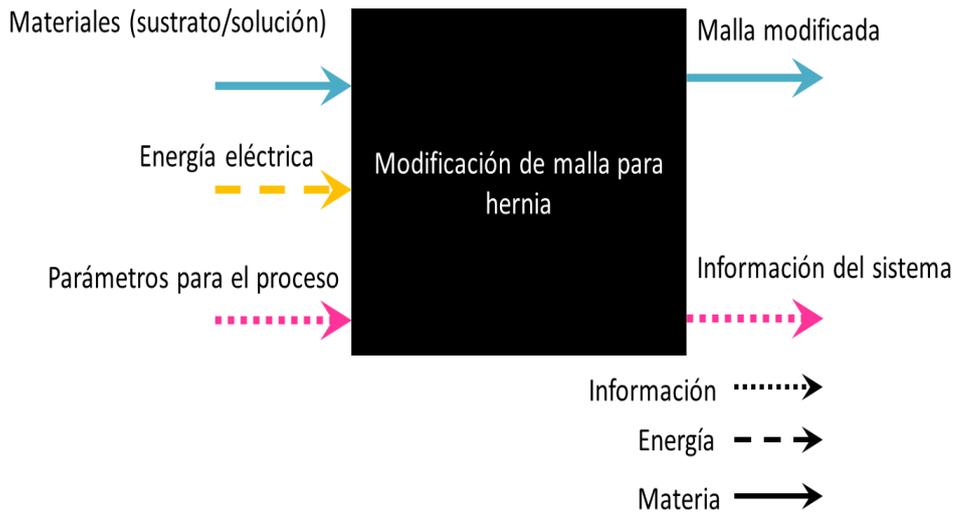


Figura 2.5- Diagrama de caja negra del sistema para modificación de mallas para hernia.

Descomposición funcional

Durante la etapa del diseño conceptual, uno de los primeros pasos a efectuar es la descomposición funcional, que no es otra cosa más que la división de la función principal en problemas (funciones) de menor nivel de abstracción, conectados a través de los flujos de materia, energía e información correspondientes. Esto se realiza con la finalidad de facilitar la búsqueda de soluciones particulares para cada subtarea, que representan menor complejidad y que al ser resueltas y combinados en una estructura funcional, definida y simple, darán solución de manera global a la función principal del sistema [23-25,47].

Dado que en etapas anteriores se llevó a cabo la selección del proceso de recubrimiento por inmersión, se tomó como base para la descomposición funcional, la segmentación general de elementos o componentes de un sistema de recubrimiento por inmersión o *dip coater*, que se ejemplifica en la **Figura 2.6**.

- 1) Sustrato (sujetador)
- 2) Contenedor de recubrimiento (solución)
- 3) Mecanismo de desplazamiento (inmersor/retractor)
- 4) Controlador (velocidad de desplazamiento)
- 5) Indicadores de variables (p.e. temperatura)

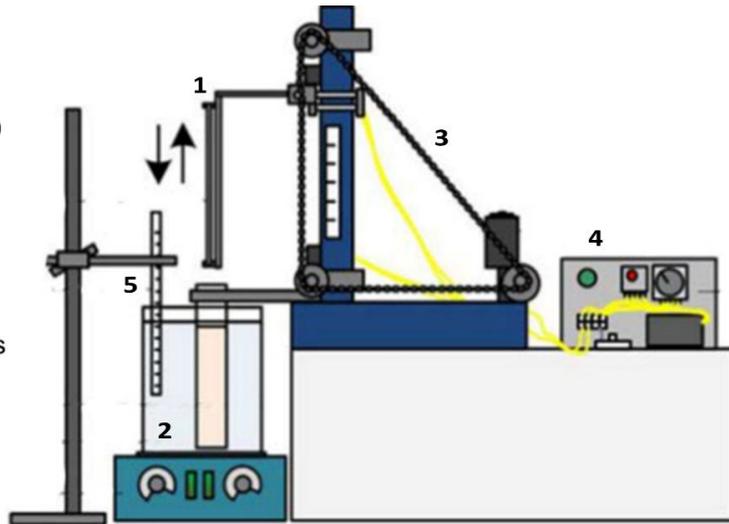


Figura 2.6- Elementos principales de un sistema de recubrimiento por inmersión (dip coater).

Modificada de [48].

Es importante destacar que, aunque se pudiera descomponer al sistema en una gran cantidad de sistemas o funciones, tan específicas como se desee, es recomendable seleccionar únicamente aquellos que sean los más críticos para el cumplimiento de la función principal, pues la complejidad y el tiempo dedicados al diseño conceptual del producto se ven directamente afectados por la cantidad de sistemas a desarrollar.

Con base en lo anterior, se seleccionaron en total cuatro sistemas a desarrollar para la composición del sistema de modificación de mallas quirúrgicas para hernia, que se describen a continuación:

- **Sistema de sujeción del sustrato (malla):** encargado de recibir y sujetar la malla, manteniendo su tensión y orientación durante todo el proceso.
- **Sistema de suministro de recubrimiento:** tiene como función contener la solución que se empleará para generar el recubrimiento.
- **Sistema de desplazamiento:** como indica su nombre, su función principal es desplazar el sustrato (malla), durante el proceso, convirtiendo la energía eléctrica en el movimiento del sistema de sujeción, de manera que el sustrato sea acercado o alejado al recubrimiento. Asimismo, se encargará de mantener al sustrato en la posición que se requiera.
- **Sistema de procesamiento:** este sistema es el encargado de controlar el proceso, recibiendo los parámetros necesarios para ejecutar la función de recubrimiento (velocidad de desplazamiento, número de repeticiones, etc.); además de ajustar el comportamiento del sistema, por medio de la activación de actuadores. También llevará a cabo el monitoreo de la posición del sustrato y enviará la información correspondiente al estado del proceso.

La **Figura 2.7** muestra la descomposición funcional del sistema, tomando las mismas entradas y salidas que se representaron en el diagrama de caja negra (Figura 2.5), pero *destapando* dicha caja, de manera que se pueden apreciar los subsistemas que conforman el sistema en general, así como la manera en que las entradas de materia, energía e información se comunican entre los distintos sistemas, hasta llegar a las salidas esperadas. La **Figura 2.8**, en los incisos **a y b**, muestra dos niveles de abstracción más específicos.

Por otra parte, en la **Tabla 2.3** se presenta la descomposición funcional del sistema para modificación de mallas para hernia, relacionando cada subsistema con sus funciones correspondientes, así como los medios (elementos) que se requerirán para llevar a cabo cada una de ellas.

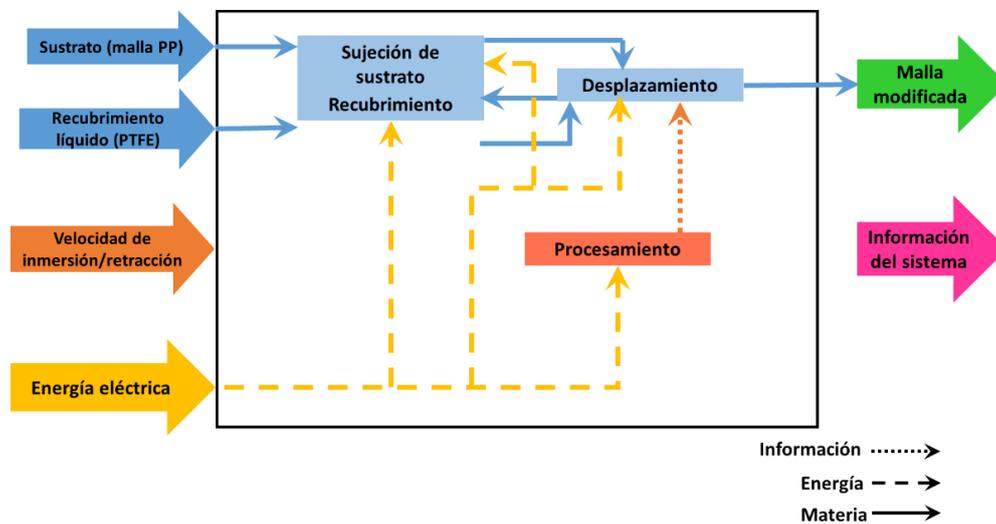


Figura 2.7- Diagrama de descomposición funcional del sistema.

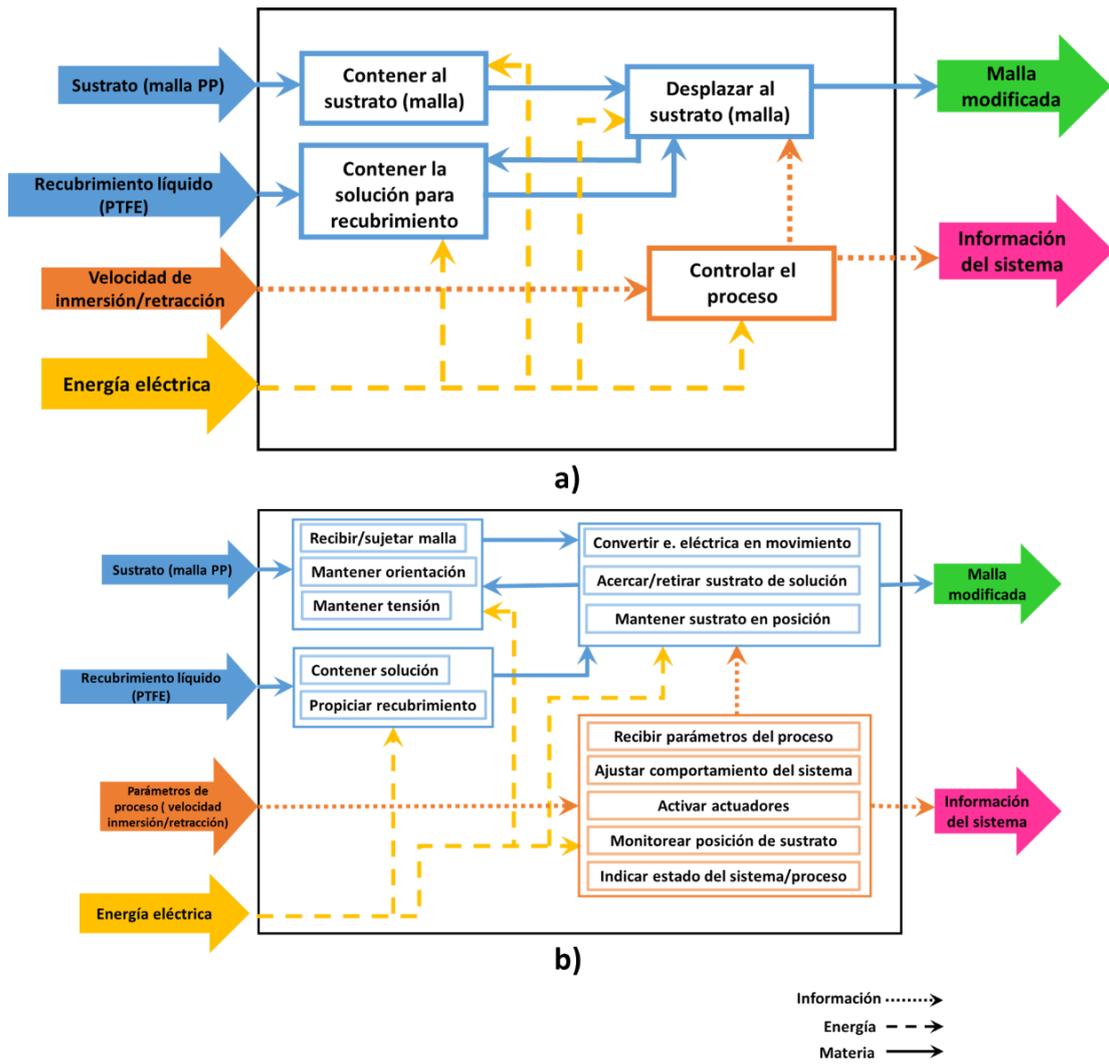


Figura 2.8- Diagrama de descomposición funcional a dos niveles de abstracción más específicos.

Sistema/ Subsistema	Función	Subfunciones	Medios
SUJECIÓN	Contener el sustrato (malla)	Recibir/ sujetar la malla	Elemento de sujeción
		Mantener orientación de la malla	Elemento de sujeción
		Mantener tensión de la malla	Elemento de sujeción
RECUBRIMIENTO	Contener solución para recubrimiento	Contener solución	Contenedor
		Propiciar recubrimiento de la malla	Contenedor
DESPLAZAMIENTO	Desplazar el sustrato (malla)	Convertir energía eléctrica en movimiento	Motor
		Acercar el sustrato a la solución	Mecanismo
		Retirar sustrato de solución	Mecanismo
		Mantener el sustrato en posición	Sensores + programa
PROCESAMIENTO	Controlar el proceso	Recibir información: parámetros del proceso	Interfaz + procesador
		Ajustar comportamiento de sistema	Procesador + programa
		Activar actuadores	Procesador + programa + mecanismo
		Monitorear posición del sustrato	Sensores + programa
		Indicar información del sistema/proceso	Procesador + interfaz

Tabla 7.3- Relación de sistemas-funciones-medios.

2.2.4 Búsqueda de principios de funcionamiento/solución

El siguiente paso consiste en encontrar principios de funcionamiento u opciones de solución para cada una de las subfunciones o subsistemas identificados en las fases anteriores. Estas alternativas de solución usualmente incluyen procesos físicos, característica geométricas y materiales, combinándolas en una estructura de trabajo [28,40].

Para el caso del sistema propuesto, la búsqueda de estos principios de solución se llevó a cabo a través de una revisión de la literatura, así como del análisis de sistemas técnicos existentes y dispositivos comerciales disponibles en el mercado. De igual modo, se hizo uso de métodos basados en la intuición, conocimiento heurístico del diseñador y analogías con otras tecnologías que propusieran soluciones para cada uno de los subsistemas.

Se analizaron principalmente algunos sistemas empleados para el recubrimiento por inmersión, tanto comerciales [42,46,49,62,110], como algunos ejemplos de sistemas fabricados para aplicaciones específicas en investigación [22,34,53,106]. El **APÉNDICE B** y el **APÉNDICE C** muestran las tablas donde se resumieron las características de los dispositivos analizados.

En el caso del sistema para sujeción, no existen antecedentes de un elemento específico o similar al deseado, es decir, con aplicación a mallas quirúrgicas, más que el sujetador presentado en el trabajo de Takacs [64]; por lo que se recurrió a buscar alternativas análogas para otro tipo de materiales que deben ser sujetados a tensión, por ejemplo, las mallas para serigrafía, mallas de jardinería, entre otras.

Para cada uno de los subsistemas se propusieron cuatro alternativas de solución y se generaron tablas con información respecto a las características generales de cada una, sus ventajas y desventajas. Las **Tablas 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7**, presentan las síntesis de soluciones generadas para cada sistema.

SISTEMA DE SUJECIÓN				
Opción	Pinza dentada	Ganchos	Bastidor (bordado)	Bastidor (serigrafía)
Representación				
Descripción	Piezas dentadas con dos caras que embonan, una en la otra, sujetando la malla entre los dientes.	Marco o piezas individuales de ganchos que sujetan ciertos puntos de la malla, tensándola hacia los extremos.	Bastidor de dos piezas: dos piezas que embonan entre sí, tensando el material atrapado entre ambas.	Marco con pinzas de sujeción (prensas), que sujetan la malla bajo presión. Los bordes se pueden ajustar para piezas de distinto tamaño.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Fijación y tensión de la malla sin aprisionar o maltratarla. * Asegura que la malla no tenga movimientos en dirección perpendicular. * Posibilidad de adaptar varios puntos de tensión. * Tecnología probada en tensión de mallas industriales otros tipos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Fácil colocación. * Se pueden encontrar ganchos de dimensiones pequeñas en el mercado. * Se pueden incorporar o retirar piezas con mayor facilidad, en caso de ser necesario. * Menor cantidad de material pierde contacto con la sustancia. 	<ul style="list-style-type: none"> * Fácil colocación del material. * Probado en aplicaciones que requieren una tensión considerable. * La mayoría de la malla recibe los mismos efectos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Garantiza correcta sujeción y más tensión que las otras soluciones. * Se puede ajustar a distintos tamaños de malla. * La cantidad de material que pierde contacto con la solución de recubrimiento, es la misma en todos los bordes de la malla. * Probado en procesos de serigrafía.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Requiere de diseño de piezas específicas para las mallas de hernia abdominal. * Dependiendo del tamaño de la pinza y colocación de los dientes, puede aumentar la cantidad de material no recubierto en la malla. 	<ul style="list-style-type: none"> * Requiere de soporte para anclaje de ganchos. * Mayor posibilidad de deformación de la malla en puntos de unión. * No garantiza que la malla no se desplace en dirección perpendicular. 	<ul style="list-style-type: none"> * Mayor cantidad material queda aislado de la sustancia de recubrimiento. * Se debe tener mucho cuidado en el diseño del marco y su ajuste, pues se puede dañar el material. 	<ul style="list-style-type: none"> * Muy complicado de ensamblar. * Mayor cantidad de piezas. * Si no se tiene cuidado con la presión aplicada, se puede dañar la malla. * Se debe tener mayor precaución para mantener posición correcta.

Tabla 2.4- Cuadro comparativo de soluciones para el sistema de sujeción.

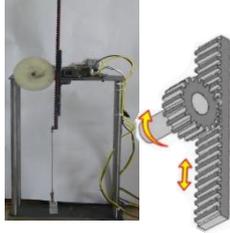
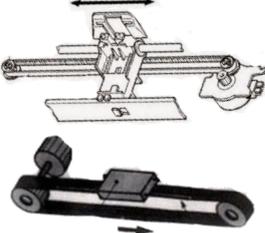
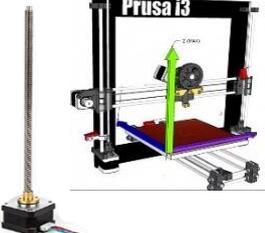
MECANISMO DESPLAZAMIENTO				
Opción	Piñón- cremallera	Piñón-Banda	Polea- Cable	Husillo (Tornillo s/fin)
Representación				
Descripción	Sistema formado por un piñón (rueda dentada) y cremallera (prisma rectangular con dientes una de sus caras laterales). Convierte movimiento rotatorio en uno lineal continuo, o viceversa.	Sistema de transmisión basado en un engrane ajustado entre los dientes de una correa o banda con ranuras. Los cálculos se realizan mediante el número de dientes de las ruedas dentadas motriz y conducida.	Sistema o dispositivo mecánico que se emplea para elevar cargas por medio de un cable enrollado en un tambor o volante, cuyo movimiento genera el ascenso o descenso de la carga.	Sistema o mecanismo que convierte un movimiento giratorio en uno lineal continuo, pudiendo ser el desplazamiento de la tuerca o del tornillo(husillo) cuando el otro permanece fijo.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Movimientos lineales de precisión * Pocos elementos involucrados (sencillo) * Transmisión suave y con precisión. * Fácil montaje y aplicación. * Control de la profundidad del avance. 	<ul style="list-style-type: none"> * Útil para la transmisión entre dos ejes separados. * Exactitud en relación de transmisión. * Mayor flexibilidad para adaptarse a diámetros más pequeños. * probado en aplicaciones como impresoras de tinta y 3D. * Movimiento regular y repetible. 	<ul style="list-style-type: none"> * Más compacto que otros mecanismos. * Fácil de colocar y contener dentro de la estructura del sistema. * Con tambor de diámetro amplio, mayor precisión en posición y acercamiento; elevación casi vertical. * Movimiento suave y posicionamiento rápido 	<ul style="list-style-type: none"> * Mayor precisión. * Grandes reducciones en espacios menores. * Mecanismo más compacto y de fácil instalación. * Pueden implementarse varias zonas * Mecanismo más rígido, estable y silencioso. * No requiere gran mantenimiento.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Puede transferir ruido y vibración. * Para generar grandes diferencias de velocidad, se requieren distintos diámetros de piñón. * Dimensiones del sistema deben dejar espacio al desplazamiento de la cremallera. 	<ul style="list-style-type: none"> * El desplazamiento lineal está limitado al espacio entre los dos ejes. * Grandes dimensiones exteriores. * Desgaste y envejecimiento. Pérdida de elasticidad. * Grandes cargas sobre árboles y apoyos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Requieren mayor mantenimiento. * Menor control del movimiento constante y recto. * Puede ser desbalanceada por fuerzas externas. * El cable puede romperse por fatiga. 	<ul style="list-style-type: none"> * El sistema no es reversible. * Se presentan bastantes pérdidas de energía por fricción (en forma de calor), lo puede causar pérdida de rendimiento. * Riesgo de desgaste por fricción.

Tabla 2.5- Cuadro comparativo de soluciones para el sistema de desplazamiento.

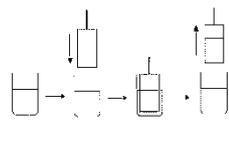
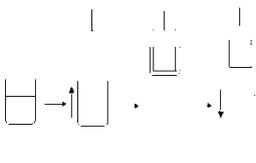
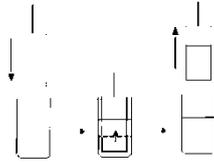
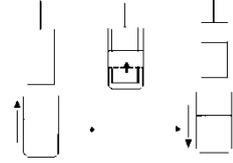
SUMINISTRO DE RECUBRIMIENTO				
Opción	Contenedor fijo	Contenedor móvil	Contenedor rellenable fijo	Contenedor rellenable móvil
Representación				
Descripción	El contenedor permanece fijo y es el sustrato el que se mueve, ingresando y retirándose de la solución. Llenado y vaciado como un paso aparte.	El sustrato permanece fijo, mientras el contenedor se acerca a él y se retira. Se debe llenar y vaciar el contenedor, por aparte.	El contenedor permanece fijo y el sustrato ingresa y se retira de él. La solución rellena el contenedor hasta cubrir el sustrato y después es extraído.	El sustrato permanece fijo, mientras el contenedor se acerca a él. El contenedor se llena con la solución hasta cubrir el sustrato, después se extrae y el contenedor se retira.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Funcionamiento comprobado en la mayoría de sistemas existentes. * El sustrato es mucho más ligero y fácil de mover que el contenedor. * No requiere más elementos más que el contenedor. 	<ul style="list-style-type: none"> * Disminuye la probabilidad de que el sustrato no se mueva de manera homogénea. * Se puede ocupar menor cantidad de solución. * El desplazamiento del contenedor requiere menor precisión que el del sustrato. 	<ul style="list-style-type: none"> * El sustrato es más ligero y fácil de mover que el contenedor. * Se puede racionar la cantidad de solución * No requiere intervención del usuario para llenar y vaciar el contenedor. 	<ul style="list-style-type: none"> * Disminuye la probabilidad de que el sustrato no se mueva de manera homogénea. * Se puede racionar la cantidad de solución. * No requiere intervención del usuario para llenar y vaciar el contenedor.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Se debe tener mucho cuidado para garantizar el movimiento homogéneo del sustrato. * Puede generar chisporroteo o vibraciones indeseadas. * de presentar desperdicio de material de recubrimiento 	<ul style="list-style-type: none"> * El desplazamiento del contenedor puede generar ondas y vibración en la solución. * Se puede presentar desperdicio de material. * Requiere de intervención de usuario para el llenado/vaciado. * Se requiere robustecer el mecanismo de desplazamiento para mover algo más pesado que el sustrato. * No se encuentran muchas referencias. 	<ul style="list-style-type: none"> * Se requiere generar un sistema más complejo para llenado y vaciado de contenedor. * No existen referencias que comprueben que esta modificación del proceso de dip coating genere resultados adecuados. * Se debe garantizar el movimiento homogéneo del sustrato. 	<ul style="list-style-type: none"> * Se requiere robustecer el mecanismo de desplazamiento para mover algo más pesado que el sustrato. * Se requiere generar un sistema más complejo para llenado y vaciado de contenedor. * No se encuentran referencias de este tipo de configuración en el mercado. * No existen referencias.

Tabla 2.6- Cuadro comparativo de soluciones para el sistema de recubrimiento.

PROCESAMIENTO				
Opción	Arduino	PIC16F887	TI Launchpad MSP340	Raspberry Pi 3
Representación				
Características	Arduino UNO Tarjeta de desarrollo con microcontrolador ATMEGA328P. 6 AI, 14 DI/O (6 con PWM). Frecuencia de oscilación 16 MHz.	Microcontrolador PIC16F887. 35 I/O, 1 DI, 14 ADCC. Frecuencia variable 31 kHz - 8 MHz.	Tarjeta de desarrollo con microcontrolador MSP430F5529. 63 I/O. Frecuencia: 25 MHz	Procesador Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 a 1.4 GHz. Conexiones USB, ethernet, bluetooth, etc. 40 GPIO.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Antecedentes de manejo. * Mayor intuitividad y gran cantidad de información disponible. * Recibe y envía información. * Una vez programado, independiente de la computadora. * Facilidad de programación. 	<ul style="list-style-type: none"> * Mayor flexibilidad y versatilidad en programación, no sujeta a librerías. * Programable a distintas frecuencias. * No limitado a configuración de tarjeta estandarizada. * Una vez programado, es independiente de la computadora. 	<ul style="list-style-type: none"> * Bajo consumo de energía. * Tarjeta de desarrollo de gran utilidad en aplicaciones portátiles. * Los IDE incluyen depuración en circuito. 	<ul style="list-style-type: none"> * Potencia de procesador mucho mayor (minicomputadora). * Memoria propia. * Sistema operativo. * Maneja apps., servidores web. * Plataforma de programación * No se necesita generar circuitos.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Limitado por librerías de programación y tarjeta de desarrollo. * Susceptible a ruido/interferencias. * Necesidad de <i>shields</i> para ampliar hardware estandarizado. 	<ul style="list-style-type: none"> * Programación compleja y extensa. * Requiere una placa grabadora, además de la computadora. * Prolonga el tiempo de desarrollo. * Requiere de la generación de placas o circuitos para su interacción con periféricos. 	<ul style="list-style-type: none"> * El software no es tan sencillo de utilizar. * Menor cantidad de información disponible. * Necesidad de shields y otros dispositivos para ampliar hardware estandarizado. 	<ul style="list-style-type: none"> * Requiere sistema operativo. * Requiere accesorios extra. * Características pueden resultar sobradas. * No compatible con algunos sistemas operativos. * Más costosa.

Tabla 2.7- Cuadro comparativo de soluciones para el sistema de procesamiento.

2.2.5 Combinación de principios de funcionamiento/solución

Para la combinación de los principios de solución, se elaboró una matriz morfológica. Esta herramienta es una tabla donde se arreglan las funciones del sistema, en los renglones, y las propuestas de solución para cada uno de los sistemas o funciones, en las columnas; y es recomendada cuando se requiere un proceso metodológico para generar conceptos dentro de un espacio de diseño abierto [21,23,24,27]. Los datos que se incluyeron en la matriz morfológica de la **Figura 2.9** son las opciones de solución que se enlistaron en las Tablas 2.4 a 2.7.

SUBSISTEMA		OPCIONES DE SOLUCIÓN			
		1	2	3	4
A	Sujeción	Pinza dentada	Ganchos	Bastidor (bordado)	Bastidaro tensable (serigrafía)
B	Desplazamiento	Piñón - cremallera	Piñón - Banda	Polea - Cable	Husillo (Tornillo sin fin)
C	Recubrimiento	Contenedor fijo	Contenedor móvil	Contenedor rellenable fijo	Contenedor rellenable móvil
D	Procesamiento	Arduino	PIC16F887	Launchpad	Raspberry Pi

Figura 2.9- Matriz morfológica para generación de conceptos.

Las soluciones integradas o conceptos, son descripciones aproximadas de los principios de trabajo, formas o tecnologías que buscan satisfacer la necesidad del producto [32]. Estos conceptos se generan a partir de la combinación de uno de los medios o propuestas de solución, para cada uno de los sistemas o funciones, en un proceso que se puede repetir tantas veces como sea posible hasta alcanzar el límite del espacio de diseño o campo de soluciones, es decir, el número total de posibles soluciones. El tamaño teórico del espacio de diseño se calcula a partir de la siguiente ecuación [21,23,27]:

$$\text{No. Soluciones} = \prod_{i=1}^n M_i \quad (1)$$

Dónde M_i es cada una de las soluciones para cada una de las funciones o sistemas (F_i).

En el caso de matrices cuadradas, como es el caso del sistema propuesto, el espacio de soluciones se calcula con la ecuación simplificada:

$$\text{No. Soluciones} = M^n \quad (2)$$

El espacio de soluciones para el sistema de modificación de mallas para hernia que se propone en este trabajo alberga hasta 256 posibles combinaciones. Cuando el campo de soluciones resulta demasiado grande para ser evaluado, como es el caso, se puede recurrir al conocimiento heurístico y algunas otras estrategias evaluación de compatibilidad entre las propuestas de solución, para acotar el campo de soluciones, es decir, eliminar aquellos principios de solución inadecuados [21,23].

Para poder reducir el campo de soluciones, de manera que los conceptos generados contengan sólo las soluciones más adecuadas, se recomienda emplear algunas herramientas como, por ejemplo, una matriz de compatibilidad, para eliminar los medios de solución que resulten imprácticos, o que no satisfagan los requerimientos [23,27].

De acuerdo con la literatura, el proceso de selección de combinaciones adecuadas consiste básicamente en dos pasos: la *eliminación* y la *preferencia*, buscando eliminar inicialmente todas las propuestas que sean inadecuadas. En el presente trabajo, se emplearon los criterios propuestos por Pahl y Beitz [23] en la elaboración de una tabla de selección, donde se evaluaron las alternativas de solución para todos los subsistemas. Dichos criterios se en listan a continuación:

- Criterio A: Compatibilidad con la tarea general y con las demás funciones.
- Criterio B: Cumplimiento de los requerimientos.
- Criterio C: Ser realizable, respecto a desempeño, configuración, etc.
- Criterio D: Encontrarse dentro de los costos permisibles.
- Criterio E: Incorporación de medidas de seguridad o condiciones ergonómicas favorables.
- Criterio F: Es preferido por el diseñador o compañía.

En el **APÉNDICE D** se presenta la tabla de compatibilidad empleada para eliminación de opciones de solución. A la vez, la **Figura 2.10** ilustra la matriz reducida, en donde las opciones eliminadas por el proceso anterior se encuentran marcadas en color gris.

SUBSISTEMA		OPCIONES DE SOLUCIÓN			
		1	2	3	4
A	Sujeción	Pinza dentada	Ganchos	Bastidor (bordado)	Bastidaro tensable (serigrafía)
B	Desplazamiento	Piñón - cremallera	Piñón - Banda	Polea - Cable	Husillo (Tornillo sin fin)
C	Recubrimiento	Contenedor fijo	Contenedor móvil	Contenedor rellenable fijo	Contenedor rellenable móvil
D	Procesamiento	Arduino	PIC16F887	Launchpad	Raspberry Pi

Figura 2.10- Matriz morfológica reducida.

Tras la aplicación del método de selección, ilustrado en la **Figura 2.11**, se procedió a generar los conceptos de solución dentro del campo acotado. se obtuvieron ocho conceptos distintos, denominados CONCEPTO I, CONCEPTO II, CONCEPTO III, CONCEPTO IV, CONCEPTO V, CONCEPTO VI, CONCEPTO VII y CONCEPTO VIII. La descripción de elementos que conforman cada concepto se enlista en la **Tabla 2.8**.

SUBSISTEMA		OPCIONES DE SOLUCIÓN			
		1	2	3	4
A	Sujeción	Pinza dentada	Ganchos	Bastidor (Arduo)	Bastidaro tensable (serigrafía)
B	Desplazamiento	Piñón cremallera	Piñón - Banda	Polea - Cable	Husillo (Tornillo sin fin)
C	Recubrimiento	Contenedor fijo	Contenedor móvil	Contenedor rellenable fijo	Contenedor rellenable móvil
D	Procesamiento	Arduino	PIC16F887	Launchpad	Raspberry Pi

CONCEPTO	COMBINACIÓN DE SOLUCIONES
I	☆ A1, B4, C1, D1
II	○ A1, B1, C1, D3
III	⬡ A1, B1, C2, D1
IV	⬢ A1, B3, C2, D4
V	△ A3, B4, C3, D4
VI	□ A3, B3, C2, D3
VII	D A3, B3, C1, D4
VIII	△ A3, B1, C3, D1

Figura 2.11- Proceso de generación de conceptos por medio de combinación de soluciones.

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN [COMPONENTES]
I	Pinza dentada, husillo, contenedor fijo, Arduino
II	Pinza dentada, piñón-cremallera, contenedor fijo, Launchpad
III	Pinza dentada, piñón-cremallera, contenedor móvil, Arduino
IV	Pinza dentada, polea-cable, contenedor móvil, Raspberry Pi
V	Bastidor, husillo, contenedor rellenable fijo, Raspberry Pi
VI	Bastidor, polea-cable, contenedor móvil, Launchpad
VII	Bastidor, polea-cable, contenedor fijo, Raspberry Pi
VIII	Bastidor, piñón-cremallera, contenedor rellenable fijo, Arduino

Tabla 2.8- Conceptos generados.

2.2.6 Confirmación de alternativas de solución

En esta fase recomendada por los autores [23], lo que se busca es definir de manera más concreta y, en ocasiones, cuantitativa, las propiedades de las combinaciones generadas, a través de reafirmar características del principio de funcionamiento, manufactura (dimensiones, peso, etc.) y otras restricciones importantes respecto a la tarea general.

Las características importantes del principio de funcionamiento (como el rendimiento y la susceptibilidad a las fallas), de la realización (como los requisitos de espacio, deben conocerse, al menos aproximadamente, de manera que se reafirmen las combinaciones más prometedoras hasta el punto de poder ser evaluadas más precisamente [23].

En el caso del presente proyecto, las características principales de las propuestas de solución ya habían sido refinadas y filtradas en etapas anteriores, por lo que no se requirió de mayor actividad con respecto a esta fase

2.2.7 Evaluación de las alternativas de solución

Al realizar una evaluación, lo que se busca es determinar el valor, utilidad o fortaleza de una solución con respecto al objetivo establecido [23]. La evaluación de conceptos se emplea para identificar las diferencias entre las distintas soluciones, a través de la ponderación de la importancia relativa de ciertos requisitos o criterios de selección con los cuales se lleva a cabo una comparación más refinada, hasta llegar a la elección del concepto más conveniente, en términos del cumplimiento o satisfacción de la necesidad [Andrade, 23, 32].

Para la evaluación de los conceptos se empleó una matriz de decisión, a través de la cual se calificó cada concepto contra ciertos criterios de selección que fueron establecidos con base en la lista de requerimientos. La **Tabla 2.9** muestra la lista de criterios de selección que se ocuparon para la evaluación de los conceptos, así como el factor de peso asignado a cada uno. El factor de peso (w_i) es un número real, positivo, que indica la importancia relativa de cada objetivo o criterio de selección [23,25,32].

Para obtener los factores de peso de los criterios de selección, se llevó a cabo un análisis de comparación por pares, donde se contrasta uno contra otro cada uno de los criterios, evaluando con una calificación de 0 o 1, dónde 0 representa *menor importancia que* y 1 *mayor importancia que*, de

manera que al final se realiza una sumatoria de los puntos para cada criterio, a fin de obtener el peso (nivel de importancia) de cada uno [31]. La matriz de comparación por pares completa se presenta en el **APÉNDICE E**.

Considerando los criterios de evaluación mencionados, se procedió a generar la matriz de decisión que se presenta en el **APÉNDICE F**. Dentro de la matriz de evaluación, se asignó a cada concepto un valor (v_{ij}), que indica el grado de satisfacción del objetivo/criterio que se está evaluando. Para la asignación de los valores de cumplimiento de cada concepto, se utilizó la escala recomendada por Ulrich y Eppinger [32], que va del 1 al 5, ya que proporciona una buena resolución, siendo el menor número el que corresponde al mínimo cumplimiento del objetivo y el mayor número al cumplimiento total o más completo.

Una vez evaluados cada concepto respecto a cada criterio, se calcularon las evaluaciones ponderadas, multiplicando las evaluaciones por el peso de cada criterio, es decir, $v_{ij}w_i$. La evaluación total (OWV_j) para cada concepto se obtuvo mediante la suma de las evaluaciones ponderadas usando:

$$OWV_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot v_{ij} \quad (2)$$

2.2.8 Selección del concepto

Para la selección del concepto, se observaron las opciones que obtuvieron un mayor valor en la evaluación ponderada, que, en el caso del sistema propuesto, como se ilustra en la **Figura 2.12**, fueron los conceptos I, IV y VII. El resultado indica que, entre esas tres variantes, y por lo tanto de todas las variantes evaluadas, el Concepto I es el que posee mayor valor ponderado, por lo que se puede asegurar que es la opción que mejor satisface los requerimientos.

Sin embargo, como indica la literatura [23,32], el valor obtenido en la evaluación no debe ser el único aspecto a considerar al elegir la solución, pues puede existir incertidumbre basada en la presencia de puntos débiles o desequilibrio respecto los valores obtenidos para los criterios de mayor importancia. Estos puntos débiles pueden ser identificados realizando un perfil de valor, donde se representa a través de una gráfica el valor ponderado para los criterios de mayor importancia, de manera que se pueda identificar si la calificación obtenida en el proceso de evaluación corresponde a la satisfacción de los criterios principales (aspectos esenciales) para el cumplimiento de la función del producto. Una solución con un perfil de valor más balanceado, resultará más satisfactoria que aquella cuyo perfil presente mayores puntos débiles, aún si obtuvo un valor inferior en la evaluación.

CRITERIO		PESO
A	Desplazamiento lineal	0,07602339
B	Susceptibilidad a vibraciones	0,08187135
C	Menor afectación del material	0,10526316
D	Menor ocupación de espacio	0,01754386
E	Mayor control en la velocidad de procesamiento	0,02923977
F	Menor número de componentes	0,03508772
G	Menor complejidad de interconexiones	0,05847953
H	Mayor facilidad de comunicación entre elementos	0,05847953
I	Menor dependencia entre elementos	0,02339181
J	Menor cantidad de recursos energéticos	0,04093567
K	Menores errores de operación	0,0994152
L	Menor complejidad para el ensamble	0,04678363
M	Mayor número de piezas estandarizadas o comerciales	0,03508772
N	Fácil mantenimiento	0,04093567
O	Componentes adicionales requeridos	0,00584795
P	Facilidad de control	0,0877193
Q	Menor tiempo de desarrollo	0,01754386
R	Menor complejidad de programación	0,07017544
S	Asequibilidad	0,07017544

Tabla 2.9- Criterios de evaluación empelados para la evaluación de conceptos.

La **Figura 2.13** presenta el perfil de valor de los tres conceptos que obtuvieron mayores valores en la evaluación, donde la primera imagen presenta la comparativa del Concepto IV vs. Concepto I, la segunda imagen presenta la comparativa del Concepto VII vs. Concepto I y la tercera imagen la comparativa del Concepto VII vs Concepto IV. A partir del análisis de las comparativas del perfil de valor, se obtuvo que el Concepto I presenta un perfil mucho más balanceado que los otros dos, por lo que se reafirmó la selección de este concepto como la alternativa para ser desarrollada.

El concepto seleccionado incorpora las siguientes soluciones para cada sistema:

- a) Sujeción: Pinza dentada
- b) Desplazamiento: Husillo (tornillo)
- c) Recubrimiento: Contenedor fijo
- d) Procesamiento: Tarjeta de desarrollo Arduino

CRITERIO	CRITERIO	CONCEPTO I		CONCEPTO IV		CONCEPTO VII	
	PESO	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado
A	0,076023	5	0,3801	3	0,2281	3	0,2281
B	0,081871	4	0,3275	2	0,1637	2	0,1637
C	0,105263	4	0,4211	4	0,4211	3	0,3158
D	0,017544	4	0,0702	5	0,0877	5	0,0877
E	0,02924	3	0,0877	5	0,1462	5	0,1462
F	0,035088	3	0,1053	3	0,1053	4	0,1404
G	0,05848	5	0,2924	3	0,1754	4	0,2339
H	0,05848	4	0,2339	3	0,1754	4	0,2339
I	0,023392	4	0,0936	4	0,0936	4	0,0936
J	0,040936	4	0,1637	4	0,1637	4	0,1637
K	0,099415	5	0,4971	5	0,4971	5	0,4971
L	0,046784	5	0,2339	4	0,1871	4	0,1871
M	0,035088	3	0,1053	3	0,1053	3	0,1053
N	0,040936	4	0,1637	3	0,1228	3	0,1228
O	0,005848	3	0,0175	3	0,0175	4	0,0234
P	0,087719	5	0,4386	5	0,4386	4	0,3509
Q	0,017544	4	0,0702	4	0,0702	4	0,0702
R	0,070175	5	0,3509	2	0,1404	2	0,1404
S	0,070175	5	0,3509	3	0,2105	3	0,2105
TOTAL			4,404		3,550		3,515
LUGAR			1		2		3

Figura 2.12- Conceptos mejor evaluados en la matriz de decisión.

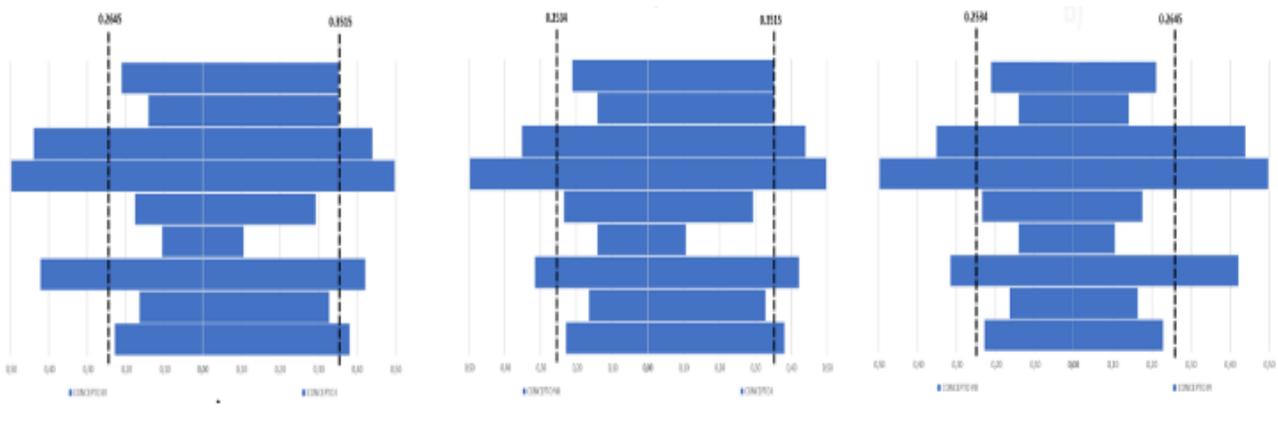


Figura 2.13- Comparativa de los perfiles de valor de los tres conceptos mejor evaluados.

III- Materialización del concepto

La etapa conceptual del diseño, descrita anteriormente, sirve como pauta para el desarrollo del proyecto [23,32,73,84]. A partir de la definición de los requerimientos funcionales generales, criterios de diseño y diagramas de flujo principales, se definieron los alcances del proyecto y se eligieron los aspectos principales para la construcción del mismo.

Entre la etapa de ideación del diseño conceptual, y la etapa de fabricación final correspondiente al diseño de detalle, existe una etapa conocida como **diseño preliminar** [70, 9,81], llamada también **diseño para materialización del concepto (*embodiment design*)** [23,84], **diseño a nivel sistema** [32] o en algunos casos **ingeniería básica** [72,74,75]. Dicha etapa tiene como objetivo analizar y determinar si el concepto elegido merece ser llevado al estudio y desarrollo del diseño de detalle [81].

La ingeniería básica o diseño preliminar, define el sistema a nivel de elementos y componentes necesarios para llevar a cabo la función del sistema, describiendo su colocación, relación e interacciones, así como su organización, de manera que funcionen correcta y coordinadamente [74,83]. Se enfoca en la creación del marco general de la configuración del proyecto, empleando representaciones abstractas o materiales a nivel básico, como diagramas, esquemáticos, propuestas de configuración (*layouts*) o modelos funcionales, para evaluar el concepto que se quiere ejecutar, generando como resultado los datos de entrada para la etapa de diseño de detalle [75,83].

La mayoría de los autores coinciden en las tareas y documentos que se deben realizar y obtener durante la etapa de diseño preliminar, entre los cuales se encuentran la generación de bases y criterios de diseño, especificaciones de componentes y equipos, mapas o esquemas funcionales y de interconexiones, ubicación y orientación de los elementos, dimensiones y geometrías, diagramas de flujo, interfaces, y presupuestos, entre otros [23,70,73,74,76,79-8184].

De acuerdo con Pahl y Beitz [23], en la etapa de diseño de materialización, se parte del concepto o principio de solución elegido en el diseño conceptual, para determinar el diseño de configuración general (arreglo y compatibilidad espacial), las formas preliminares (figuras y materiales) y restricciones espaciales (modelos 3D, digitales o físicos), procesos de producción, así como soluciones para las funciones secundarias o auxiliares.

Este proceso conlleva un gran número de pasos que alternan constantemente el análisis y la síntesis, y aunque no existe una forma o plan estricto que se pueda describir para la fase de diseño preliminar, se puede sugerir un acercamiento generalizado que ayude a pasar de lo cualitativo, abstracto y tosco, a lo cuantitativo, concreto y detallado.

Dichos pasos inician con el principio de solución, identificando los requerimientos esenciales para la materialización del proyecto y determinando requerimientos de tamaño, de estructura o acomodamiento y materiales; así como la determinación de restricciones espaciales (holguras, posiciones, requerimientos de instalación). Posteriormente, se genera uno o más planes aproximados del concepto, enfocados en los elementos encargados de la ejecución de las funciones principales. Este plan o *layout*, debe plasmar la configuración general, formas y materiales provisionales de los componentes, y deben ser evaluados técnica y económicamente, haciendo uso de modelos digitales, físicos u otros, con el fin de eliminar debilidades y elegir el mejor arreglo para ser desarrollado. La etapa termina cuando se fija la configuración definitiva, preparando la lista de partes y los documentos preliminares de ensamble y producción para pasar a la etapa de diseño de detalle.

En este capítulo se presenta el desarrollo de la fase de diseño preliminar o de materialización realizado para la propuesta del sistema para recubrimiento de mallas quirúrgicas para hernia abdominal, a través de la generación de la arquitectura del producto y el diseño de configuración del mismo.

3.1 Arquitectura de sistema

Se entiende por arquitectura del producto a la asignación de los elementos funcionales del sistema o producto (descritos de manera esquemática en la sección conceptual) a elementos físicos de construcción, es decir, las partes/piezas, componentes y subconjuntos que ponen en práctica las funciones del producto [32, 84].

El desarrollo de la arquitectura del sistema surge del diseño conceptual, y busca representar de manera esquemática, la organización de los elementos físicos en una configuración particular que asegure el éxito funcional del sistema, siendo el foco inicial de la fase de diseño preliminar.

Por medio de la arquitectura del sistema, se definen los bloques de construcción básicos del producto y sus interfaces. Dichos bloques, también conocidos como *trozos*, fragmentos, subsistemas o *módulos*, están conformados por de elementos físicos que llevan a cabo las funciones del producto. Asimismo,

al establecer la arquitectura, se deben definir los límites geométricos del producto y planear la organización de los elementos del diseño dentro de su *envoltura* o estructura contenedora [32, 84].

Cuando los subsistemas se definen de tal forma que el mínimo número de ellos cumple con las funciones del sistema, es decir, que un subsistema satisface más de una función, se puede hablar de una arquitectura *integral*, la cual resulta conveniente al reducir número de componentes, material e incluso procesos de manufactura, pero puede generar diseños más complejos y difíciles de obtener. Por otra parte, cuando cada subsistema, conocido también como módulo, satisface una sola función o el menor número de funciones posible, de manera que puede ser diseñado, modificado y/o reemplazado, de forma independiente, sin afectar al resto del sistema, se habla de una arquitectura *modular* [32, 84].

De acuerdo a la forma y tipo en que se organizan las interacciones (*interfaces*) entre los subsistemas o módulos, existen tres tipos de arquitectura modular (Figura 3.1):

- a) Arquitectura modular **de ranura**: dónde cada una de las interfaces es de tipo diferente, de forma que los módulos no pueden reemplazarse o intercambiarse entre sí.
- b) Arquitectura modular **de bus**: todos los módulos tienen un mismo tipo de interfaz y se conectan a un *bus* en común, de manera que pueden ser intercambiables.
- c) Arquitectura modular **seccional**: aunque todas las interfaces son del mismo tipo, no existe un elemento único (*bus*) al cual se unan, sino que se conectan unos con otros por medio de interfaces iguales.

En el caso del sistema para modificación de mallas quirúrgicas propuesto, se desarrolló una arquitectura de tipo modular, pues se buscó que cada uno de los módulos llevara a cabo una sola o el menor número de las funciones del sistema, a la vez que se pudiera trabajar en el diseño de cada uno de ellos de manera independiente.

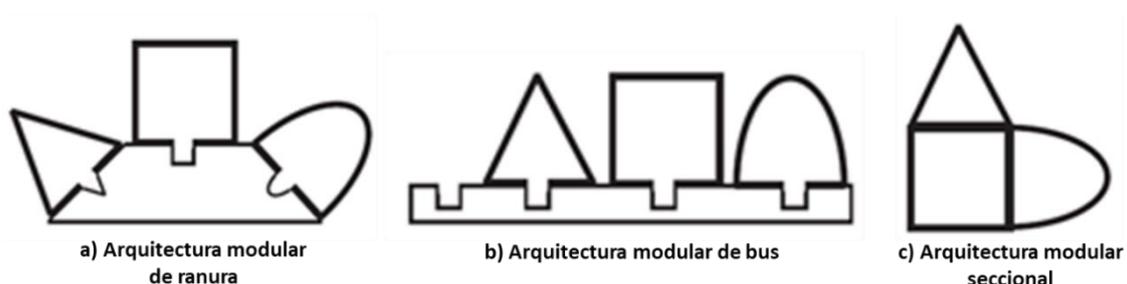


Figura 3.1- Tipos de arquitectura modular [32].

Para llevar a cabo el desarrollo de la arquitectura del sistema, Ulrich propone un proceso de cuatro pasos [32, 84]:

- 1) Crear un esquema del producto
- 2) Agrupar los elementos del esquema
- 3) Crear una disposición geométrica aproximada
- 4) Identificar las interacciones fundamentales e incidentales entre los módulos

3.1.1 Esquema del Producto

En el esquema de la arquitectura del sistema, se debe reflejar la mejor idea acerca de la condición o estado del sistema, sin contener todos los detalles, pero conteniendo los elementos que corresponden a los componentes críticos.

La Figura 3.2 presenta el esquemático del sistema para la modificación de mallas quirúrgicas, describiendo los elementos de diseño (elementos funcionales y elementos físicos), y sus interacciones en función de los flujos de materia, energía e información.

Se describen los subsistemas principales: **sujeción, desplazamiento, recubrimiento y procesamiento**, a un nivel más detallado, incorporando sus funciones y los elementos físicos que llevarán a cabo cada una de ellas.

Como se puede observar en la imagen, se incluyeron algunos elementos como el chasis o estructura, y el módulo de alimentación de energía, que hasta este momento no habían sido mencionados pues no fueron considerados dentro del sistema durante el desarrollo conceptual, pero que forman parte importante de la configuración del mismo para el cumplimiento de la función.

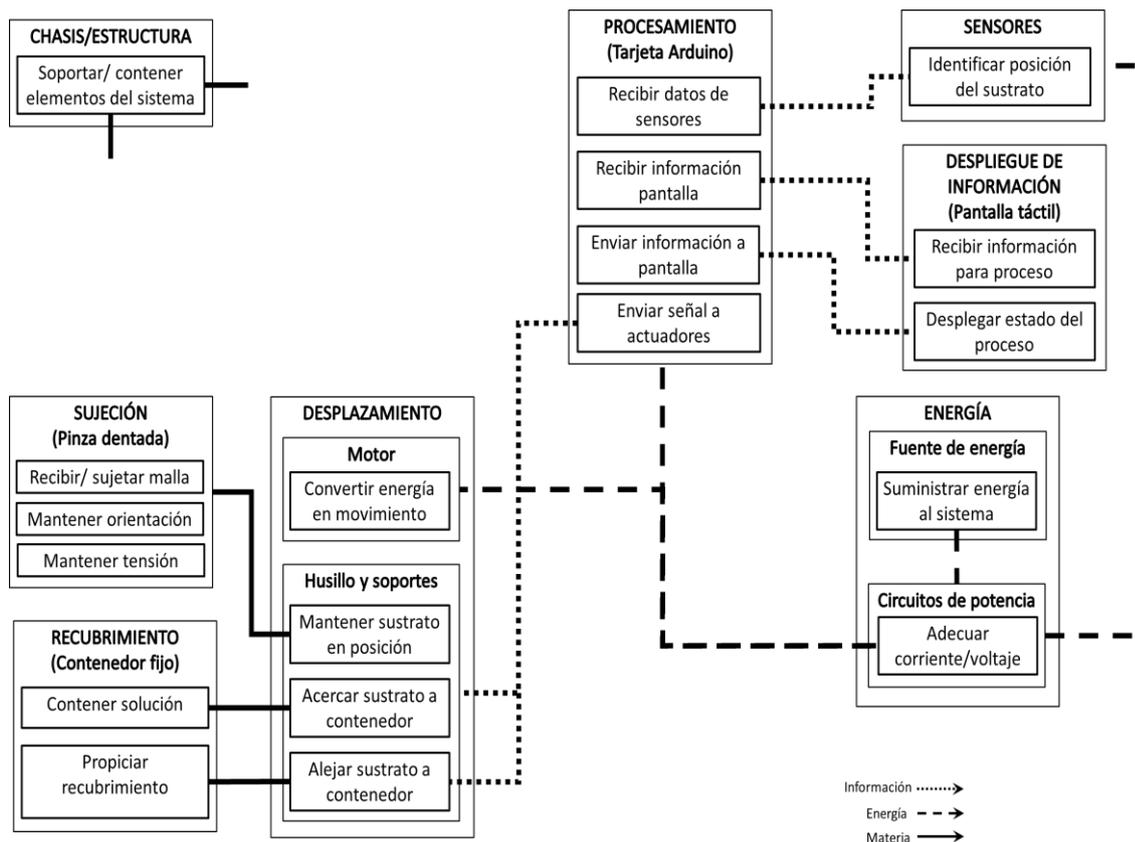


Figura 3.2- Esquema de la arquitectura del sistema para modificación de mallas quirúrgicas.

Asimismo, se incluyeron dentro del módulo de procesamiento, dos módulos que se consideran parte del sistema que lleva ese mismo nombre, pues cumplen con sus funciones, pero que, por llevar a cabo funciones independientes, se colocaron como módulos separados, con sus respectivas interfaces: el módulo de sensores y el módulo de despliegue de información.

Aunque el proceso recomendado por los autores menciona que el siguiente paso es agrupar módulos dentro del esquema, cuando sea conveniente o ventajoso, se sugiere comenzar asumiendo que cada elemento será un módulo independiente.

Dado que para el sistema propuesto se buscó el desarrollo de una arquitectura modular de ranura y a que el arreglo preliminar de los subsistemas brinda la suficiente independencia entre ellos, siendo la asignación de cada subsistema a un módulo separado lo más conveniente, no resultó necesario llevar a cabo la agrupación de elementos.

3.1.2 Disposición geométrica aproximada

Para continuar con el tercer paso, que sugiere la generación de una disposición geométrica aproximada, se generó primero una relación de los módulos, a los que, por conveniencia, se les asignaron los mismos nombres que los subsistemas a los que corresponden; enlistando las funciones que llevan a cabo y el tipo de interfaz (conexión) que existe entre cada uno de ellos [84]. Esta relación se muestra en la Tabla 3.1.

Una vez entendida la interacción entre los módulos, se llevó a cabo la generación de posibles disposiciones geométricas de los módulos. Para ello, se tomó como referencia principal el diagrama de los elementos básicos de un sistema de recubrimiento por inmersión, mostrado en la Figura 2.6, así como la configuración empleada por la mayoría de las máquinas de manufactura aditiva por deposición de filamento fundido o *impresoras 3D*, que emplean un sistema de desplazamiento similar al propuesto para el sistema de recubrimiento por inmersión para la modificación de mallas quirúrgicas.

Cabe recordar que este procedimiento requiere de un sistema capaz de ejecutar la deposición de material de manera controlada y repetible, depositando capas de material de espesores distintos sobre el sustrato. Siendo dichas capas de material determinadas principalmente por las propiedades de la solución (viscosidad, tensión superficial) y la velocidad de inmersión y de retirada [95,103,104,106].

La Figura 3.3 presenta algunas de las configuraciones comúnmente empleadas en los dispositivos para recubrimiento por inmersión o *dip coaters* disponibles en el mercado. Se observa que en casi todos los dispositivos mostrados en la imagen se encuentran tres partes principales: el sistema mecánico (sistema de desplazamiento), el sistema electrónico de control y la interfaz con el usuario [106].

MÓDULO	FUNCIONES	MÓDULO RELACIONADO	TIPO DE INTERFAZ
Sujeción	Recibir/ sujetar la malla	-	-
	Mantener orientación de la malla	Desplazamiento, Estructura	Mecánica
	Mantener tensión de la malla	-	-
Recubrimiento	Contener solución	-	-
	Propiciar recubrimiento de la malla	Sujeción, Desplazamiento	Material
Desplazamiento	Convertir energía eléctrica en movimiento	Alimentación	Flujo de energía (eléctrica)
	Acercar el sustrato a la solución	Sujeción, estructura	Mecánica
	Retirar sustrato de solución		
	Mantener el sustrato en posición		
Procesamiento	Ajustar comportamiento de sistema	Sensores, despliegue de información	Flujo de información
	Activar actuadores	Desplazamiento, alimentación	Flujo de información, flujo de energía
Despliegue de información	Indicar información del sistema/proceso	Procesamiento	Flujo de información
	Recibir información: parámetros del proceso	-	-
Sensores	Monitorear posición del sustrato	Procesamiento, desplazamiento	Flujo de información, mecánica
Alimentación de energía	Adecuar energía (voltaje/corriente)	Procesamiento, desplazamiento	Flujo de energía (eléctrica)
	Brindar energía a los módulos del sistema		
Estructura (chasis)	Contener los módulos del sistema	Desplazamiento, procesamiento, recubrimiento	Mecánica, flujo de energía, material
	Brindar soporte a sistema		

Tabla 3.1- Relación de los módulos, sus funciones e interfaces.

Aunque todos los sistemas ilustrados en la Figura 3.3 fueron diseñados y son comercializados para la fabricación de recubrimientos sobre ambas caras de sustratos laminares de tamaño pequeño, se pueden observar diferencias en sus configuraciones. Los dispositivos KSV KN4012, NXTdip-150S y KSV KN4005, mostrados en los incisos c), e) y f) de la Figura 3.3, respectivamente, muestran una configuración con estructura más ligera que los otros dispositivos, además de que despliegan y controlan la posición y velocidad del dispositivo de inmersión.

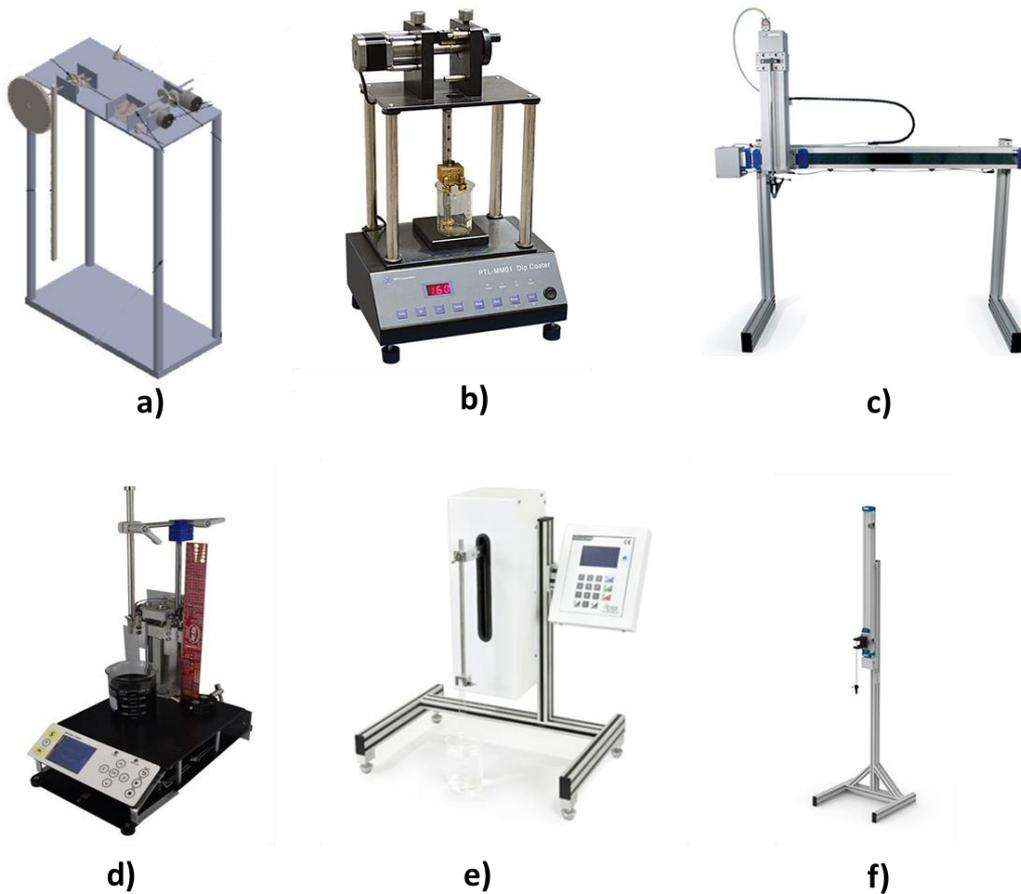


Figura 3.3- Ejemplos de configuraciones de dispositivos para recubrimiento por inmersión [104-106,110,111].

En el caso del PTL-MM01 de MTI Corporation y el dip coater de Ossila (incisos b) y d), respectivamente), las estructuras incorporan una base para la colocación del contenedor, además de un sistema de control más robusto que controla y despliega la velocidad de inmersión y retirada, el tiempo de asentamiento, el tiempo de secado y el número de ciclos.

El sistema mostrado en el inciso a), que no es un sistema comercial, sino que fue generado por investigadores de la Universidad de las Fuerzas Armadas y la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador [106], presenta una estructura similar a la del dip PTL-MM01, donde la estructura semicerrada de cuatro postes, brinda mejor soporte al mecanismo de desplazamiento que se encuentra colocado en la parte superior.

Cabe resaltar que, a pesar de las diferencias de configuración entre los dispositivos, tanto los diseñadores como fabricantes hacen hincapié en que el sistema debe buscar la reducción o eliminación de vibraciones indeseadas, que puedan transmitirse al sustrato generando defectos en la capa de recubrimiento. Para ello, mencionan como recomendación la instalación del sistema en superficies

totalmente lisas, así como la incorporación de bases o elementos de absorción de vibraciones y fijación (goma o esponja anti-vibración).

Por otra parte, se observó que, dado que el sistema de recubrimiento de mallas para hernia requiere que únicamente una de las caras del sustrato sea recubierta, la posición del elemento de sujeción del mismo durante la inmersión debe ser perpendicular a la posición empleada por los dispositivos mostrados en la Figura 3.3.

Con base en lo anterior, se procedió a observar las configuraciones empleadas en las máquinas para manufactura aditiva por deposición de material fundido, comúnmente conocidas como impresoras 3D, dado que, considerando únicamente los desplazamientos en el eje vertical (eje z), estos sistemas se comportan de manera análoga a los sistemas de dip coating, además de que poseen los mismos elementos básicos (sistema mecánico, sistema electrónico de control y la interfaz con el usuario).

Prueba de esto es la impresora para concreto, ilustrada en la Figura 3.4, desarrollada por un grupo de investigadores de la Universidad del Sur de California [109] siguiendo los principios de funcionamiento de las impresoras 3D, pero empleando una configuración y estructura muy similar a la del dispositivo de recubrimiento por inmersión, modelo KSV KN4012 (Figura 3.3c).

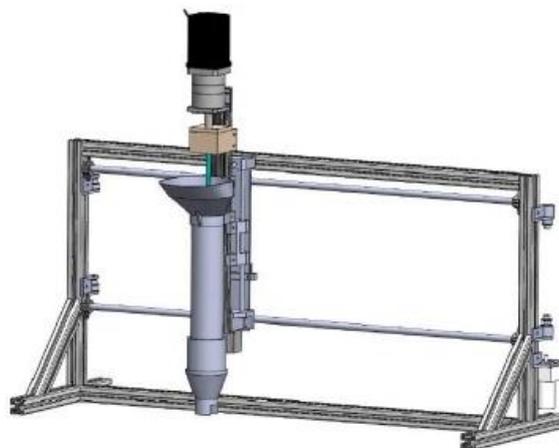


Figura 3.4- Impresora de concreto desarrollada por [109].

A pesar de que los sistemas de manufactura aditiva por deposición de material fundido (impresoras 3D) han sido fabricados empleando distintas configuraciones, entre las cuales las más comunes son el tipo delta y cartesiano [96,97,102], para los fines de esta investigación se centró el análisis en las impresoras del segundo tipo. Este tipo de dispositivos está configurado de manera que una combinación de cabezal de extrusión y plataforma o cama de construcción tengan movimiento en los tres ejes coordenados del sistema cartesiano (x , y , z), para la fabricación de piezas, capa por capa

[96,97,101,102], siendo el movimiento vertical (eje z) el que presenta el comportamiento análogo de interés para el sistema de recubrimiento para mallas propuesto.

La Figura 3.5 presenta el ejemplo de distintas configuraciones para impresoras 3D disponibles comercialmente. Las diferencias principales entre estas configuraciones radican en el número y ubicación de los motores que brindan desplazamiento a la cama de construcción en el eje z; así como la estructura o chasis que soporta y contiene a los elementos del sistema.

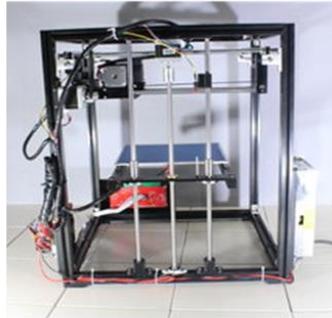
En el caso de la SCoreXY, la Tronxy X5 y la Ender 5 (incisos a), b) y c) de la Figura 3.5, respectivamente), se emplea una estructura cúbica, que brinda mayor estabilidad que las configuraciones “abiertas” como las de la Airwolf, Prusa i3 y Ender 3 (Figura 3.5, incisos d), e) y f) respectivamente). Una configuración que brinda buena estabilidad y menor número de piezas es la mostrada por los modelos de RepRap Mendel Max y BCN (Figura 3.5 g) y h), respectivamente).

Con base en las configuraciones de dispositivos para recubrimiento por inmersión y de impresoras 3D consultadas, se generaron algunas propuestas de disposición geométrica para el sistema de modificación de mallas para hernia abdominal, cuyas representaciones se muestran en la Figura 3.6. Una representación más completa, que incluye la vista frontal y lateral derecha de cada una de las propuestas de distribución geométrica generadas, se puede consultar en el Apéndice G.

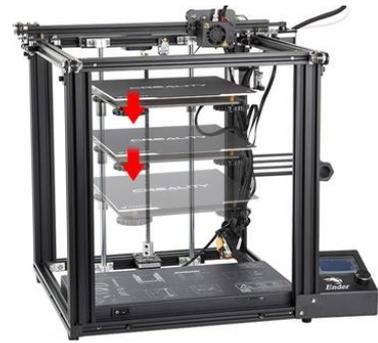
Para la elaboración de las propuestas de distribución geométrica (o *layout*) aproximadas, se tomaron en consideración de manera generalizada algunos aspectos como la proximidad más conveniente (en términos de la facilidad de conexión), entre los módulos de alimentación de energía y el de procesamiento respecto a los sistemas con los que interactúan; así como la mejor distribución de los elementos más pesados, como los motores, y otras características de la estructura que brinden un adecuado soporte, estabilidad y accesibilidad para colocar y retirar tanto el módulo de sujeción del sustrato, como el módulo del recubrimiento. Estos aspectos, entre otros, funcionaron como criterios de evaluación para la elección de la configuración a desarrollar, como se mencionará más adelante.



a)



b)



c)



d)



e)



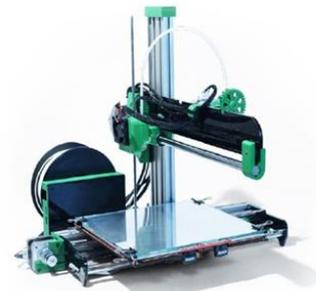
f)



g)



h)



i)

Figura 3.5- Ejemplos de configuración de impresoras 3D de tipo cartesiano [99,112,113,115-118].

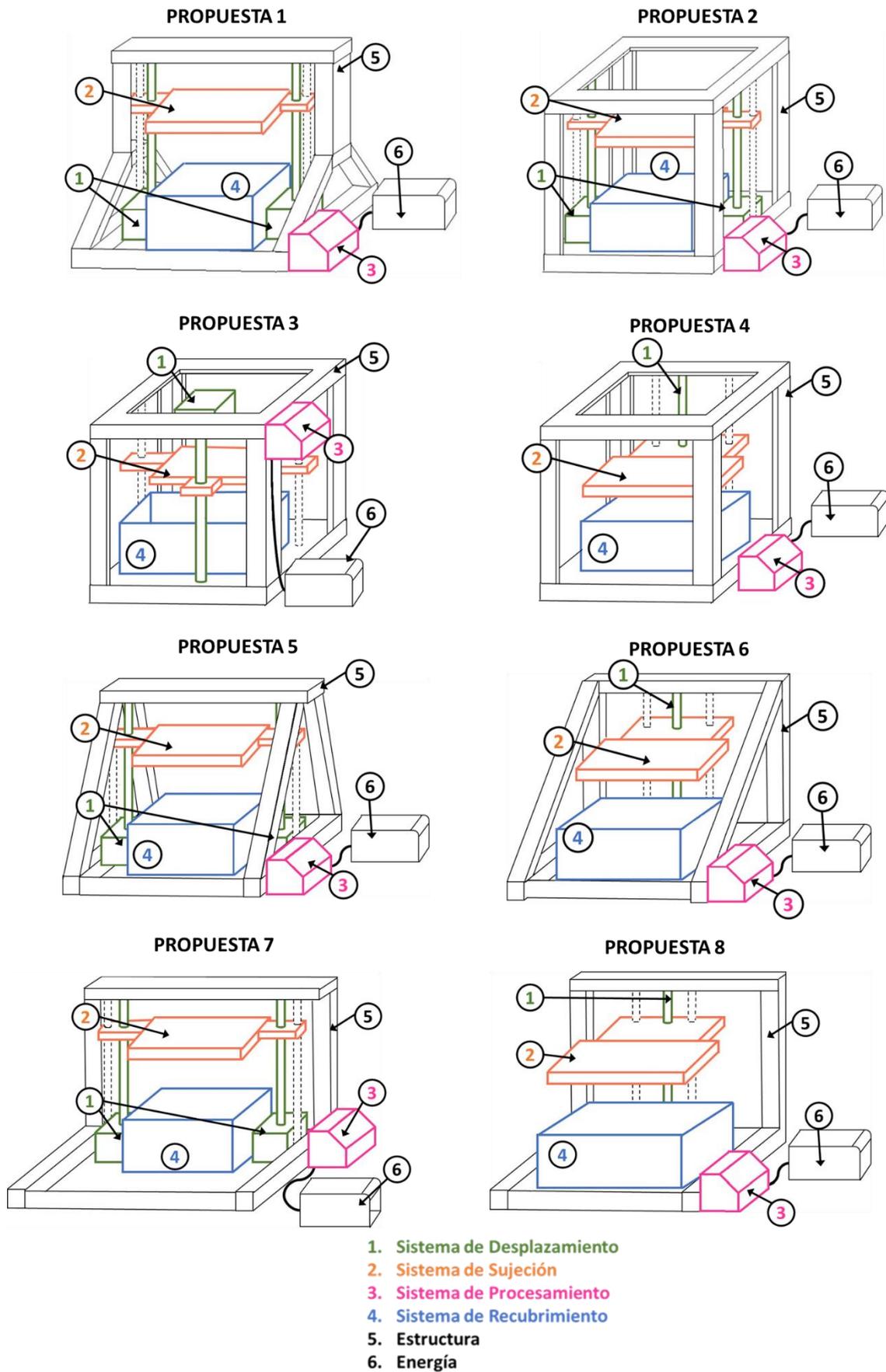


Figura 3.6- Propuestas de disposición geométrica para el sistema de modificación de mallas para hernia abdominal.

3.1.3 Identificación de las interacciones fundamentales e incidentales

Para poder proceder a la elección de la disposición geométrica del sistema, así como los elementos que compondrán cada uno de los módulos que lo componen, es necesario identificar y entender las interacciones fundamentales e incidentales que se pueden presentar entre los módulos.

Se entienden como *interacciones fundamentales* aquellas que se encuentran bien entendidas, que son planeadas y que resultan elementales para la operación del sistema, mientras que las *interacciones incidentales* son aquellas que resultan de la activación particular de elementos funcionales o el arreglo geométrico entre los módulos. De acuerdo con la literatura, existen cuatro tipos de interacciones posibles [84]:

1. Interacciones espaciales: conexiones físicas entre partes encontradas o móviles
2. Flujos de energía: intencionales o inevitables
3. Flujos de información: señales de control o realimentación del funcionamiento
4. Flujos de material

En la Tabla 3.1, presentada al inicio de este capítulo, se realizó una primera representación de las interacciones fundamentales entre los cuatro subsistemas principales que llevan a cabo la función del sistema para recubrimiento de mallas quirúrgicas, a través de la identificación del tipo de interfaz descrita en la última columna. Asimismo, las interacciones fundamentales se encuentran representadas en el esquema de arquitectura del sistema, donde se conectan los módulos indicando los tipos de flujos que existen entre ellos.

En cuanto a las interacciones incidentales, la literatura recomienda hacer uso de una representación distinta para su documentación. Cuando el sistema contiene en total menos de diez trozos o módulos, se recomienda emplear una herramienta conocida como **diagrama de interacción**, donde se representan por medio de recuadros los elementos físicos de cada módulo que interactúan con los demás, así como el uso de líneas con etiquetas de las interacciones que se dan entre ellos. Para sistemas más grandes (más de diez módulos), se recomienda emplear una **matriz de interacción**, para generar una representación más clara de las interacciones fundamentales e incidentales [32].

El sistema propuesto en el presente trabajo cuenta con menos de diez módulos, por lo que se generó un diagrama de interacción, el cual se muestra en la Figura 3.7.

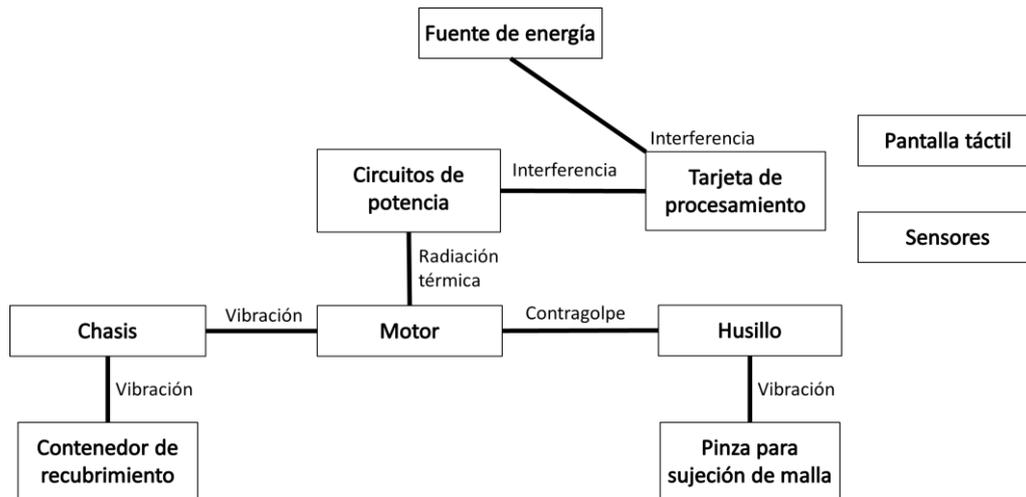


Figura 3.7- Diagrama de interacción del sistema para modificación de mallas quirúrgicas.

La identificación de estas interacciones resulta importante para estructurar el desarrollo del sistema, sirviendo como indicadores de criterios de evaluación entre las posibles configuraciones que se propongan.

Una vez identificados los módulos que componen al sistema, así como las interacciones entre ellos, se puede proceder al diseño de cada uno de ellos, de manera independiente, eligiendo los tipos, formas, dimensiones generales y ubicaciones de los componentes que los conforman, como se describe en la siguiente sección.

3.2 Diseño de configuración

El diseño de configuración tiene como finalidad el establecer la forma y dimensiones generales, así como la ubicación dentro del producto, de los componentes que conforman cada uno de los módulos de este [23, 84]. Para ello, se identifican cuatro tipos de componentes [84]:

- *Piezas de propósito específico:* elementos diseñados y manufacturados específicamente para un propósito en un producto específico.
- *Piezas estandarizadas:* elementos de función genérica manufacturados rutinariamente y sin ser de uso exclusivos en un producto específico.
- *Ensamblajes:* conjunto de dos o más piezas. Un ensamblaje que forma parte de otro ensamblaje se conoce como subensamblaje.
- *Ensamblajes estandarizados:* conjunto de piezas que es manufacturado de forma rutinario y tiene una función genérica.

La forma o configuración de los componentes de cada módulo se desarrolla a partir de la función que debe desempeñar. Así mismo, las formas posibles estarán sujetas tanto a los materiales y métodos de producción disponibles para la generación de las piezas, como a las restricciones espaciales determinadas por la arquitectura del producto y las dimensiones que lo envuelven [23, 84].

Para llevar a cabo el desarrollo del diseño de configuración del sistema propuesto en el presente trabajo, se siguieron las recomendaciones de la literatura [23, 84], resumidas en los siguientes pasos:

1. **Identificar los requerimientos y especificaciones cruciales para la materialización del cada subensamble (módulo):** revisión de los requerimientos y especificaciones del sistema que determinen dimensiones o tamaño, que determinen la disposición (flujos, movimientos, posiciones) y que determinen los materiales. También deben considerarse los requerimientos referentes a la seguridad, ergonomía, producción, ensamble, y reciclaje, ya que pueden afectar al tamaño, disposición y selección de materiales.

Para sintetizar este análisis, se generó la Tabla 3.2, donde se presenta la relación entre los requerimientos descritos en el diseño conceptual (Tabla 2.1) y los módulos identificados en la arquitectura del sistema (Figura 3.2).

2. **Identificar y establecer restricciones espaciales que limitan o determinen la materialización, por ejemplo:** holguras, posiciones axiales, requerimientos de instalación. Asimismo, deben considerarse restricciones de interacción con humano y correspondientes al ciclo de vida, como el acceso para mantenimiento, reparación, desmantelado y reciclaje, siempre y cuando resulten cruciales para el desarrollo del sistema. El desglose de las restricciones espaciales de cada módulo del sistema propuesto se presenta más adelante, con la descripción de cada uno de ellos.

MÓDULO	FUNCIONES	REQUERIMIENTO(S) RELACIONADO (S)
Sujeción	Recibir/ sujetar la malla Mantener tensión de la malla Mantener orientación de la malla	Que sostenga la malla Que mantenga posición del sustrato para generar capas uniformes
Recubrimiento	Contener solución Propiciar recubrimiento de la malla	Que pueda trabajar con material elegido Que pueda contener el material Que mantenga la posición del sustrato para generar capas uniformes
Desplazamiento	Convertir energía eléctrica en movimiento Acercar el sustrato a la solución Retirar sustrato de solución Mantener el sustrato en posición	Que pueda mover el sustrato y ponerlo en contacto con la solución Que mantenga posición del sustrato para generar capas uniformes Que el proceso sea repetible Que sea seguro Que sea rápido
Procesamiento	Ajustar comportamiento de sistema Activar actuadores	Que funcione de manera automática/programada Que el proceso sea repetible Que no sea muy complejo en cuanto a su operación
Despliegue de información	Indicar información del sistema/proceso Recibir información: parámetros del proceso	Que esté integrado en un solo dispositivo Que funcione de manera automática/programada Que no sea muy complejo en cuanto a su operación
Sensores	Indicar posición del sustrato	Que mantenga la posición del sustrato Que el proceso sea repetible Que funcione de manera automática/programada
Alimentación	Adecuar energía (voltaje/corriente) Brindar energía a los módulos del sistema	Que pueda mover el sustrato y ponerlo en contacto con la solución Que esté integrado en un solo dispositivo o tenga el menor número de elementos Que sea seguro Que no ocupe demasiado espacio Que consuma la menor cantidad de recursos energéticos
Estructura (chasis)	Contener los módulos del sistema Brindar soporte a sistema	Que mantenga la posición del sustrato Que esté integrado en un solo dispositivo/tenga el menor número de elementos Que sea seguro Que no ocupe demasiado espacio

Tabla 3.2- Relación de los módulos y sus funciones con los requerimientos del sistema.

3. **Generar propuestas de configuración para los elementos que llevan a cabo las funciones principales:**

El desarrollo de propuestas partiendo de la arquitectura del sistema, se deben identificar y poner atención en las interfases que transfieren las funciones críticas, creando y refinando las conexiones entre los componentes involucrados. Así mismo, los autores recomiendan analizar si se pueden eliminar o combinar distintas piezas entre los módulos; además de identificar si se pueden emplear piezas o ensambles estandarizados, los cuales deberán ser mostrados en forma simplificada.

Con respecto al sistema propuesto, únicamente los módulos correspondientes a la función de sujeción de la malla y el recubrimiento de la misma presentan componentes para los cuales no existen piezas o ensambles estandarizados, es decir, que requieren de la generación de piezas de propósito específico.

4. **Seleccionar una o más configuraciones adecuadas:** siguiendo un procedimiento similar al empleado en la etapa del diseño conceptual, se evalúan las propuestas de configuración para los elementos que llevan a cabo las funciones principales.

En la sección 3.2.2 se describe la evaluación realizada con respecto a las propuestas de configuración del sistema propuesto, considerando que, como describen los autores se deben evaluar las alternativas al mismo nivel de abstracción, con el fin de obtener seguridad de que el diseño funcionará [23, 84].

Las recomendaciones de [23, 84] incluyen más pasos dentro de la etapa de diseño de materialización, con el fin de concluir esta fase preparando la lista de partes y documentos de producción y ensamblaje preliminares correspondientes a la configuración definitiva, para pasar al diseño de detalle. Entre estos pasos se encuentran el desarrollo de propuestas de configuración detallados para los elementos que llevan a cabo las funciones principales y las auxiliares; la evaluación de dichas propuestas detalladas con respecto a criterios técnicos y económicos; y la optimización de configuración general preliminar, eliminando puntos débiles y errores de función, compatibilidad espacial y factores de perturbación [23, 84].

No obstante, estos pasos dependen de los resultados obtenidos de cálculos detallados y análisis experimentales que prueben la funcionalidad de la o las configuraciones propuestas. Debido a la compleja naturaleza del problema a resolver en este proyecto de investigación, así como a otras limitantes correspondientes a la falta de antecedentes y tiempo para el desarrollo de un análisis más completo, el desarrollo del diseño de configuración se limitó a los cuatro pasos enumerados anteriormente.

3.2.1 Propuestas de configuración

Para la generación de las propuestas de configuración se partió del análisis de los requerimientos relacionados con las funciones ejecutadas por cada módulo (Tabla 3.2). En esta sección se presenta una breve descripción del análisis de las restricciones espaciales para cada módulo, así como de los componentes que los conforman, con respecto a las funciones y requerimientos que les corresponden. La síntesis de las propuestas de configuración fue ilustrada por medio de bocetos que representan de manera generalizada sus dimensiones y ubicaciones.

En la generación de estas propuestas se consideró la actividad descrita por Ullman [84] como *refinamiento*, es decir, el desarrollo de mayor especificidad del objeto mientras se pasa de lo abstracto a la descripción detallada.

Módulo de Sujeción

El módulo de sujeción tiene como funciones el sujetar la malla, manteniendo tanto su tensión como orientación nivelada durante todo el proceso, desde su colocación hasta la retirada.

Como se describió en la etapa del Diseño Conceptual, el sistema de sujeción es el único que no cuenta con antecedentes ni referencias en el mercado, o en la investigación. Por esa razón, no se seleccionaron piezas estandarizadas para los componentes principales del módulo de sujeción, sino que se procedió a diseñar un sujetador para la malla. Dada su estrecha interacción con el módulo de desplazamiento, se consideraron las dimensiones y características de algunos componentes de ese módulo para la generación de las propuestas de configuración mostradas en la Figura 3.12.

Para el diseño de la pinza dentada correspondiente al elemento de sujeción, se tomaron en cuenta las consideraciones iniciales mencionadas en el punto 2.2.1 del diseño conceptual, donde se estableció que el sistema no debe modificar de manera significativa las propiedades mecánicas de la malla, además de permitir generar capas de espesor uniforme en todo el sustrato.

De acuerdo con las características del proceso de recubrimiento por inmersión, el ángulo de contacto del sustrato con la solución afecta al espesor de capa, por lo que se debe buscar que permanezca constante (nivelado) durante todo el proceso y en cada repetición del mismo.

También se debe procurar que el elemento de sujeción limite la menor cantidad de material del sustrato, pues para su aplicación, no pueden quedar zonas de la cara elegida sin recubrir.

La primera gran diferencia entre los sujetadores empleados en los equipos de dip coating y el diseño propuesto es que, dado que en los dispositivos comerciales se busca recubrir ambas caras con la solución, los sustratos usualmente se sumergen en posición vertical, siendo sujetos únicamente en uno de sus extremos por medio de una prensa; mientras que para la aplicación de la presente investigación se requiere que únicamente una de las caras de la malla sea recubierta, por lo que el sustrato debe ingresar a la solución en posición horizontal.

Tomando en cuenta las características de las pinzas dentadas disponibles comercialmente, mostrada en la Tabla 2.4 (alternativas de solución para el sistema de sujeción), se planteó el diseño de un sujetador de forma cuadrada, con dientes colocados en la proximidad del borde interior, como se muestra en la Figura 3.8, que fue un primer boceto del elemento de sujeción.

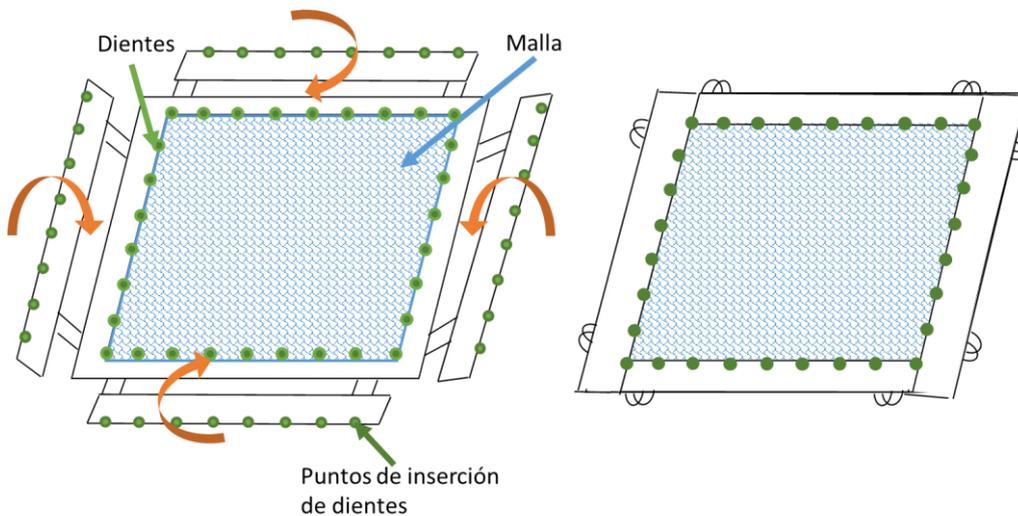


Figura 3.8- Primer boceto de elemento de sujeción para el sistema de modificación de mallas quirúrgicas.

Como se mencionó en el capítulo correspondiente a los antecedentes, existen diferentes tipos de mallas para la reparación de hernias abdominales, siendo su principal variación el tamaño del poro (espacio hueco del entramado). Si bien se decidió trabajar con las mallas definidas como *macroporosas* (tamaño de poro mayor a $75\ \mu\text{m}$), por ser las más empleadas en el procedimiento de hernioplastia en México, se emplearon muestras de $7.5\ \text{cm} \times 7.5\ \text{cm}$ de mallas con tres tamaños de poro distinto: $0.7\ \text{mm}$, $1.5\ \text{mm}$ y $2\ \text{mm}$, aproximada y respectivamente (Figura 3.9).

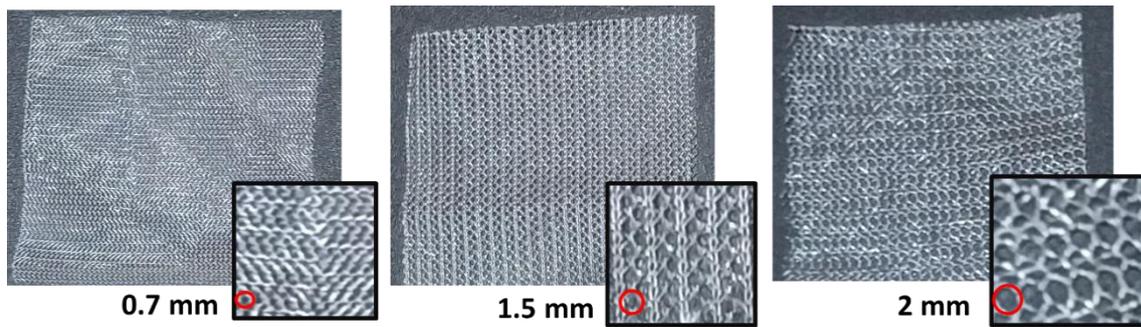


Figura 3.9- Muestras de mallas quirúrgicas para reparación de hernias con distintos tamaños de poro.

Con el fin de definir el número de dientes más adecuado, así como otros aspectos de la configuración de este elemento, se generaron una serie de modelos rápidos de función crítica, fabricados con cartón (Figura 3.10). Se trabajó inicialmente con las tres muestras mencionadas anteriormente. Una vez observada la configuración más conveniente en cuanto al número de dientes, se generó un modelo de 15 cm x 15 cm (Figura 3.11), con la malla de mayor tamaño de poro, al ser la más cercana al material final.

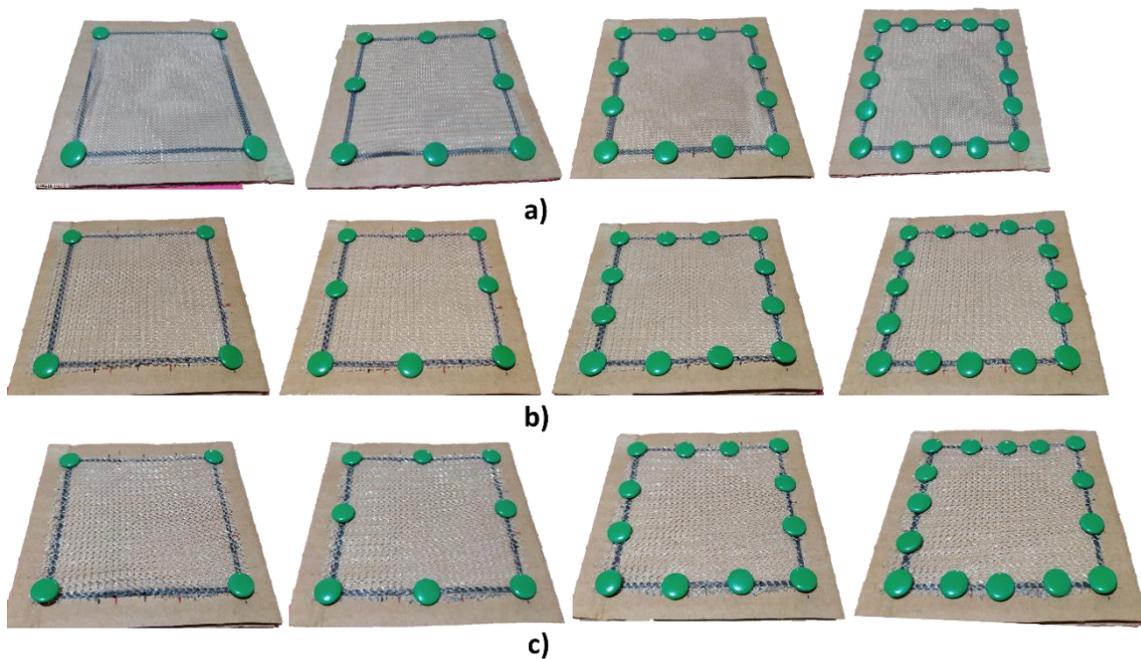


Figura 3.10- Prueba de puntos para tensión con modelos de cartón. Muestras de a) malla de poro de 0.7mm, b) malla de poro de 1.5mm y c) malla de poro de 2mm.

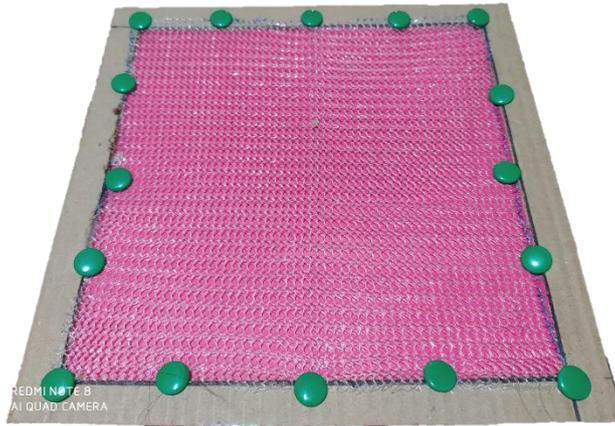


Figura 3.11- Modelo de cartón con puntos para tensión. Muestra de 15cm x 15cm, con malla de poro de 2mm.

Posterior a las pruebas con los modelos de cartón, se procedió a generar una serie de bocetos de configuración, mostrados en las Figuras 3.12 y 3.13, donde se incluyó la consideración de los puntos de adaptación o conexión con el módulo de desplazamiento, respectivamente.

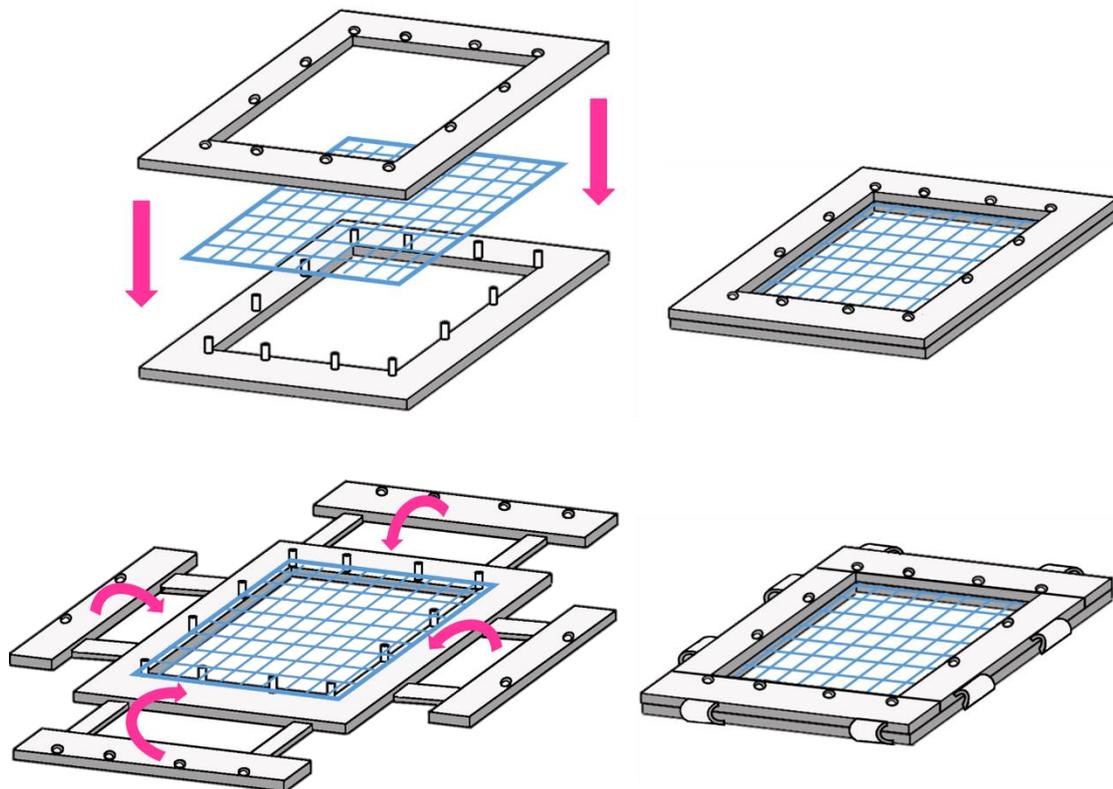


Figura 3.12- Propuestas de configuración del elemento de sujeción.

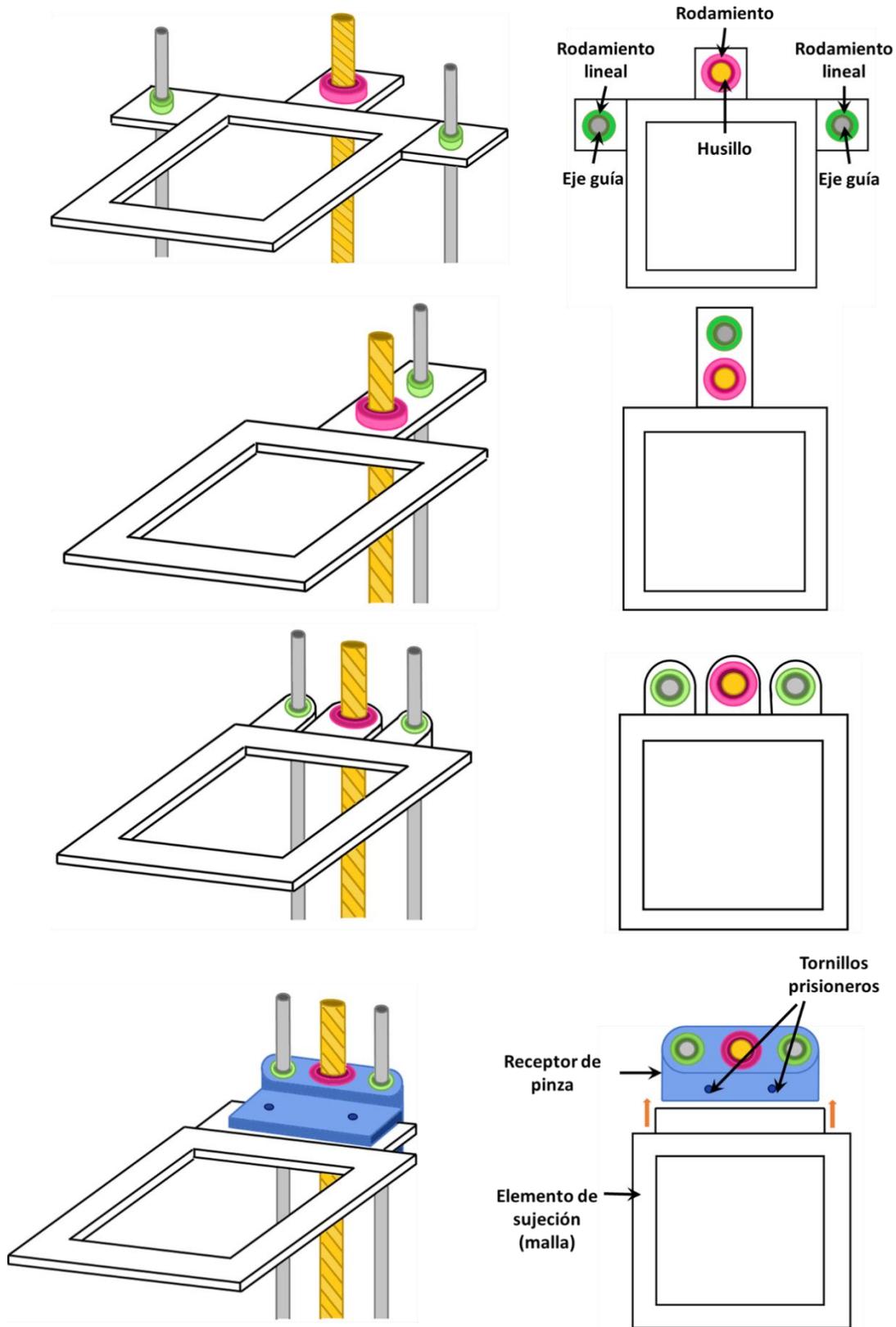


Figura 3.13- Propuestas de configuración para el módulo de sujeción con respecto al módulo de desplazamiento.

Módulo de Desplazamiento

El módulo de desplazamiento, junto con el de sujeción, es el encargado de llevar a cabo las funciones más importantes dentro del proceso de modificación de las mallas. Este módulo tiene como misión el convertir energía eléctrica en movimiento lineal, para el desplazamiento del sustrato, acercándolo y retirándolo de la solución; además de mantener la posición del sustrato, al inicio del proceso, durante el tiempo de inmersión y finalmente en el tiempo de secado.

Todo lo anterior con la finalidad de satisfacer los requerimientos de movimiento del sustrato, de manera repetible, segura y dentro de la velocidad de trabajo deseada, además de mantener el sustrato fijo en las posiciones adecuadas para generar capas uniformes de recubrimiento.

Para entender el comportamiento que debe tener el módulo de desplazamiento, es necesario hacer recuento de las características del proceso de recubrimiento por inmersión, el cual consiste básicamente de las etapas de *inmersión* (acercamiento del sustrato a la solución de recubrimiento), *asentamiento* (tiempo de espera donde se procura el contacto de sustrato y solución), *retirada* (retracción del sustrato o separación del mismo desde la solución) y *secado* (una vez fuera del contacto de la solución, tiempo de espera en lo que la capa de recubrimiento se seca) [43,45,48,54,59,60,65,66,92,95].

La generación de la capa de recubrimiento, así como la determinación de sus características como espesor, porosidad, e incluso microestructura, dependen principalmente de la inmersión y retirada del sustrato hacia y desde la solución, a una velocidad constante; siendo las dos etapas más críticas la retracción o retirada y el secado [48,54,59,65,66,89,90,92,95].

Por su parte, la etapa de la retirada del sustrato está definida a través de la interacción de varias fuerzas: las fuerzas de drenado (que buscan devolver el líquido desde el sustrato a la tina de solución, p.ej. gravedad) y las fuerzas de arrastre (que buscan retener fluido sobre el sustrato), siendo el balance entre estas fuerzas, manifestado en la creación de un menisco en la interfase del sustrato, solución y ambiente (Figura 3.14) quienes determinan el espesor de la película de recubrimiento sobre el sustrato [89,90,95].

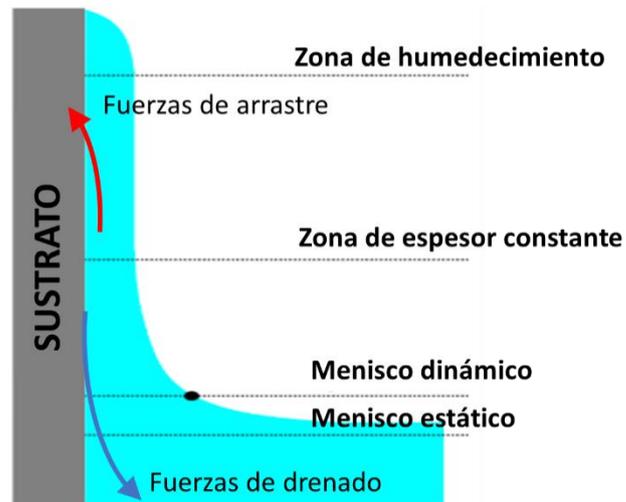


Figura 3.14- Interacción de fuerzas en etapa de retirada en el proceso de recubrimiento por inmersión. Imagen modificada de [95].

Entre los factores que afectan el proceso, definiendo la interacción entre las fuerzas mencionadas, se encuentran parámetros del proceso como la velocidad de retracción, tiempo de inmersión, ángulo de retirada, número de ciclos; características de la solución, como la viscosidad, densidad, tensión superficial, concentración, tasa de evaporación del solvente y presión de vapor; y algunas condiciones del entorno como el flujo de aire, temperatura y humedad [85,91,93-95,104,106].

Así mismo, la formación de las películas o capas de recubrimiento se da dentro de uno de tres distintos regímenes, determinados por la viscosidad de la solución y la velocidad de retirada: el **régimen de flujo viscoso**, que ocurre a altas velocidades y soluciones viscosas, y donde el espesor de la capa de recubrimiento se determina por la ecuación descrita por el modelo de Landau-Levich para fluidos Newtonianos (Ecuación 1); el **régimen de drenado**, que se da para velocidades mayores a 1 mm/s (60 mm/min) y en donde el espesor de la capa está determinado por la velocidad de retirada y las características de la solución (Ecuación 2); y el **régimen capilar**, a velocidades muy bajas, es decir menores a 0.1 mm/s (6 mm/min), donde la tasa de evaporación es más rápida que el movimiento de la "línea de secado" (desplazamiento de la solución sobre el sustrato) y el espesor de capa depende de la tasa de retirada, la tasa de evaporación y las propiedades del solvente (Ecuación 3) [85,86,88-91,93-95]

$$h_0 = c_1 \left(\frac{\eta U_0}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$h_0 = 0.944 \left(\frac{\sqrt[3]{\eta U_0^2}}{\sqrt[6]{\gamma_{lv}}} \right) \sqrt{\rho g} \quad (2)$$

$$h_0 = k_i \left(\frac{E}{L} \frac{1}{u} + Du^{2/3} \right) \quad (3)$$

Donde h_0 es el espesor de capa, c_1 es una constante relacionada a la curvatura del menisco (aproximadamente 0.8 para fluidos newtonianos), η es la viscosidad dinámica de la solución, U_0 o u son la velocidad de desplazamiento, ρ es la densidad de la solución, g es la constante gravitacional, γ_w es la tensión superficial de la solución, E es la tasa de evaporación de la solución, L es el ancho de la capa depositada, D y k_i son constantes características de la solución.

El comportamiento de la relación entre la velocidad de retirada y el espesor de la capa de recubrimiento, ilustrado en la Figura 3.15, muestra cómo en el régimen capilar, el incremento de la velocidad de retirada disminuye el espesor de capa, mientras que en la región de drenado las velocidades más altas producen espesores de capa más grandes. Asimismo, como se observa en la gráfica, en la intersección de ambas regiones, llamada región intermedia, se obtiene el mínimo espesor posible. En este punto, se requiere de ambas ecuaciones (2 y 3) combinadas para determinar el espesor [89,94,95].

Trabajar en el régimen capilar permite obtener capas gruesas con soluciones altamente diluidas, o con solventes de alta tensión superficial (como el agua), evitando problemas que se pueden encontrar en la región de drenado; sin embargo, trabajar con bajas velocidades puede presentar complicaciones como defectos (estriado) o inestabilidades en la película de recubrimiento [89,91,95]. Para evitar estos problemas se recomienda trabajar en el régimen de velocidades altas, incrementando la concentración de la solución y/o disminuyendo la temperatura ambiental [91,95].

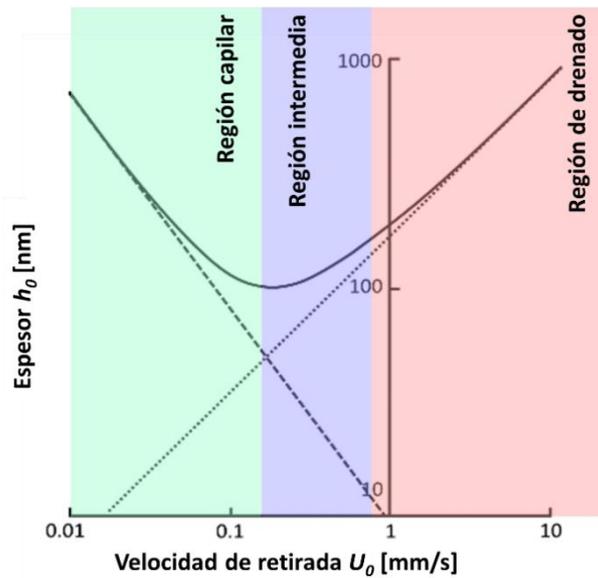


Figura 3.15- Relación de velocidad de retirada vs. espesor de capa. Modificada de [91,95].

Dado que el control sobre las características de la solución para el recubrimiento no se encuentra contemplado dentro de los alcances del presente trabajo, el análisis sobre la información anteriormente descrita, que sirvió como guía para la propuesta de configuración del módulo de desplazamiento, se enfocó en los aspectos de la velocidad de retirada del material, dentro del espectro mostrado en la Figura 3.15.

Considerando que los espesores de capa deseados para las mallas se encuentran dentro del rango de los micrómetros, es decir >1000 nm, se considera las velocidades menores a 0.01 mm/s (0.6 mm/min), para soluciones que deban trabajarse en el régimen capilar, y superiores a los 10 mm/s (60 mm/min) para soluciones que trabajen en el régimen de drenado.

De la etapa de diseño conceptual, se eligió como mecanismo de desplazamiento el sistema de tornillo (o husillo) y tuerca, empleado para convertir un movimiento rotatorio o giratorio en uno lineal, ya sea manteniendo la tuerca fija, lo que genera el desplazamiento lineal del tornillo, o manteniendo fijo el tornillo, desplazando linealmente la tuerca [140,143-146].

Este mecanismo es empleado principalmente en aplicaciones donde se requieren fuerzas de apriete o una desmultiplicación (reducción de revoluciones) muy grande, cuando se requiera controlar la precisión del desplazamiento lineal sobre distancias cortas o no sean permisibles las holguras de, por ejemplo, un acople con engranes [140,146].

El husillo (y la tuerca correspondiente) para desplazamiento se caracterizan por el número de filetes enrollados alrededor del núcleo (o dentro de la rosca de la tuerca), conocidos como **entradas (e)** y la distancia entre dos filetes consecutivos, o **paso de rosca (p)**; variando de acuerdo con la forma del perfil del filete (Figura 3.16), el número de filetes, el paso, y el sentido de giro [143,144]. Asimismo, el **avance (A)** está dado por la relación del paso por el número de entradas; mientras que la **velocidad de avance (vA o v)** estará dada entonces a través de la relación del avance por la **velocidad de giro (n)**, proporcionada por el motor [141,143,146]:

$$A = p * e \quad (4)$$

$$v_A = A * n = p * e * n \quad (5)$$

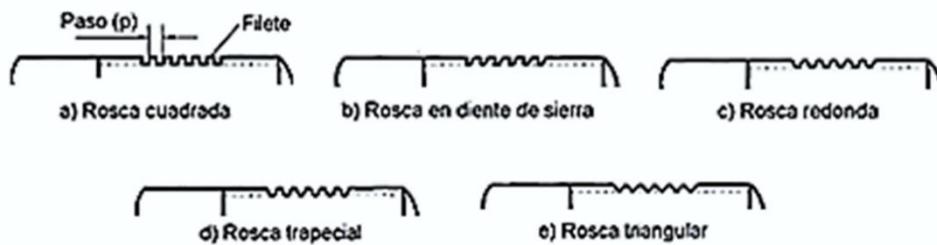


Figura 3.16- Tipos de rosca en husillos. (Imagen modificada de [143]).

En el caso del sistema propuesto, como se mencionó anteriormente, el valor de la velocidad de desplazamiento se obtendría de las ecuaciones del proceso de recubrimiento por inmersión, en función del espesor de capa deseado, así como las propiedades de la solución; de manera que se pueda obtener el valor de la velocidad de giro del motor necesaria, despejándola de la ecuación 5:

$$n = \frac{v_A}{A} \quad (6)$$

Para la generación de las propuestas de configuración del módulo de desplazamiento (Figura 3.21), se tomaron en cuenta algunas consideraciones del funcionamiento del mecanismo de husillo-tuerca descritas en la literatura, en especial las referentes a la generación de vibraciones. Estas recomendaciones indican que el husillo trabaje siempre lejos (por lo menos a l 85%) de su velocidad crítica o frecuencia natural de vibración, es decir, aquella frecuencia donde puede entrar en resonancia. Asimismo, se debe considerar que las cargas de compresión a las que esté sujeto el husillo, permanezcan por debajo de la carga máxima aplicable sobre el mismo [141,142].

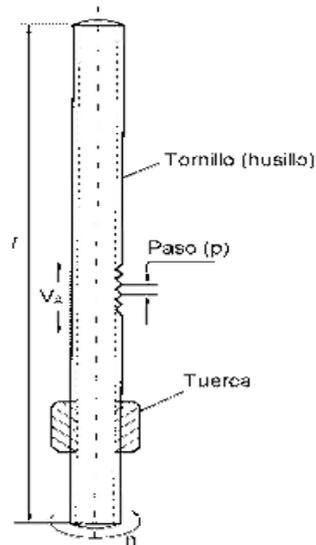


Figura 3.17- Elementos del mecanismo de desplazamiento tornillo-tuerca [143z].

Tanto la velocidad máxima admisible (velocidad máxima inferior a la velocidad crítica), determinada con la ecuación 7; como la carga máxima de pandeo (ecuación 8) dependen de factores de corrección que varían con el tipo de montaje del husillo. Este montaje puede ser uno de los cuatro mostrados en la Figura 3.18, donde lo que varía es el tipo de soporte empleado para ambos extremos del husillo. Dado que la longitud de este es usualmente determinada por la aplicación, cuando se quieren modificar la velocidad crítica, se suele modificar el tipo de soportes, así como el diámetro del husillo [141,142].

$$n_{ad} = n_{cr} \times f_{cr} \times v \quad (7)$$

Dónde:

n_{ad} = velocidad máxima permitida (en rpm)

n_{cr} = velocidad crítica (en rpm); según diámetro y longitud de husillo

f_{cr} = factor de corrección según tipo de montaje

v = coeficiente de seguridad (máximo 0.8)

$$F_{ad} = F_k \times f_c \times C \quad (8)$$

Dónde:

F_{ad} = carga máxima permitida

F_k = carga de columna; según diámetro y longitud de husillo

f_c = factor de corrección según tipo de montaje

C = factor de seguridad (entre 0.5 y 0.8)

Para el caso del sistema propuesto en el presente documento, se consideró que la configuración del husillo tuviera siempre por lo menos un soporte rígido, determinado por su unión con el motor, para la cual se propuso el empleo de un acople flexible de aluminio, como el que se ilustra en la Figura 3.19a. Este elemento proporciona gran rigidez torsional, es resistente ante químicos y aceites, no produce juego ni variaciones de velocidad en la transmisión, además de proteger a los ejes ante pares excesivos; y es recomendado para aplicaciones donde se debe transmitir el movimiento con precisión cinemática y sin errores de alineación [162].

Otros elementos importantes que fueron considerados para la configuración del módulo de desplazamiento fueron las varillas guía, empleadas para robustecer la estabilidad del mecanismo de desplazamiento, así como la orientación del elemento de sujeción (y por tanto del sustrato) durante el proceso de recubrimiento. Para reducir la fricción entre el eje (varilla) y la pieza móvil, así como garantizar la repetibilidad de su movimiento, se propuso el uso de rodamientos lineales (también conocidos como cojinetes o baleros), mostrados en la Figura 3.19b; ya que ayudan a eliminar fallos de alineación, además de mejorando la rigidez y posicionamiento del mecanismo de sujeción de la malla [147-149].

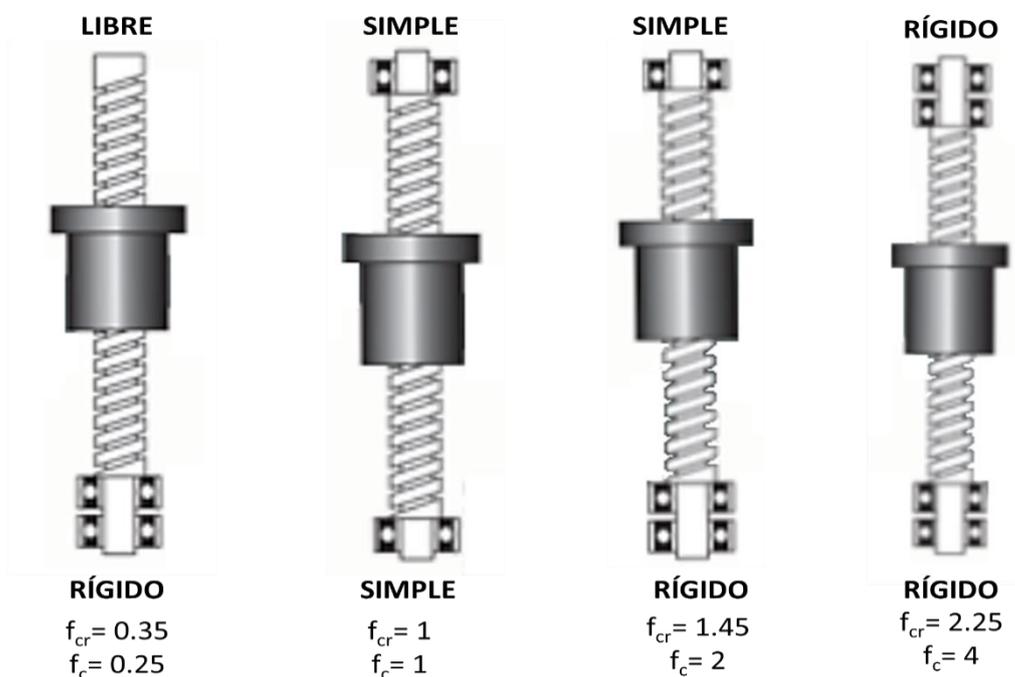


Figura 3.18- Tipos de montaje para el mecanismo husillo-tuerca y sus factores de corrección. (Modificada de [141,142]).



Figura 3.19 a) Acople flexible de aluminio, para unión del motor al husillo; b) rodamiento lineal, para el ajuste del elemento móvil a los ejes guía.

Un elemento fundamental del módulo de desplazamiento, que no fue considerado durante la etapa conceptual es el motor, que es el encargado de accionar el mecanismo de husillo-tuerca y así propiciar el desplazamiento del elemento de sujeción del sustrato.

Para el sistema propuesto, se eligió trabajar con un motor a pasos (también conocido como *stepper*, en inglés), el cual es un dispositivo electromecánico que convierte impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, en ambas direcciones, controlando así la cantidad de grados que gira y la velocidad en que lo hace [150,152,156-158].

Asimismo, otras de las ventajas que presentan los motores a pasos son su compatibilidad con controladores digitales, posibilidad de uso en lazo abierto (no requieren realimentación), su precisión y repetibilidad de posicionamiento, al poder controlar el incremento de giro y tener como característica un par de retención, es decir, un par estático que permite mantener la carga fija, a diferencia de los motores de corriente continua o servomotores [150,152,153,157,158].

Existen tres tipos fundamentales de motores a pasos: los de reluctancia variable (un rotor de hierro y un estator devanado, rota cuando los dientes del rotor se atraen por las bobinas del estator), los de imán permanente (tienen un imán sin dientes como rotor, magnetizado axialmente, la rotación se determina por el número de polos del estator), y los híbridos (combinan un imán concéntrico con estator y rotor dentados) [150,152,158]. A la vez, los motores a pasos de imán permanente se dividen en dos tipos, de acuerdo con el tipo de bobinado: los unipolares o unifilares y los bipolares o bifilares, difiriendo principalmente en el número de cables para su conexión, así como en la complejidad de su

control, siendo los segundos más complejos, pero quienes ofrecen una mejor relación de par-tamaño [150,152,158].

Para el presente proyecto se propone el empleo de un motor a pasos, de tipo bipolar, NEMA 17, nombre otorgado por la Asociación Nacional de Fabricantes Electrónicos (National Electrical Manufacturers Association), al referirse al tipo de motores a pasos con encapsulado estandarizado de área transversal de 1.7 x 1.7 pulgadas (Figura 3.20). Este motor tiene un ángulo de paso 1.8°, es decir, que completa un ciclo dando un total de 200 pasos, y es ampliamente utilizado en dispositivos de precisión como son las impresoras 3D y máquinas de CNC [160,161].

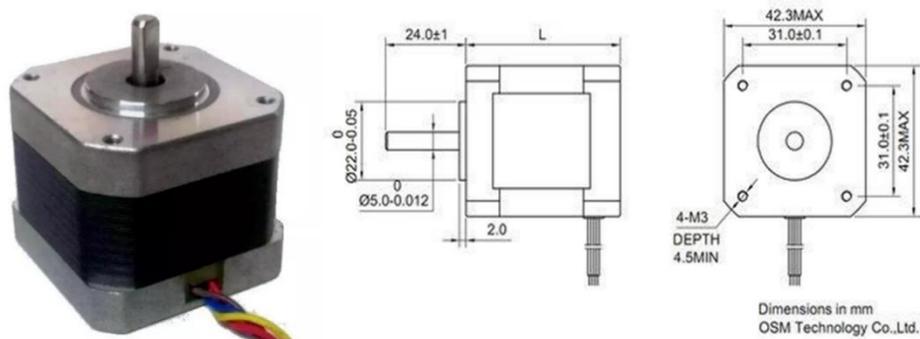


Figura 3.20- Motor paso a paso NEMA 17 [Brico, HetPro].

En cuanto al control del giro, los motores paso a paso requieren de un circuito que sea responsable de enviar los pulsos (número y tasa) para indicar el avance del motor, tanto en cantidad de grados o posición, como en velocidad. La **velocidad de rotación (N)** está definida por la ecuación 9, donde n_p representa el **número de polos** del motor y f la **frecuencia del tren de pulsos**, proveniente del controlador [150,153,157,158].

$$N = 60 * \frac{f}{n_p} \quad (9)$$

Existen cuatro formas principales para controlar este tipo de motores [152,157]:

- **Bobina simple o “wave drive”**: activa una bobina a la vez, genera menor par, pero consume menos energía.
- **Control de paso completo o “full step drive”**: siempre dos bobinas activadas, obteniendo el par máximo, buena velocidad, pero con un mayor consumo energético. Realiza el ciclo completo en la misma cantidad de pasos que el wave drive.
- **Medio paso o “half step drive”**: activa dos bobinas, primero una y posteriormente dos, obteniendo el doble de resolución, un movimiento suave y lento, con par y consumo energético intermedios.
- **Micropasos o “microstepping”**: el más utilizado en la actualidad. Proporciona una corriente variable y controlada, de manera que las fases no se encuentran nunca apagadas o prendidas totalmente, formando una onda cuasisenoidal en la bobina, obteniendo un movimiento suave, mucho más preciso, con buena resolución y menor consumo de energía, además de reducir el ruido mecánico y la vibración.

Debido a sus características y ventajas, se propone un control de micropasos para el motor del sistema descrito en el presente documento. Para lo anterior, se propone como elemento un controlador o *driver* A4988, que consiste en la integración de un circuito capaz de ajustar la corriente para el consumo del motor y su control por micropasos, logrando hasta una resolución de 1/16 de paso [154-156,159]. Este elemento cuenta también con protección térmica y a sobrecarga, por lo que funciona para dar cumplimiento al requerimiento de seguridad asociado con este módulo.

Tomando en cuenta los elementos y características descritas a lo largo de esta sección, se generaron las propuestas de configuración para el módulo de desplazamiento, que se muestran a continuación.

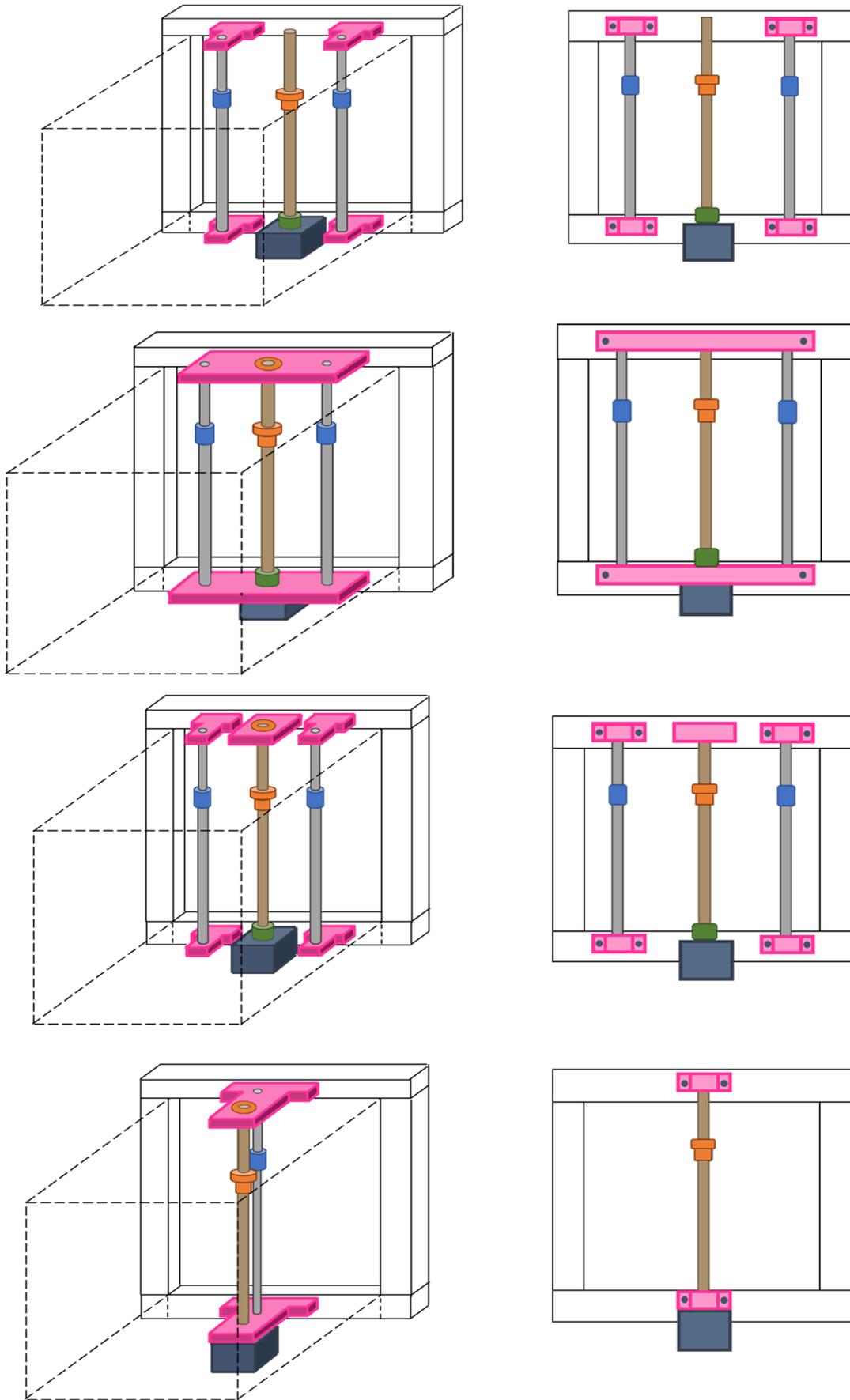


Figura 3.21- Propuestas de configuración del sistema de desplazamiento.

Módulo de Recubrimiento

Las funciones de este módulo son contener la solución y propiciar el recubrimiento de la malla. Asimismo, debe poder trabajar con el material elegido, es decir, poder contenerlo sin afectar sus propiedades y sin resultar afectado por el mismo material.

Con respecto al material recomendado para la fabricación del contenedor, se tomaron como referencia los contenedores empleados en los sistemas de dip coating disponibles comercialmente, para los que se han empleado principalmente materiales como vidrio borosilicato (vasos de precipitados) [95], acero inoxidable [62,128], polipropileno, policloruro de vinilo (PVC) y vidrio [132]. Si bien cualquiera de los materiales mencionados podrían trabajar con el material de recubrimiento propuesto (solución de politetrafluoroetileno), el vidrio borosilicato y el acero inoxidable resultan las alternativas más recomendables, debido a su mayor capacidad para trabajar con distintos materiales, además de soportar altas temperaturas como las empleadas en procesos de limpieza y esterilización.

Por otra parte, se considera como uno de los requerimientos asociados a este módulo, el mantener la posición del sustrato para generar capas uniformes, dado que, además de los parámetros mencionados anteriormente que afectan el espesor y calidad de la capa de recubrimiento, algunos aspectos como el ángulo de inmersión y retirada, así como la distancia entre la solución y el sustrato una vez ha sido retirado, pueden generar también afectaciones en la capa de recubrimiento.

De acuerdo con algunas investigaciones, es importante asegurar que la profundidad de la solución (o nivel de llenado) permanezca constante para lograr la repetibilidad y homogeneidad en las capas, pues la geometría del contenedor y el nivel de llenado pueden afectar a la presión de vapor que gobierna la tasa de evaporación del solvente durante la fijación del material en el sustrato [91,94].

El valor específico de la distancia que debe existir entre el sustrato y la superficie de la solución, además de la cantidad de material necesario para el recubrimiento son variables y dependientes de las características de la solución en particular, por lo que no se pueden definir de manera específica dentro de los alcances del presente documento. Sin embargo, se consideraron algunos factores para las propuestas de configuración del módulo de recubrimiento, mostradas en la Figura 3.22, como la recomendación de mantener un volumen de solución significativamente mayor que el volumen del sustrato, así como el limitar del desplazamiento del módulo de sujeción hasta la ubicación determinada para la etapa de inmersión, asociando de tal manera el módulo de sensores con el módulo de recubrimiento, como se menciona más adelante.

Debido a que se busca generar un recubrimiento únicamente en una de las caras de la malla, no se puede considerar el valor de su espesor para calcular el volumen del sustrato y, por tanto, el volumen de solución, pero se puede suponer que cualquier volumen mayor al ocupado por el sustrato sería adecuado para cumplir con la recomendación.

Así mismo, por practicidad, no se propone la generación de distintos contenedores para los distintos tamaños de malla, sino que se consideró el volumen más grande posible, correspondiente a las mallas de 30 cm x 30 cm y 0.8 mm de espesor (72 cm^3) como volumen mínimo a considerar para el diseño del contenedor.

Otros aspectos considerados para la configuración del sistema de recubrimiento fueron que, como se definió en el diseño conceptual, el contenedor debe permanecer fijo durante el proceso de recubrimiento, pero permitirse su llenado y vaciado por aparte. De igual modo, aunque en la descripción del módulo de estructura se propusieron soluciones para evitar vibraciones indeseadas sobre el módulo de recubrimiento y el resto del sistema, se sugiere agregar al contenedor elementos como una base completa o regatones de silicón, para su estabilidad.

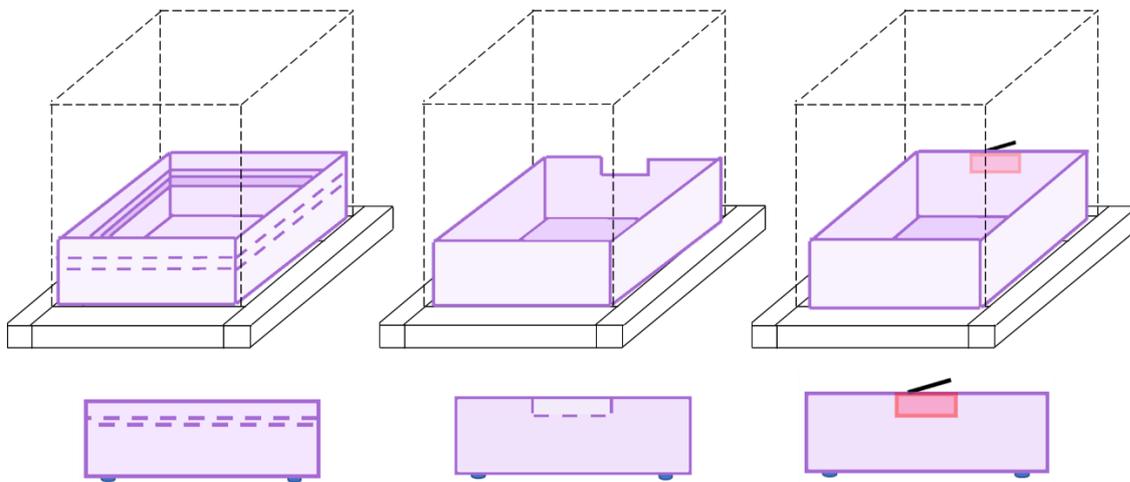


Figura 3.22- Propuestas de configuración del módulo de recubrimiento.

Módulo de Procesamiento

El módulo de procesamiento es el encargado de recibir la información provista por los usuarios a través del módulo de despliegue de información, para ajustar el comportamiento del sistema, es decir, el número de repeticiones del proceso, la velocidad de desplazamiento (inmersión y retracción) y tiempo

de reposo en las etapas de inmersión y secado. Asimismo, tiene la función de identificar el estado de la posición del sustrato a través de recibir información por parte del módulo de sensores.

La finalidad de contar con un módulo de procesamiento es el buscar la automatización del funcionamiento del sistema, a través de la programación de los parámetros necesarios, para obtener un proceso repetible.

Para este módulo, se consideró como elemento físico la tarjeta de desarrollo Arduino UNO, pues es un dispositivo que ha sido probado para gran cantidad de aplicaciones, entre las cuales se incluyen el control de motores a pasos (como el empleado en el módulo de desplazamiento), la recepción de información proveniente de una gran variedad de sensores, así como la fácil generación de interfaces de interacción con los usuarios.

La tarjeta de desarrollo Arduino UNO (Figura 3.23), cuenta con catorce entradas/salidas de tipo digital, así como seis entradas de tipo analógico y seis entradas/salidas digitales con modulación de ancho de pulso, las cuales resultan suficientes para administrar la información del proceso y la conexión de los elementos descritos en los módulos correspondientes, a una velocidad de reloj de 16 MHz [127].



Figura 3.23- Tarjeta de desarrollo Arduino UNO [127].

Con respecto a las alternativas de configuración de este módulo, mostradas en la Figura 3.24, se enfocaron en la representación de distintas formas de instalación de la tarjeta y su conexión con los elementos de otros módulos que interactúan con ella, principalmente el elemento del módulo de despliegue de información, así como el controlador para el motor. Por dicha razón, ambos elementos son representados en las configuraciones de la Figura 3.24, y no se presentan bocetos específicos para ellos, en sus respectivas secciones.

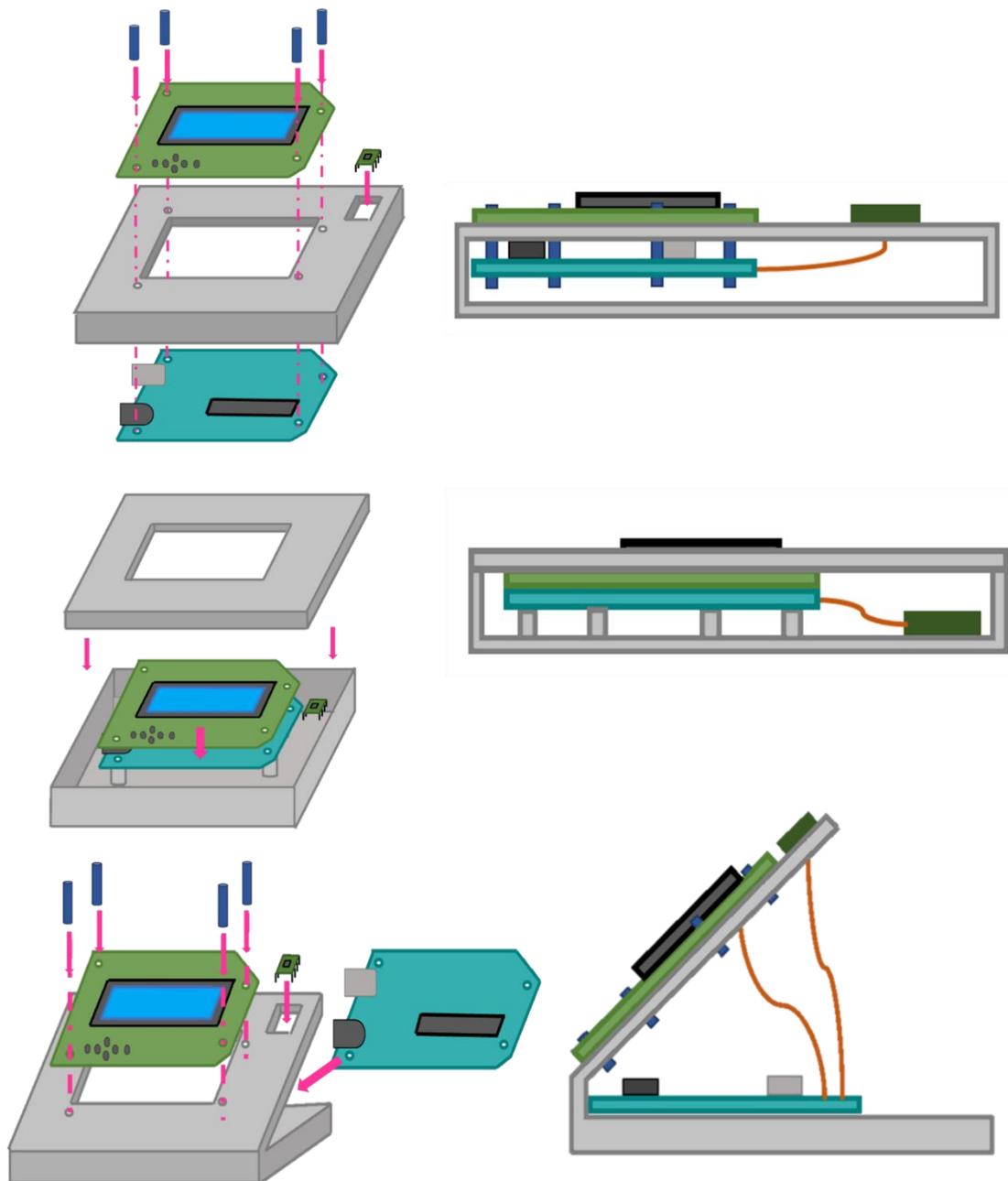


Figura 3.24- Propuestas de configuración del módulo de procesamiento, junto con el elemento de despliegue de información y el controlador del motor.

Módulo de Sensores

Para los fines de esta primera propuesta del sistema, se consideró que la única función del módulo de sensores (indicar posición del sustrato), correspondiera únicamente al inicio y fin de la carrera del mecanismo de desplazamiento, es decir, a la identificación de la posición de arranque o inicio donde se coloca la malla; y del momento en que el elemento de sujeción (con el sustrato) alcance el lugar determinado para aplicación del recubrimiento.

Se eligieron los sensores de final de carrera o interruptores de posición como elementos para el módulo de sensores, con base en la similitud de comportamiento con los dispositivos de impresión 3D y máquinas de CNC, y dado que para esas aplicaciones su utilidad ha sido comprobada. La Figura 3.25 muestra algunos ejemplos de sensores de fin de carrera.

Estos sensores electromecánicos detectan la posición de un elemento móvil por medio del accionamiento mecánico y requieren del contacto con el objeto para detectar su llegada a una determinada posición, dando como salida una señal binaria, que indica si el objeto está en la posición determinada o no [119,121].

Todos los finales de carrera consisten en tres partes bien diferenciadas para su funcionamiento: el cabezal (que transforma movimiento del accionador en movimiento de contacto eléctrico), el cuerpo del interruptor que contiene al bloque de contactos eléctricos de fin de carrera, y la base, que contiene la conexión de los bloques. Sin embargo, es importante considerar bien las características mecánicas para elegir al sensor, pues indican la dirección, la velocidad, fuerza y par del momento de contacto entre el sensor y el objeto a detectar.

Es entonces importante considerar el número de contactos, tipo de accionamiento, tipo de conector, cuerpo, número de maniobras y el ajuste a los recorridos y características de la aplicación [119]. Con base en dichas características, se pueden identificar distintos tipos de finales de carrera: según su mecanismo actuador (lineales y angulares), el material del cuerpo (metálico o termoplástico) número de entadas (1, 2) y tipo de contactos (ruptura rápida/brusca o lenta/progresiva) [121].



Figura 3.25- Ejemplos de sensores de fin de carrera.

En el caso del sistema propuesto, se requiere que el sensor envíe la señal para detener el movimiento del dispositivo de sujeción, exactamente al llegar al punto de contacto con la solución de recubrimiento. Asimismo, se requiere que el sensor no entorpezca dicho contacto, además de que registre cuando el

dispositivo de sujeción (y por tanto el sustrato) ya no se encuentre en contacto con el sistema de recubrimiento. Por lo anterior, se decidió emplear sensores de fin de carrera de contacto de ruptura brusca, que se caracterizan por tener puntos de activación y desactivación distintos, así como independencia entre la velocidad del desplazamiento de los contactos móviles y el elemento de control, permitiendo un desempeño satisfactorio aún a velocidades bajas [119,122].

Considerando como criterios para seleccionar un tipo de interruptor la precisión o repetibilidad de la activación del interruptor, la distancia de contacto y el rechazo de ruido [120], se seleccionaron los finales de carrera como el que se muestra en la Figura 3.26, debido a que alcanza una precisión de conmutación de ± 0.01 mm como la mayoría de interruptores, proporcionada por su brazo de palanca, que es de longitud suficiente para brindar buena distancia de contacto, sin afectar a su activación. Asimismo, este interruptor incluye una conexión por medio de tres cables, recomendada para reducir el ruido, además de venir montado ya en una placa que facilita su unión a la estructura del sistema.

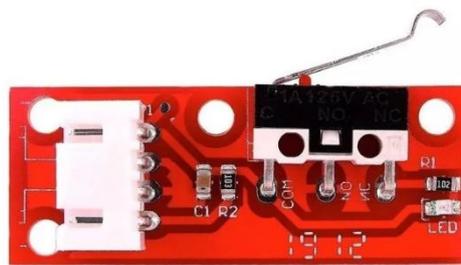


Figura 3.26- Interruptor de fin de carrera [123]

Los bocetos de configuración que se muestran en la Figura 3.27 se limitan a presentar las posibles ubicaciones de los sensores de posición, siendo las tres alternativas pensadas: sobre la estructura, sobre el elemento de unión entre el módulo de desplazamiento y el de sujeción, y en unión con el módulo de recubrimiento. En todas las propuestas se ubican los sensores más cercanos a la parte posterior del dispositivo, para reducir la posible distancia entre los sensores y el módulo de procesamiento.

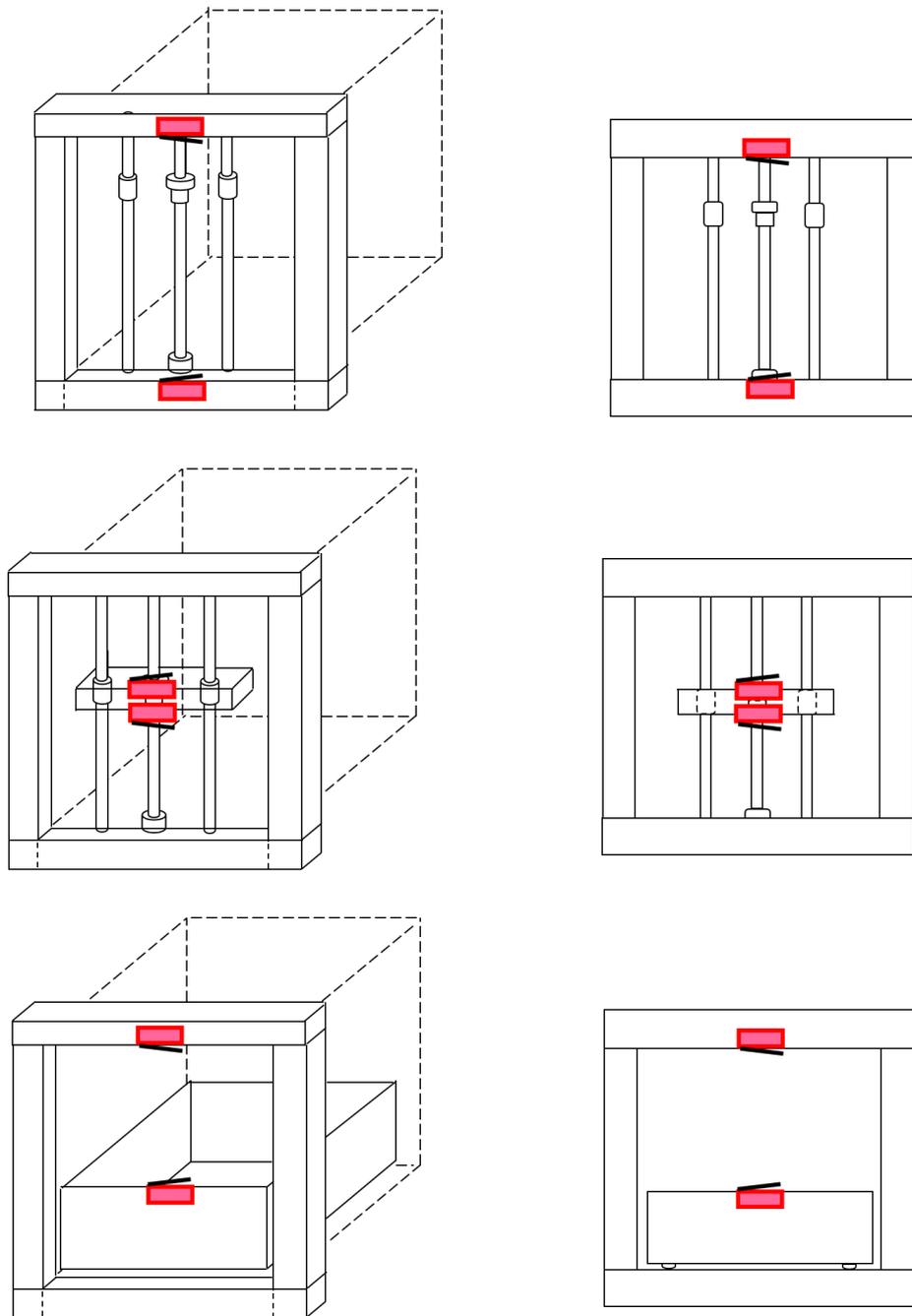


Figura 3.27- Propuestas de configuración del módulo de sensores.

Módulo de Despliegue de información

En el caso del módulo de despliegue de información, como dice su nombre, sus funciones corresponden a la visualización acerca de la posición o etapa del proceso en que se encuentra el sustrato (señal emitida por el sensor de fin de carrera); así como servir de receptor para la información dada por el usuario (parámetros del proceso).

Tomando como referencia los parámetros que controlan la mayoría de los dispositivos de dip coating (sección 3.1), se definieron como posibles datos de entrada la velocidad de inmersión, la velocidad de retracción, el tiempo de inmersión y el número de repeticiones del proceso.

Asimismo, se consideraron como datos a desplegar como estado del sistema la etapa del ciclo en que se encuentra el sustrato, tomando como referencia las cuatro principales etapas del proceso de recubrimiento por dip coating: inmersión, asentamiento, retracción o retirada y secado [92,95].

Debido a la poca cantidad y complejidad de la información solicitada tanto para el ingreso de datos como para el despliegue del estado del sistema, así como de la intención de satisfacer los requerimientos asociados a este módulo (que esté integrado en un solo dispositivo, que funcione de manera automática/programada, que no sea muy complejo en cuanto a su operación); se propuso emplear un escudo (o *shield*) que incorpora una pantalla de cristal líquido (o LCD) con un teclado de botones, como el que se muestra en la Figura 3.28.

Este dispositivo permite la generación de una interfaz gráfica de usuario (o GUI por sus siglas en inglés), de baja complejidad, proporcionando interacción con el módulo de procesamiento a través de los botones integrados en la tarjeta para el registro de los datos por parte del usuario; así como la presentación de información en cadenas de texto para el despliegue del estado del sistema, a través de la conexión por protocolo I²C. Además de que su costo no es muy elevado, se pueden conseguir en varios tamaños y configuraciones (usualmente 16x2 o 16x4 caracteres x líneas), son de bajo consumo y muy prácticos [124].

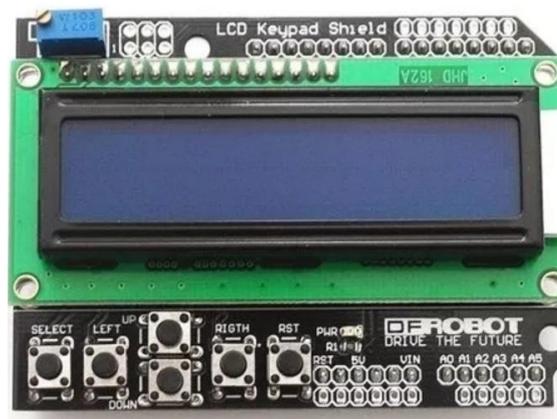


Figura 3.28- Dispositivo de pantalla de cristal líquido.

Las configuraciones mostradas en los bocetos de la Figura 3.24 consideran algunas de las posibles formas de instalación del shield para despliegue de información. Teniendo en cuenta que el dispositivo elegido es una pieza estandarizada, desarrollada para su conexión directa con la tarjeta de desarrollo Arduino, los bocetos que se presentan consideran la instalación de ambos componentes en conjunto.

Módulo de Alimentación de energía

Este módulo tiene como función el brindar energía a los módulos del sistema que lo requieran, siendo otra de sus funciones la adecuación de la energía, en términos del voltaje y/o corriente necesario para el correcto funcionamiento de los componentes.

Como se observa en la lista de requerimientos mostrada en la Tabla 3.2, este módulo tiene interacción con los módulos de desplazamiento y procesamiento (considerando sensores y despliegue de información), de manera que se analizaron los requerimientos de energía de los componentes descritos en tales módulos, para la elección de los elementos que lo conforman, así como de su configuración.

Con respecto al módulo de desplazamiento, el motor propuesto funciona con alimentación tanto de fuentes de 12V a 3.4A, como fuentes de 24V a 1.8A, de acuerdo con la información del proveedor [125].

Por otra parte, el módulo de procesamiento, descrito anteriormente, consiste en la tarjeta de desarrollo Arduino UNO, la cual tiene como características técnicas un voltaje de operación de 5V, siendo el voltaje de alimentación recomendado de 7-12 V. Asimismo, proporciona un voltaje de 5V y una corriente directa máxima de 20 mA en sus pines digitales (50mA en el pin de 3.3V). Dado que estos valores no resultan suficientes para la activación del motor del módulo de desplazamiento, se incorporó un elemento controlador o *driver* de tipo A4988 (Figura 3.29), el cual opera de 8-35V con hasta 2A de salida.

Los sensores de final de carrera tienen especificado un voltaje de funcionamiento de 5-12V, considerando un voltaje mínimo de entrada de 3V, mismo que puede ser provisto por la tarjeta Arduino.



Figura 3.29- Driver A4988 para controlar motor a pasos [126].

Los requisitos energéticos mencionados, en conjunto los requerimientos del sistema asociados a este módulo, los cuales establecen la necesidad de utilizar el menor número de elementos, de garantizar la seguridad y ocupar el menor espacio posible; fundamentan la elección de una fuente de poder, como la que se muestra en la Figura 3.30.

Esta fuente tiene como características energéticas una entrada de 115/230 V a 7/4A (60/50 Hz), disponible al conectarla directamente a la línea de electricidad; mientras que provee voltajes de salida de +5V, +12V, - 12V y +3.3V, con hasta 40A, 16A, 0.8A y 14A respectivamente, suficientes para satisfacer los requisitos de los elementos conectados a ella. El consumo de energía de la fuente de poder es de aproximadamente 70Wh en operación y 3Wh en modo de espera, lo cual satisface el requerimiento de consumo de menor cantidad de recursos energéticos.

Como se puede observar en las posibles disposiciones geométricas ilustradas en la Figura 3.6, el módulo de alimentación de energía, representado por la fuente de poder, se considera un elemento externo al sistema en general, por lo que no se generaron propuestas de configuración. Es importante resaltar que, si bien el componente de controlador para el motor fue descrito como parte del módulo de alimentación de energía, es considerado en los bocetos de configuración en conjunto con los módulos de procesamiento y despliegue de información, debido a su conexión directa con los elementos correspondientes.



Figura 3.30- Fuente de poder [125]

Módulo de Estructura (Chasis)

Las funciones de este módulo consisten en brindar soporte a todo el sistema, además de contener o acomodar a los demás sistemas.

A pesar de que la estructura no fue considerada durante la etapa de diseño conceptual, existen varios requerimientos asociados a este módulo, principalmente la restricción del espacio, la integración del sistema en un solo dispositivo y la seguridad, así como el mantener la posición del sustrato a lo largo del proceso.

Para la propuesta de la configuración de la estructura se recurrió a la comparación con los dispositivos de dip coating e impresión 3D, descrita anteriormente en la generación de alternativas de disposición geométrica (Figura 3.6), a partir de las cuales se identificaron posibles disposiciones geométricas para la estructura.

Por otra parte, como se identificó en la literatura, las vibraciones generadas por el mecanismo de desplazamiento y que pueden ser transmitidas por medio de la estructura al resto del sistema, afectando la precisión y uniformidad de los recubrimientos, resultan un aspecto de alta importancia, sobre el cual la mayoría de fabricantes (comerciales e investigadores) de sistemas de recubrimiento por inmersión e impresoras 3D se enfocan al diseñar la estructura de los dispositivos [101,103,104,106].

Con el fin de resolver el problema de vibración, además de proponer estructuras con formas cúbicas o trianguladas, que proporcionen mayor rigidez [84,101,135], algunas de las sugerencias encontradas en la literatura indican la colocación de los dispositivos sobre superficies completamente planas [101,135], verificar la holgura de los ejes de transmisión [133], reducir el peso cargado por elementos móviles y aumentar peso de elementos fijos [133,135], colocar amortiguadores o *dampers* (de corcho) entre los soportes y los motores [136,137], eliminar cargas en la parte superior de la estructura (motores, fuentes de energía o material) [101,133,135] e incorporar soportes de hule, acolchados o bases antivibración [106,139].

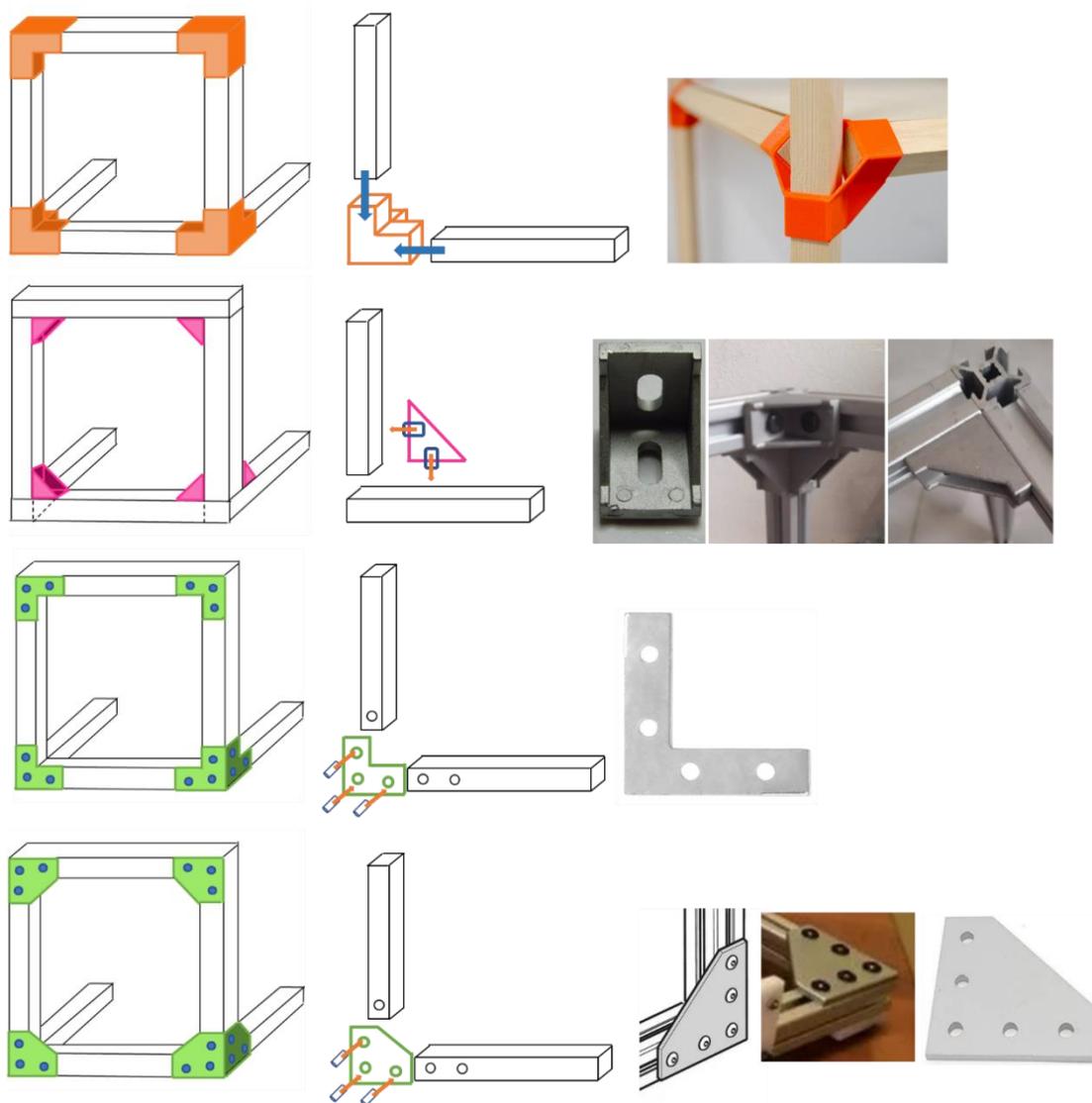


Figura 3.31 – Propuestas de configuración módulo de estructura.

Con respecto a los materiales para la fabricación, se han empleado estructuras metálicas (aluminio, acero), de madera o derivados (MDF), e incluso de algunos plásticos como el polimetilmetacrilato (metacrilato o acrílico), en la fabricación de estructuras para dispositivos de manufactura por filamento fundido y recubrimientos por inmersión [101].

Para el presente trabajo se optó por la utilización del aluminio, dado que brinda mayor rigidez y resistencia a la deformación que la madera o el plástico, además de resultar más económico y ligero que el acero. Otras ventajas en cuanto a la utilización del aluminio es la amplia disponibilidad de distintos tipos de perfiles y el posible aislamiento de interferencia electromagnética debido a su característica de material no ferromagnético.

Los bocetos mostrados en la Figura 3.31 ilustran las posibles configuraciones planeadas para el sistema propuesto. Las propuestas mostradas se limitan a representar algunas formas de unión de las secciones de perfil de aluminio para generar la estructura completa, las cuales podrían ser usadas en la mayoría de las disposiciones geométricas que se mostraron en la Figura 3.6.

Para todas las configuraciones propuestas se asume que el material a emplear es perfil estructural de aluminio. Asimismo, se presenta una imagen de las posibles piezas estandarizadas o de propósito específico que deberían ser diseñadas.

3.2.2 Selección de la configuración del sistema

De acuerdo con las recomendaciones para el análisis de los diseños de configuración, para la elección de la configuración del sistema lo primero que se debe hacer es considerar el grado en que la propuesta satisface los requerimientos funcionales, por medio de una evaluación similar a la empleada durante la selección de concepto [27].

Para ello, se procedió a evaluar las configuraciones propuestas para cada módulo, utilizando como criterios los requerimientos asociados a cada uno (mencionados en la Tabla 3.1), junto con algunos criterios pertinentes, similares a los empleados en el trabajo realizado por Peña [101], principalmente enfocados en la estructura, como la facilidad de construcción o montaje, facilidad de implementación o diseño (circuitos, software, etc.), cantidad de elementos necesarios, rigidez, posibilidad de modificar o incorporar elementos, accesibilidad (para supervisar y manipular), entre otras.

La Tabla 3.3 resume los criterios empleados en la evaluación de cada módulo, así como la configuración elegida. El desarrollo e integración de dichas configuraciones en el sistema completo, se describen e ilustran en el modelo tridimensional (modelo CAD), que se presenta en el siguiente capítulo.

MÓDULO	CRITERIOS PARA SELECCIÓN	CONFIGURACIÓN ELEGIDA
Sujeción	<p>Capacidad para soportar la malla</p> <p>Facilidad de soporte</p> <p>Tensión generada</p> <p>Capacidad para mantener posición del sustrato</p> <p>Adaptación a distintos tamaños de malla</p> <p>Facilidad de interacción con módulo de desplazamiento</p> <p>Grado de intervención humana</p>	
Recubrimiento	<p>Capacidad para trabajar con material elegido</p> <p>Volumen para contener solución</p> <p>Capacidad de detener el sustrato en posición</p> <p>Estabilidad</p> <p>Facilidad de aseo</p>	
Desplazamiento	<p>Estabilidad de desplazamiento</p> <p>Capacidad de mantener el sustrato en posición deseada</p> <p>Facilidad de instalación</p> <p>Facilidad de interacción con módulo de sujeción</p> <p>Accesibilidad para reparación</p> <p>Susceptibilidad a vibraciones</p>	
Procesamiento, Despliegue de información y sensores	<p>Accesibilidad</p> <p>Seguridad en su instalación</p> <p>Facilidad de instalación y/o extracción</p> <p>Proximidad con elementos relacionados</p>	
Estructura (chasis)	<p>Rigidez</p> <p>Estabilidad (capacidad de mantener los elementos en posición)</p> <p>Capacidad de ser modificado (tapas, sensores, etc.)</p> <p>Seguridad</p> <p>Accesibilidad para con elementos internos</p>	

Tabla 3.3- Selección de configuraciones.

IV. MODELOS DEL SISTEMA

Una vez decidida la arquitectura y definida la configuración de los componentes de cada módulo, es necesario validar que las decisiones tomadas a lo largo del proceso de diseño funcionarán de la manera esperada [84, 23, 32]. Para ello, se requiere la generación y prueba de **modelos**, que son aproximaciones del producto en una o más dimensiones de interés, describiendo las alternativas de diseño elegidas, de manera suficientemente detallada para medir adecuadamente su comportamiento y otras características [32, 84].

La generación de modelos tiene usualmente dos objetivos: validar el grado en que el diseño satisface los requerimientos y especificaciones, así como generar posibles fallas u observar posibles causas de falla [84]. Además, los modelos no sólo ayudan a asegurar la confiabilidad del diseño, sino que pueden reducir el número de iteraciones, disminuyendo costos y tiempo de producción, así como reestructurar dependencia de tareas o funciones dentro del sistema [84, 32].

Otros propósitos del uso de modelos incluyen el mejorar la comunicación entre miembros adicionales del equipo; asegurar que los componentes, ensambles e interconexiones, funcionan juntos como se espera, así como para demostrar que el diseño ha alcanzado un nivel de funcionalidad [32].

Los modelos pueden incluir distintos tipos de información, por lo que pueden consistir en representaciones gráficas o físicas del sistema (bocetos, representaciones tridimensionales, etcétera), ecuaciones que describen su comportamiento (modelos matemáticos), entre otros [32, 84].

A la vez, los modelos pueden ser clasificados de acuerdo con el grado en que son representaciones físicas (**modelos físicos**), que representan los aspectos de interés en objetos tangibles, para su prueba o experimentación; o representaciones no tangibles del sistema (**modelos analíticos**), donde los aspectos de interés son representados generalmente de forma visual o matemática, para ser analizados. Los modelos físicos pueden representar al sistema de manera integral, con todas sus funciones, o únicamente mostrar aspectos de su apariencia. Entre los modelos analíticos se pueden incluir los sistemas de ecuaciones en hojas de cálculo o modelos matemáticos computarizados, modelos tridimensionales de la geometría (modelos CAD), así como simulaciones [32, 84].

En cuanto al grado o cantidad de los atributos del producto que ejecutan o representan, pueden ser considerados **modelos integrales** (la mayor cantidad o todos los atributos en una versión a escala y

operacional) o **modelos enfocados** (uno o pocos atributos del sistema). Por otra parte, se puede clasificar a los modelos en **descriptivos**, cuando el modelo nos permite observar y entender el comportamiento del sistema o fenómeno de interés, comunicando ideas y proveyendo información; o en modelos **predictivos**, que son los más empleados en la ingeniería de diseño, pues no sólo permiten entender el funcionamiento del sistema, sino que se puede predecir el comportamiento de este, usualmente a través de un modelo matemático [84, 32].

El valor y cantidad de información que se puede obtener de la generación y prueba de un modelo depende de la habilidad y recursos (tiempo y dinero) que se pueden dedicar a su creación, así como el análisis de los resultados obtenidos, siendo estos factores fundamentales en la elección de la cantidad y tipos de modelos que se deben generar [84, 32].

Si bien los modelos físicos sirven para detectar el comportamiento, debido a que están sujetos a todas las leyes de la física y demás fenómenos que no son considerados en el modelo analítico, estos últimos presentan una mayor flexibilidad que los modelos físicos, principalmente por la capacidad de cambiar uno o más parámetros con mayor facilidad [32, 84].

Para fines del presente proyecto se generaron dos modelos de tipo analítico: un modelo tridimensional (3D) y un modelo matemático enfocado, que se describen en las secciones siguientes. La elección de estos dos modelos se basa principalmente en que el comportamiento descriptivo que podría proveer un modelo físico ya ha sido observado a través de modelos análogos, como se detalló en secciones anteriores; además de que la caracterización del sistema depende de muchos factores que escapan el alcance de la investigación realizada.

4.1 Modelo tridimensional del sistema

Los **modelos tridimensionales (3D)**, también conocidos como **modelos de diseño asistido por computadora (CAD)**, **modelos digitales**, **prototipos digitales** o **prototipos virtuales**, se emplean para planear el ensamble final e integración de los elementos del sistema, sirviendo principalmente para la visualización del aspecto del sistema, para la identificación de restricciones espaciales, interferencias geométricas, compatibilidad espacial y operaciones de ensamble, entre otros aspectos [23, 32].

Entre las principales ventajas de la generación de un modelo 3D, se encuentra la facilidad de visualizar y crear imágenes realistas de la forma y aspecto del diseño, en tres dimensiones, la manipulación de

distintas vistas y secciones transversales, así como animaciones dinámicas; la habilidad de calcular automáticamente propiedades físicas como masa y volumen, así como analizar diferencias de comportamiento variando los materiales y dimensiones de manera más rápida y menos costosa que con modelos físicos.

Otras ventajas incluyen la capacidad de transferir directamente la información del modelo digital a procesos de fabricación como manufactura aditiva o máquinas de control numérico; la generación directa de planos digitales, reduciendo o eliminando el almacenamiento y manipulación de planos físicos; la incorporación de herramientas para simulación de procesos de manufactura o ensamble, así como su utilización como modelos analíticos por medio de herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAE), por ejemplo, análisis por medio del método de elemento finito (FEM).

4.1.1 Generación del modelo tridimensional

La generación del modelo tridimensional del sistema para modificación de mallas quirúrgicas para hernia inició con la identificación de las piezas estandarizadas y las especializadas, como se ilustra en la Tabla 4.1.

Las dimensiones de las piezas estandarizadas, que fueron obtenidas de la información ofrecida por proveedores, así como de la medición directa, sirvieron como guía para la generación de las piezas especializadas. Con base en estos datos, se procedió a bosquejar las piezas de forma manual, para posteriormente generarlas en la versión digital.

En el caso del presente proyecto, se hizo uso del programa de diseño asistido por computadora Solid Edge de Siemens (versión 2020) para el modelado de todas las piezas que componen el sistema. La figura 4.1 ilustra el modelado de una de las piezas especializadas: la parte inferior del contenedor para los componentes del sistema de procesamiento.

MÓDULO	ELEMENTO	TIPO DE ELEMENTO
Desplazamiento	Soportes Eje Guía	Estandarizado
	Husillo	Estandarizado
	Tuerca	Estandarizado
	Soporte rodamiento husillo	Especializado
	Rodamiento husillo	Estandarizado
	Motor	Estandarizado
	Acople motor	Especializado
	Soporte motor	Especializado
	Tornillos soporte motor	Estandarizado
	Tornillos soporte eje guía	Estandarizado
	Tornillos soporte husillo	Estandarizado
	Soporte pinza de sujeción	Especializado
Sujeción	Pinza malla superior	Especializado
	Pinza malla inferior	Especializado
	Tornillos soporte pinza	Estandarizado
Estructura	Perfil de aluminio 20x20 mm	Estandarizado
	Escuadra ángulo para perfil 20x20	Estandarizado
	Tornillos esquineros	Estandarizado
	Base contenedor	Especializado
Recubrimiento	Contenedor solución	Especializado
Procesamiento	Tarjeta Arduino	Estandarizado
	Controlador A4988	Estandarizado
	Disipador A4988	Estandarizado
	Carcasa procesamiento (base)	Especializado
	Carcasa procesamiento (tapa)	Especializado
	Tornillos tarjeta Arduino	Estandarizado
Sensores	Sensor fin de carrera	Estandarizado
Despliegue de información	Tarjeta Pantalla/Botones	Estandarizado

Tabla 4.1- Lista de elementos generados para el modelo CAD, categorizados en piezas estandarizadas y piezas especializadas (propuestas por la autora).

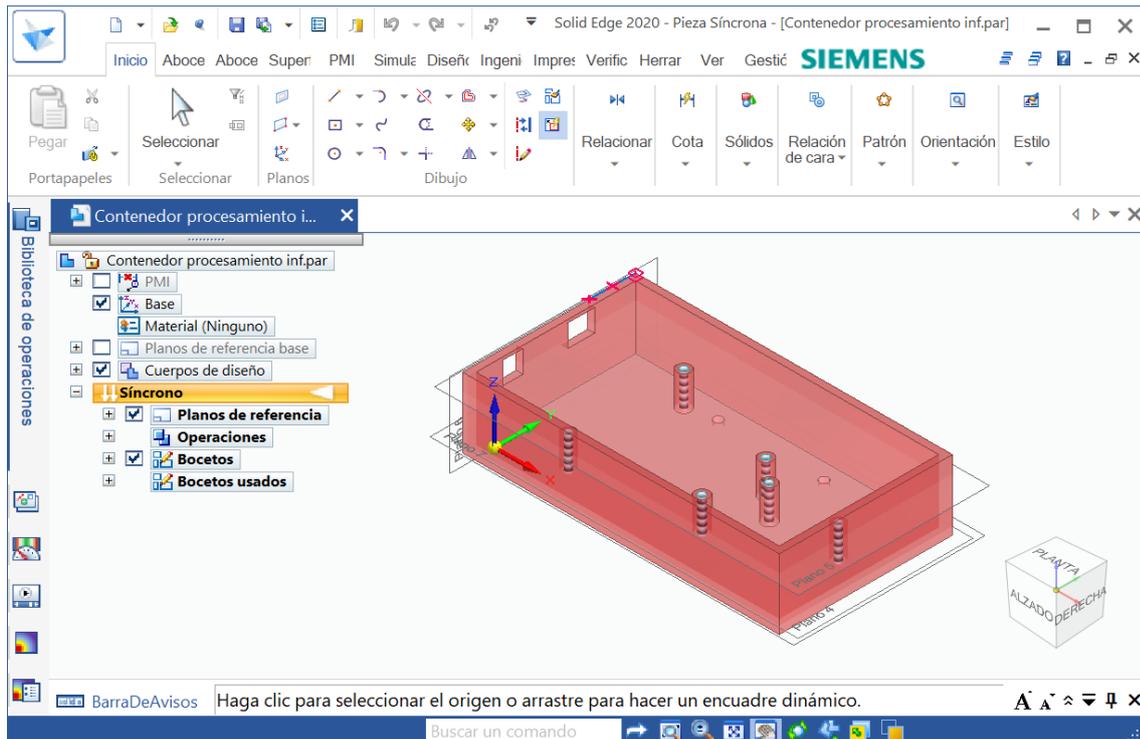
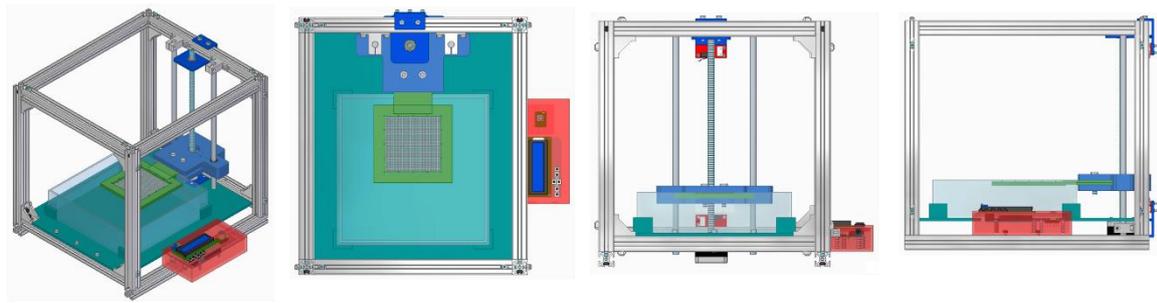


Figura 4.1- Ejemplo de modelado 3D de una pieza especializada del sistema: parte del contenedor para el sistema de procesamiento.

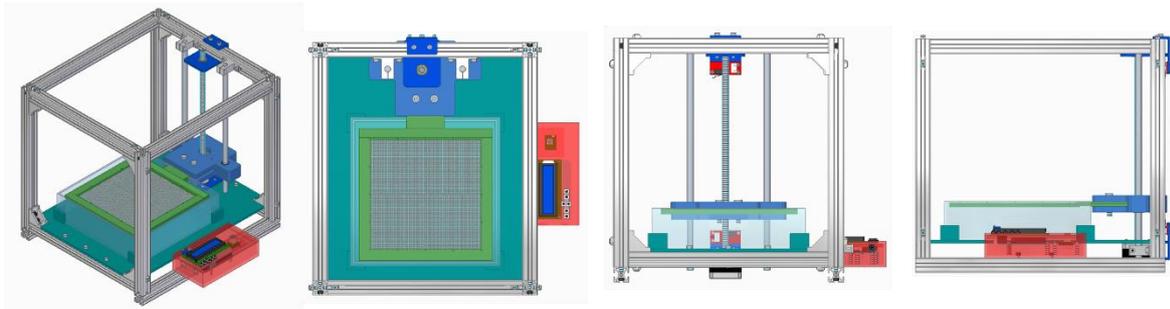
4.1.2 Resultados

Como se explicó al inicio de esta sección, una de las principales funciones del modelo tridimensional de un sistema es la visualización de su apariencia, para identificar restricciones espaciales, interferencias geométricas y compatibilidad espacial. En el caso del sistema propuesto, se empleó también para ilustrar el concepto de las pinzas intercambiables para distintos tamaños de malla, como se puede apreciar en la Figura 4.2, que presenta el ensamble general del sistema, para dos tamaños de malla distintos (7.5 cm x7.5 cm y 15 cm x 15 cm, en los incisos a) y b), respectivamente).

Con fines de presentar una apariencia más semejante a la real, identificando algunos de los materiales propuestos para los elementos del sistema, se generó una imagen fotorrealista (*render*) del sistema, el cual se presenta en la Figura 4.2.

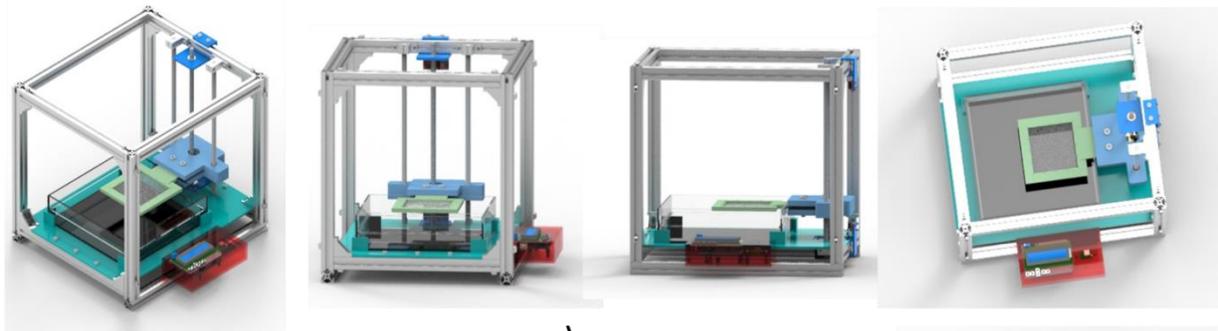


a)

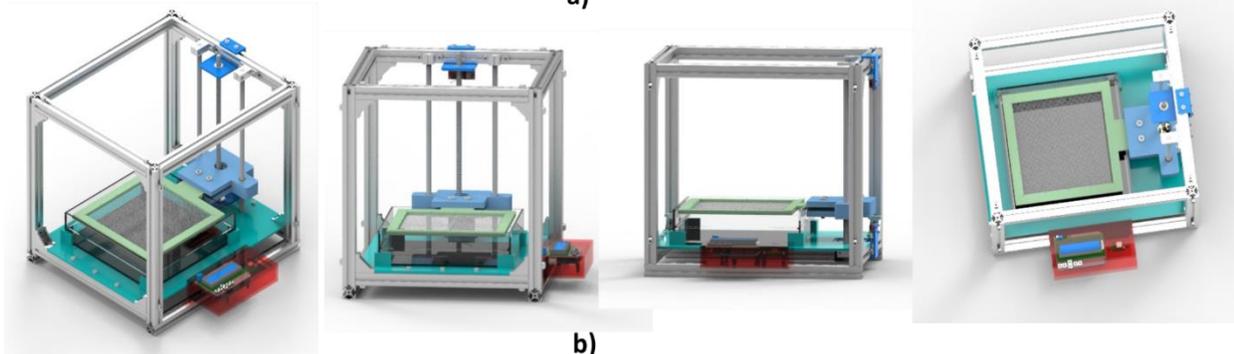


b)

Figura 4.2- Modelo tridimensional (CAD) del sistema con la pinza para malla de a) 7.5 cm x 7.5 cm y b) 15 cm x 15 cm



a)



b)

Figura 4.3- Representación fotorrealista (render) del sistema.

Asimismo, la generación del modelo tridimensional sirvió para visualizar elementos y puntos de unión entre las piezas, de manera que se pueden planear las operaciones de ensamble, entre otros aspectos. La visualización de estas interacciones se presenta en los explosivos del sistema, presentando por separado la estructura (Figura 4.4), el módulo de procesamiento (Figura 4.5) y el resto del sistema. (Figura 4.7), para fines de claridad.

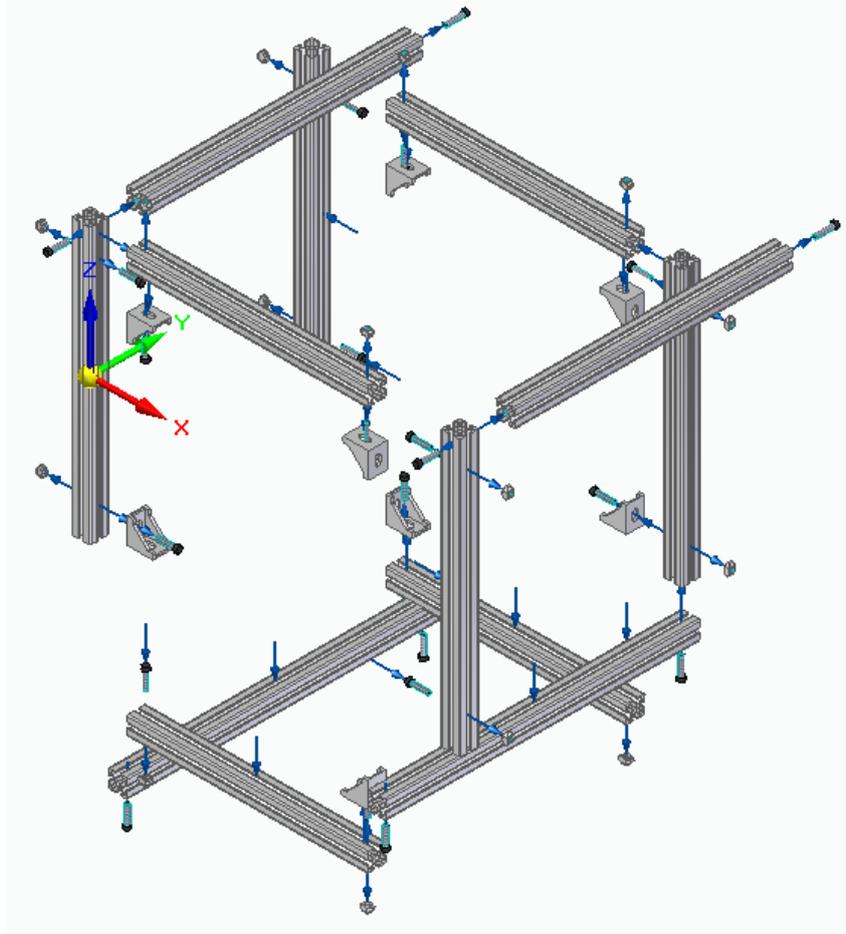


Figura 4.4- Explosivo de la estructura del sistema.

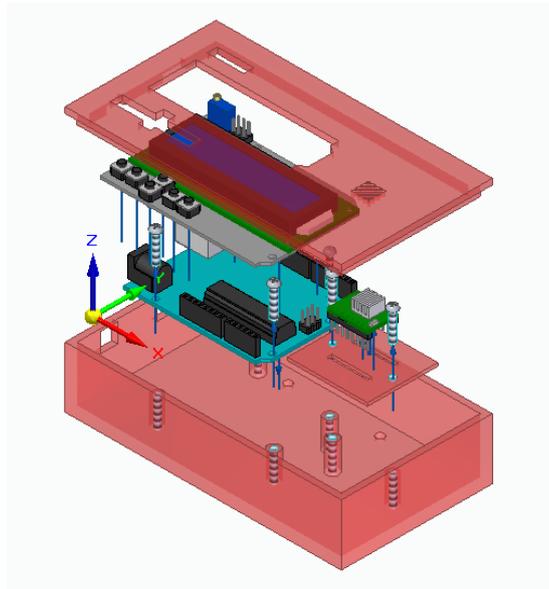


Figura 4.5- Explosivo del módulo de procesamiento.

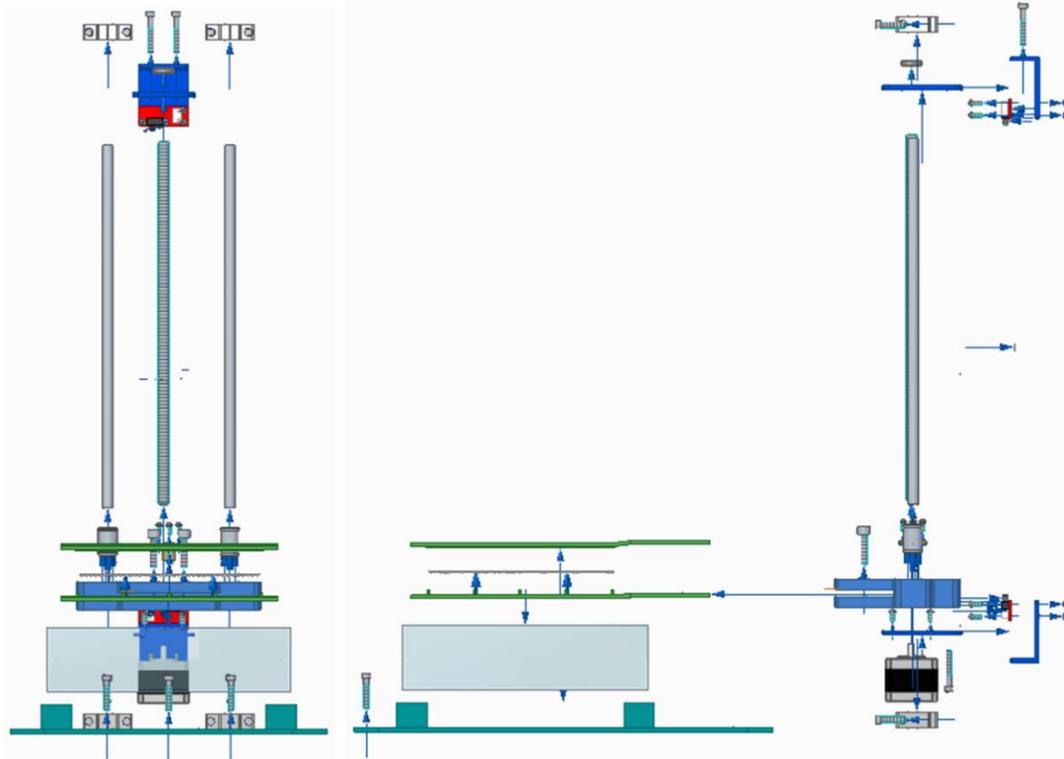
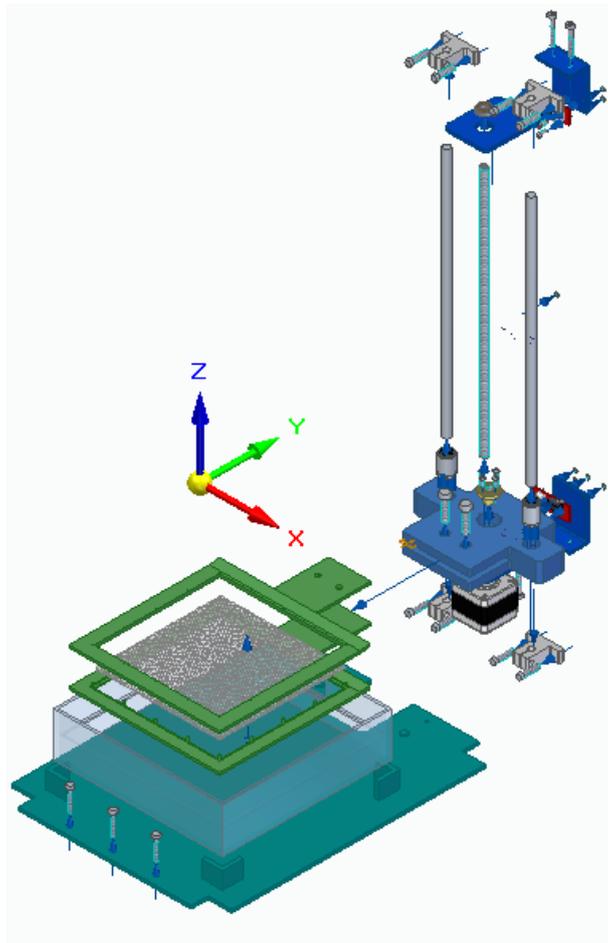


Figura 4.6- Explosivo del sistema (sin módulo de procesamiento ni estructura).

Además de los resultados en cuanto a la visualización, el modelo generado proporcionó una oportunidad para calcular propiedades físicas como masa y volumen, principalmente de las piezas especializadas.

A partir del modelo 3D, se estimaron algunas de las características del proceso de fabricación por manufactura aditiva, propuesto principalmente para las piezas correspondientes al módulo de sujeción. La Figura 4.7, ilustra las características de una de las secciones del soporte para las pinzas de sujeción (inciso a), así como de la parte superior de la pinza de sujeción para la malla de 7.5 cm (inciso b).

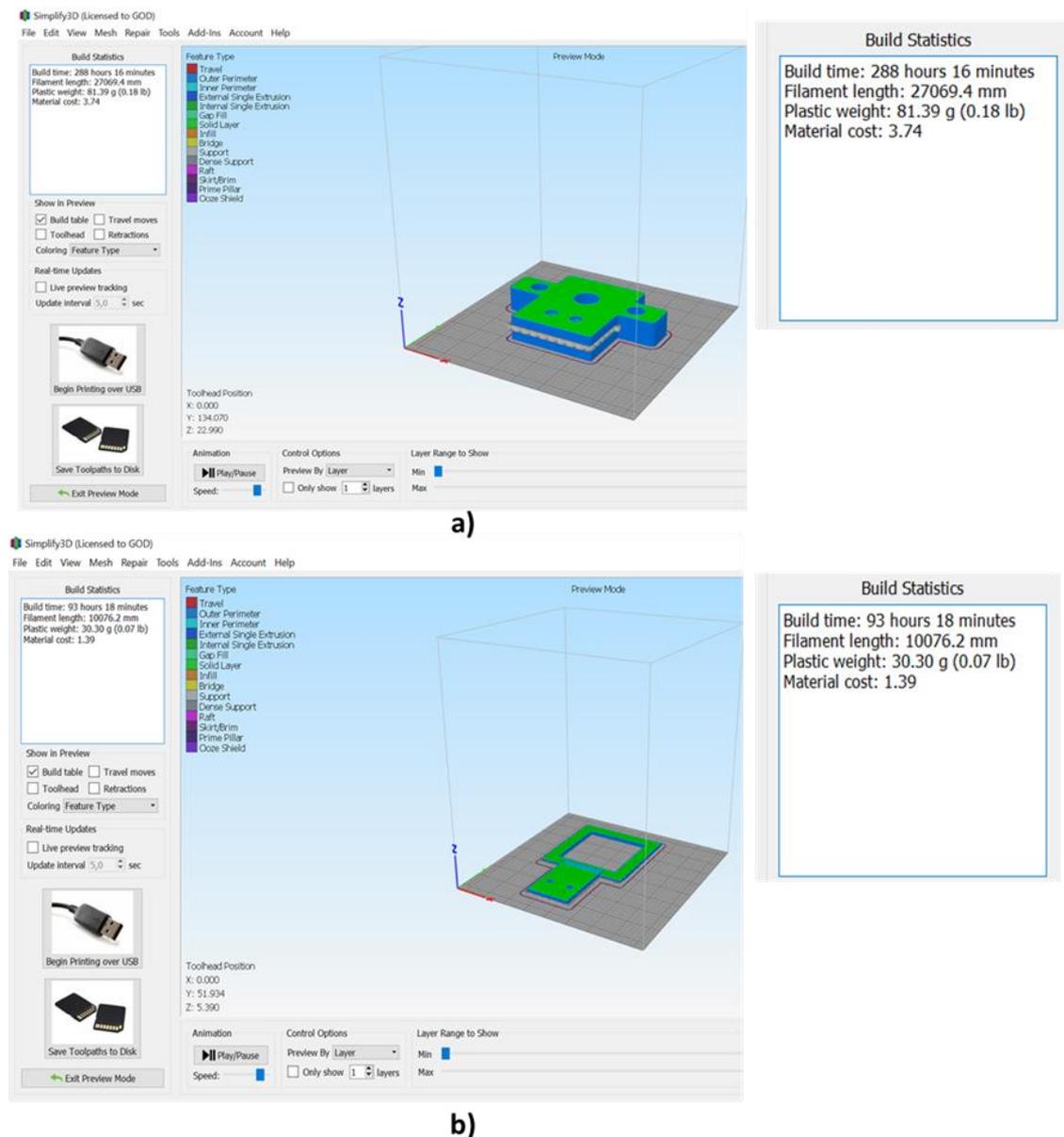


Figura 4.7 Visualización previa del proceso de manufactura aditiva de a) el soporte para pinzas de sujeción y b) parte superior de la pinza para malla de 7.5 cm, empleando el software de rebanado Simplify 3D.

Empleando las herramientas del software para rebanado de las piezas (Simplify 3D para el presente trabajo), se identificaron posibles complicaciones en cuanto a las capacidades del equipo, en este caso, el volumen de construcción, siendo necesaria la modificación de la posición de la pieza (pinza de sujeción para malla de 15 cm), como se puede observar en la Figura 4.8.

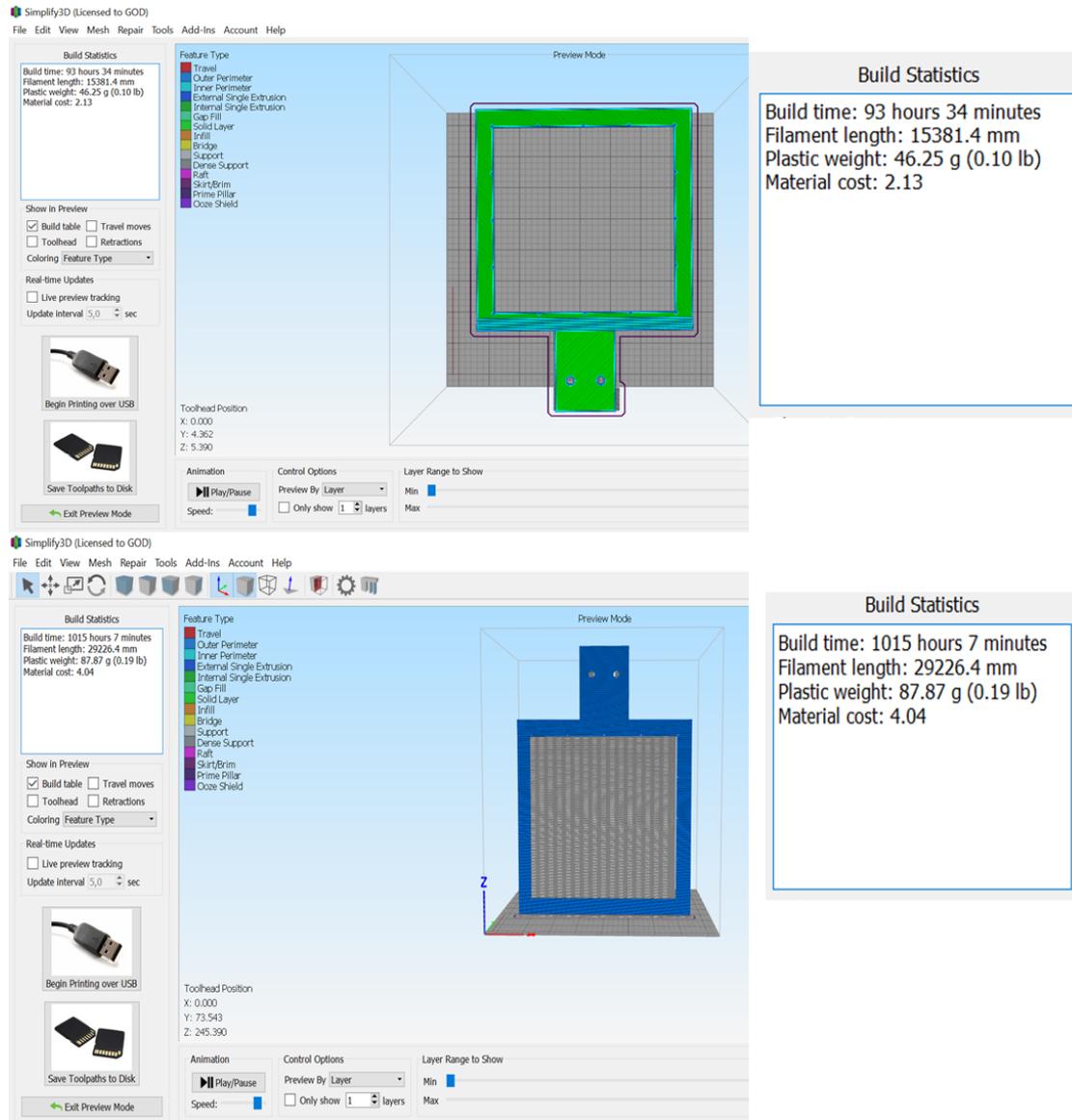


Figura 4.8.- Visualización previa del proceso de manufactura aditiva de la parte superior de la pinza de sujeción para malla de 15 cm, con reposicionamiento de la pieza.

4.2 Modelo matemático del sistema

Como se mencionó anteriormente, los modelos predictivos de mayor uso en la evaluación de diseños son los modelos matemáticos, que pertenecen al tipo de modelos analíticos.

Los modelos matemáticos son generados para modelar los componentes del sistema que resultan de interés para el análisis, representándolos a través de elementos ideales que tienen las características de los componentes reales, y cuyo comportamiento puede describirse empleando ecuaciones matemáticas [84, 32].

Para el diseño del sistema para modificación de mallas quirúrgicas, el aspecto de interés que se buscó evaluar por medio del modelo matemático fue la capacidad del sistema de desplazamiento para moverse a la velocidad de inmersión necesaria para generar capas de recubrimiento sobre una de las caras de la malla. A continuación, se describe el proceso empleado para la generación y evaluación del modelo empleado, así como los resultados obtenidos.

4.2.1 Generación del modelo matemático

La generación del modelo matemático del sistema propuesto se llevó a cabo tomando como referencia los nueve pasos descritos en la literatura [84]:

1. Planteamiento del problema: En este paso se decide qué es lo que se busca aprender, predecir o responder con la aplicación del modelo matemático. En el caso del sistema para modificación de mallas quirúrgicas, se buscó validar la selección del sistema de desplazamiento, pues es quien afecta de manera más directa el proceso de recubrimiento.

2. Selección del espacio de diseño de ingeniería: Este paso consiste en seleccionar los elementos físicos que serán representados en el modelo, identificando las entradas y salidas esperadas. Se busca pasar de las preguntas de carácter más general planteadas en el paso uno, a preguntas que puedan ser respondidas mediante el análisis ingenieril. Para el presente proyecto, se busca identificar si las velocidades requeridas para generar un cierto espesor de capa con el proceso de recubrimiento por inmersión pueden ser obtenidas con la configuración propuesta.

Las ecuaciones de Landau-Levich (descritas en la sección 3.2.1, módulo de desplazamiento) que describen el comportamiento del proceso de recubrimiento, indican que el espesor de capa obtenido depende las propiedades de la sustancia y la velocidad de desplazamiento. Dado que esta última está

sujeta a las capacidades del motor y características de avance del sistema de desplazamiento determinado, el modelo matemático busca responder las siguientes preguntas:

- 1) ¿Qué velocidad de desplazamiento se requiere para generar *un cierto* espesor de capa?
- 2) ¿Cuál es la velocidad máxima permitida por el motor, con la configuración propuesta?
- 3) ¿Qué velocidad de rotación en el motor se requiere para generar dicha velocidad de desplazamiento?

3. Definir límites del modelo: Se refiere a determinar las fronteras del sistema, también llamadas volumen de control, es decir, cuáles aspectos del sistema son parte del modelo y cuáles no; definiendo el comportamiento general del sistema, o un volumen de control diferencial, en algún punto específico del sistema. La Figura 4.9 presenta el diagrama del modelo definido dentro de los límites del sistema.

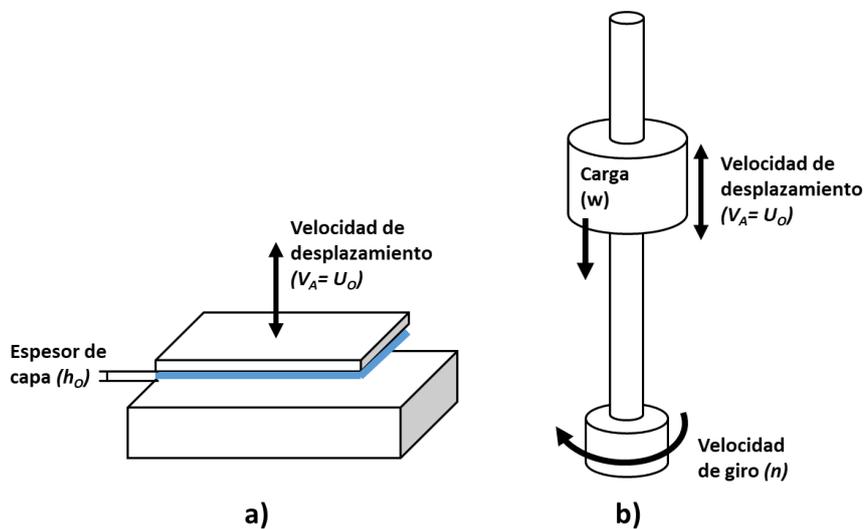


Figura 4.9- Dibujo esquemático del modelo para a) generación de capa sobre el sustrato y b) sistema de desplazamiento, para el sistema de modificación de mallas para hernia.

4. Encontrar información disponible para apoyar la construcción del modelo: En el paso de recopilación de información para construir el modelo, se buscaron datos obtenidos en investigaciones relacionadas, que sirvieran como referencia para la validación del modelo. La Tabla 4.2 muestra la lista de datos obtenidos de las referencias en la literatura [22,87-89,93,164-180].

A partir de los datos consultados, así como valores dados por los fabricantes o proveedores de los elementos estandarizados elegidos para la configuración del sistema, los parámetros y variables para la prueba del modelo, se describen a continuación:

Parámetros del husillo

Diámetro: 8 mm

Paso: 2 mm

Longitud: 300 mm

Entradas: 4

Parámetros dependientes de la configuración (rígida-simple)

Velocidad crítica (n_{cr}): 3500 rpm

Factor de corrección (f_{cr}): 1.45

Coefficiente de seguridad (v): 0.8

Carga de columna (f_k): 15 kN

Factor de corrección (f_c): 2

Factor de seguridad (c): 0.8

Parámetros del motor

Torque: 4 kg-cm.

Ángulo de paso: 1.8°, 200 pasos/vuelta (hasta 3200 pasos por vuelta con el driver A4988).

Diámetro de la flecha: 5 mm

Máxima frecuencia admisible²: 1000-37500 rpm (625 Hz)

Velocidades de inmersión³ mm/min: 0.6, 1, 5, 10, 50, 80, 100, 150, 250, 600, 1200, 3000, 6000, 9000, 12000

Material	Viscosidad			Velocidad inmersión	Espesor capa	Tiempo inmersión	No. ciclos (capas)	Temperatura	Referencia
	mPa·s	mm ² /s	dl/g	mm/min	µm	min		°C	
Ácido poliláctico (PLA)			0.55	240, 6000					(Fang, 2008)
Poli dimetilsiloxano	1.07, 2.05, 3.78			40, 60, 77.4, 178.5, 512.8, 650				25	(Menaar, 2007)
Tolueno	100			117.6	14.5				(Molaire, 2005)
	300			84	17.7				

² La velocidad máxima del motor a pasos depende del motor específico, la potencia del controlador y la carga que se busca mover [153, 163]

³ Se tomaron los valores considerando todas las referencias de la Tabla 4.2, pero fueron tomadas como guía las referencias de Fang [87], Bai [164], Rambašek [166], Apsari [169] y Afsarimanesh [179].

	600			58.8	20.1					
	1000			42	21.7					
Tetrahidrofuro (THF)	100			70.8	13.4					
	300			52.2	15.3					
	600			36	16.8					
	1000			25.8	17.8					
Diclorometano	100			221.4	16.9					
	300			159	23					
	600			111.6	27.5					
	1000			79.8	30.6					
Óxido de Zinc (ZnO)				1302, 2562			6 - 10	(Benramache, 2012)		
Titanato de bario (BaTiO ₃)				10	0.026			(Ashiri, 2014)		
PoliN isopropilacrilamida (pNIPAm)				5		1			(Scherino, 2018)	
				100		0.05				
				200		0.025				
Poliimida/1 metil2pirrolidona (PI/NMP)				50	0.86				(Rambausek, 2014)	
				75	2.07					
				100	2.19					
				150	4.28					
Poliimida/dimetilformaldehído (PI/DMF)				50	0.78				(Rambausek, 2014)	
				75	0.88					
				100	1.24					
				150	1.28					
Óxido de Zinc (ZnO), Óxido de Zinc dopado con indio (ZnO:In)				120 - 2400	0.627		48	(El Yamny, 2012)		
Poli 3-hexiltiofeno				0.2	0.037, 0.063, 0.183	0.083 - 0.167			(Wang, 2004)	
				0.5	0.018, 0.026, 0.072					
				1	0.009, 0.013, 0.039					
				5	0.002, 0.003, 0.007					
				10	0.0005, 0.0009, 0.0004					
Hidroxiapatita (HA)				7.2	10, 16, 59	10	2		(Apsari, 2015)	
				11.88	20, 26, 62					
				15.96	8, 39, 95					
Dióxido de titanio dopado con iones de Zinc (Zi+2 TiO ₂)				3750				(Abbas, 2019)		
Óxido de cobre (CuO)				80	0.24		10	250	(Martínez-Saucedo, 2017)	
Poliestireno y Tolueno (PS/Tol), PS y Tetrahidrofuro				1	0.1, 0.2, 0.4				(Vital, 2016)	
				10	0.05, 0.04, 0.07					
				40	0.11, 0.09, 0.1					

(PS/THF), PS y 1,2.dicloroetano (PS/DCE)				80	0.18, 0.19, 0.11				
				200	0.29, 0.2, 0.17				
Dióxido de titanio y polidopamina (TiO ₂ /PDA)				120		0.333	3		(Jiang, 2019)
Poliestireno-b-4-vinilpiridina y Dioxano, PS-P4VP y Tolueno (PS-P4VP/Tol), PS-P4VP y Tetrahidrofuran (PS-P4VP/THF), PS-P4VP y Cloroformo (PS-P4VP/CHCl ₃)				0.8	0.022, 0.026, 0.08, 0.122	0.5			(Roland, 2015)
				1	0.015, 0.018, 0.045, 0.063				
				7	0.022, 0.021, 0.024, 0.027				
				20	0.037, 0.28, 0.028, 0.026				
				40	0.047, 0.044, 0.04, 0.030				
				60	0.07, 0.066, 0.063, 0.044				
Itrio y aluminio dopado con trivalente de europio (YAG: Eu ³⁺)				250	0.074		1	(Boukerika, 2019)	
					0.163		3		
					0.386		6		
					0.53		9		
F127 Plurónico y etanol (F127/EtOH)				0.6	0.9	0.5	25	(Faustini, 2010)	
				3	0.4				
				6	0.14				
				30	0.16				
				60	0.32				
				300	0.6				
PS-P4VP y Ácido naftoico (PS-P4VP/NCOOH)				0.5	0.073	0.5	21	(Roland, 2012)	
				1	0.038				
				3	0.019				
Polidimetilsiloxano (PDMS500)		25, 75, 100, 125, 150, 180, 210		5				(Zhang, 2018)	
Poliimida (ZKPI-305IIIE)	5000-6000			0.6	12.7, 36.9, 39.3, 51.8, 55.3	5-10		(Bai, 2016)	
				600	21	10			

Resina acrílica				3000	27			(Afsarimanes h, 2018)
				6000	30			
				9000	34.5			
				1200	35			
				6000	22	5		
					30.5	10		
					36	15		
					40	20		
					42	25		
				42.5	30			
Politetrafluoroetileno (TE-3859)				10	0.8, 1, 1.4, 1.7, 1.8	0.33		(Beckforth, 2011)

Tabla 4.2- Ratos recopilados de la literatura, para la prueba del modelo matemático.

5. Determinar qué leyes físicas son pertinentes para el problema: El paso 5 está fuertemente relacionado con el paso anterior. Durante el planteamiento del problema, se fueron identificando los aspectos de la física que se emplearán para la representación del fenómeno de interés.

Como se mencionó anteriormente, las ecuaciones que definen el comportamiento que se busca analizar fueron descritas en la sección 3.2.1. Para los fines del modelo, se destaca la relación entre la velocidad de inmersión del sustrato, y la velocidad de rotación del motor. A la vez, esta última se ve afectada por características de la configuración, principalmente, el valor de la carga y el tipo de montaje.

6. Describir suposiciones: En la descripción de los pasos para generar el modelo, se hace hincapié sobre el hecho de que el modelo es en sí una abstracción de la realidad, de manera que se pueden realizar suposiciones para simplificar el análisis, minimizando la cantidad de variables que deben considerarse. Para ello, pueden realizarse suposiciones que eliminen aquellos aspectos que consideramos generan mínimos efectos (casi despreciables) sobre los resultados, lo que afecta a la precisión del sistema.

Algunas de las suposiciones que fueron consideradas para el presente proyecto son: que los fluidos tienen un comportamiento newtoniano; que el entorno (y sus variables como temperatura, humedad, etc.) no influyen sobre el sistema modelado; y que el valor de la fricción en el mecanismo de husillo y tuerca, así como la deflexión que se pudiera generar sobre el husillo por la carga, son despreciables.

7. Construir y verificar el modelo: Para construir el modelo es recomendable realizar un esbozo de los elementos físicos del sistema, así como las leyes físicas que relacionan las diferentes variables de interés. Esto se realizó en los pasos anteriores, por lo que, en este paso dentro de la generación del modelo, se busca modificar las ecuaciones de las leyes físicas que rigen el comportamiento del sistema, de manera que proporcionen las ecuaciones que transformen las entradas en salidas deseadas. Para

ello, se tomaron las ecuaciones 1, 2, 6 y 9, descritas en la sección 3.2.1, y se despejaron las variables de interés, como se describe en las ecuaciones siguientes:

$$h_0 = c_1 \left(\frac{\eta U_0}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$U_0 = \frac{h_0^2 \rho g}{\eta c_1^2}$$

$$h_0 = 0.944 \left(\frac{\sqrt[3]{\eta U_0^2}}{\sqrt[6]{\gamma_{lv}}} \right) \sqrt{\rho g}$$

$$U_0 = \sqrt{\frac{h_0^3 \sqrt{\gamma_{lv}}}{(0.841\eta) \left(\sqrt[2]{(\rho g)^3} \right)}}$$

Considerando que la velocidad de desplazamiento es igual a la velocidad de avance de la tuerca del mecanismo husillo-tuerca ($U_0=v_A$), la ecuación para determinar la velocidad de rotación en función de la velocidad de desplazamiento queda:

$$n = \frac{U_0}{A}$$

A la vez, la velocidad de rotación n (igual a N en la ecuación 9 de la sección 3.2.1), está determinada en función de la frecuencia de tren de pulsos f :

$$n = 60 * \frac{f}{n_p}$$

$$\frac{U_0}{A} = 60 * \frac{f}{n_p}$$

Por lo que la frecuencia de tren de pulsos requerida para lograr la velocidad de rotación especificada con base en la velocidad de desplazamiento se puede determinar a través de:

$$f = \frac{U_0 * n_p}{60A}$$

8. Analizar: En este paso se determina cómo se resolverán las ecuaciones para obtener una salida significativa. Esta solución puede ser analítica, numérica o gráficamente. Para los fines del presente proyecto de investigación, se procedió a elaborar una hoja de cálculo con las ecuaciones que conforman el modelo para la evaluación analítica. El formato de dicha hoja de cálculo se muestra en la Figura 4.10. Para los fines de este proyecto, se probaron únicamente las ecuaciones del lado izquierdo.

Velocidad rotación (motor)		Landau-Levich (newtoniano)			
n	#¡DIV/0!	Espesor de capa		Velocidad desplazamiento	
vA		ho	#¡DIV/0!	ho	
A		c1		c1	
Frecuencia rotación (motor)		η		η	
N		Uo		Uo	#¡DIV/0!
f	0	ρ		ρ	
np		g		g	
Desplazamiento (husillo)		Landau-Levich (drenado)			
A	0	Espesor de capa		Velocidad desplazamiento	
p		ho	#¡DIV/0!	ho	
e		η		η	
Velocidad máxima permitida [rpm]		Uo		Uo	#¡VALOR!
nad	0	ρ		ρ	
ncr		g		g	
fcr		γlv		γlv	
v		Landau-Levich (capilar)			
Carga máxima permitida [kN]		Espesor de capa		Velocidad desplazamiento	
Fad	0	ho	#¡DIV/0!	ho	
Fk		ki		ki	
fc		E		E	
C		L		L	
		u		u	#¡DIV/0!
		D		D	

Figura 4.10- Hoja de datos generada para la evaluación del modelo matemático del sistema. La sección izquierda, corresponde a las ecuaciones del motor. La sección derecha, corresponde a las ecuaciones de Landau-Levich.

9. Validar el modelo: De acuerdo con la literatura, es importante validar el modelo para saber si es una representación fiel del sistema físico, lo que a su vez demuestra el nivel de precisión que se puede obtener de las predicciones realizadas con el modelo. Algunas formas sugeridas para validar el modelo consisten en variar las entradas y observar si las salidas resultan físicamente razonables; la comparación con modelos similares o la realización de pruebas experimentales. Para los fines de esta investigación, la validación se limita a la evaluación de las salidas obtenidas al introducir distintos valores de entrada: primero, los factores correspondientes a la configuración, para obtener los máximos permitidos; y posteriormente, los valores de velocidad de desplazamiento para obtener la velocidad de rotación y frecuencia requeridos en el motor. Los resultados de esta validación se describen más adelante.

4.2.2 Resultados

La respuesta a las preguntas planteadas en el segundo paso de la construcción del modelo matemático se obtuvo de la siguiente manera:

1) *¿Qué velocidad de desplazamiento se requiere para generar x espesor de capa?*

Debido a que esta relación depende de las características de los materiales empleados para el recubrimiento, los cuales no fueron definidos dentro del alcance de este proyecto, la respuesta a esta pregunta se limita a la obtención de datos en la literatura que asociaran velocidades de desplazamiento con espesores de capa obtenidos, o viceversa (Tabla 4.2).

2) *¿Cuál es la velocidad máxima permitida por el motor, con la configuración propuesta?*

Ocupando los parámetros mencionados en el punto 4 de la construcción del modelo, se obtuvieron los valores del desplazamiento del husillo, la velocidad máxima permitida y la carga máxima permitidas. Estos resultados, que se muestran en la Figura 4.11, indican que la velocidad máxima permitida es de 4060 rpm, mientras que la carga máxima permitida es de 24 kN.

Desplazamiento (husillo) [mm]	
A	8
p	2
e	4

Velocidad máxima permitida [rpm]	
nad	4060
ncr	3500
fcr	1,45
v	0,8

Carga máxima permitida [kN]	
Fad	24
Fk	15
fc	2
C	0,8

Figura 4.11- Valores de desplazamiento del husillo, velocidad máxima y carga máxima permitidas, obtenidas por medio del modelo matemático generado.

3) *¿Qué velocidad de rotación en el motor se requiere para generar dicha velocidad de desplazamiento?*

Para responder a esta pregunta, se introdujeron los valores de velocidad de desplazamiento seleccionados de los ejemplos en la literatura (punto 4 de la construcción del modelo), para obtener la velocidad de rotación, así como la frecuencia del motor correspondiente. En la figura 4.12 se ilustran algunos de los resultados obtenidos por medio del modelo matemático. La Tabla 4.3 presenta todos los resultados obtenidos.

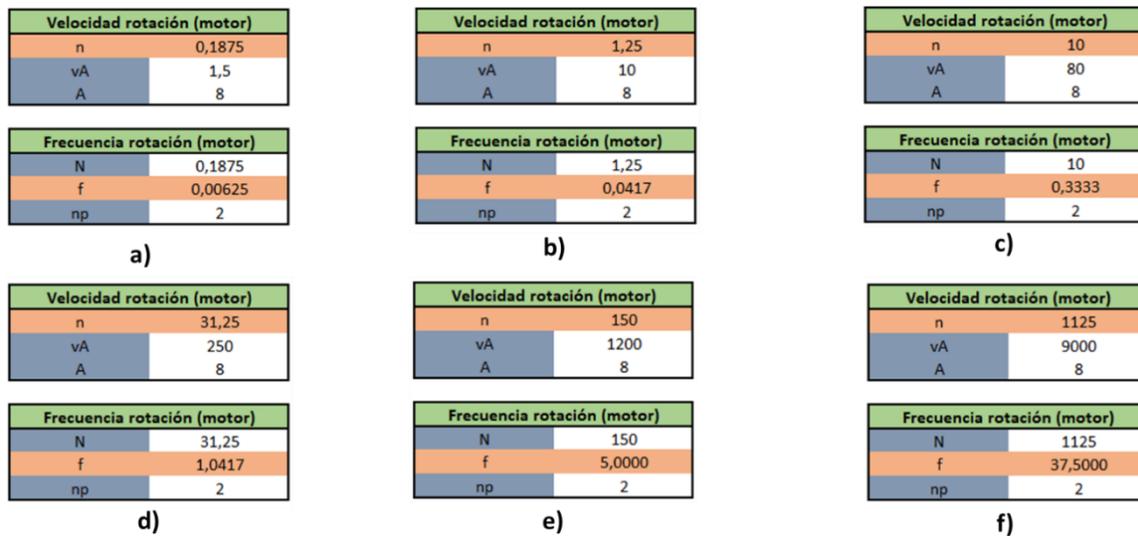


Figura 4.12- Resultados obtenidos por medio del modelo correspondientes a las velocidades de desplazamiento de a) 1.5, b) 10 c) 80, d) 250, e) 1200 y f) 9000, todas en mm/min.

$U_0 = V_A$ [mm/min]	$n = N$ [rpm]	f [Hz]
0.6	0.075	0.0025
1.5	0.188	0.0063
5	0.625	0.0208
10	1.25	0.0417
50	6.25	0.2083
80	10	0.333
100	12.5	0.4167
150	18.75	0.625
250	31.25	1.042
600	75	2.5
1200	150	5
3000	375	12.5
6000	750	25
9000	1125	37.5
12000	1500	50

Tabla 4.3- Resultados de velocidad de rotación y frecuencia del tren de pulsos, correspondientes a los valores de entrada de velocidad de desplazamiento (primera columna), obtenidos por medio del modelo matemático.

V- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

El presente documento reporta el trabajo realizado con la finalidad de diseñar un sistema para la modificación de mallas quirúrgicas empleadas para la reparación de hernias abdominales.

Las conclusiones respecto al trabajo presentado se enlistan a continuación, agrupadas respecto a los objetivos específicos o alcance descritos inicialmente.

Respecto a la recopilación de información

Se realizó un trabajo de recopilación y revisión de información respecto a la reparación de hernias abdominales, partiendo de la definición y características principales del padecimiento herniario, así como de los procesos y elementos empleados para su reparación.

Se identificaron y clasificaron las mallas quirúrgicas disponibles en el mercado, empleando sus características principales (materiales, tipo de tejido, tamaño de poro, etcétera).

Se identificaron los principales problemas derivados de la implantación de las mallas, generando como resultado la identificación de áreas de oportunidad desde la perspectiva del diseño en Ingeniería.

Asimismo, se realizó una búsqueda de información respecto a procedimientos y materiales empleados para la modificación de las mallas existentes, arrojando resultados que indican la falta de trabajos enfocados a esta problemática. Se concluye que la investigación presentada en esta tesis sirve como antecedente para trabajos de investigación relacionados.

Se establecieron las características y parámetros involucrados en la modificación de las mallas, que sirvieron posteriormente para la elección del proceso propuesto para la modificación de las mismas.

Se realizó una revisión de los procesos de modificación de superficies por medio de la generación de recubrimientos, sintetizando sus principales características y resultando en la elección del proceso de recubrimiento por inmersión para su aplicación en el diseño del sistema propuesto.

Asimismo, se realizó una revisión de algunas metodologías de diseño, con la finalidad de seleccionar una que permitiera el seguimiento de los requerimientos de diseño a lo largo de todo el desarrollo de la solución, resultando en la elección de la metodología de Pahl y Beitz.

Respecto a la aplicación de la metodología de diseño

Se comprobó que la utilización de la metodología de diseño elegida proporcionó una guía adecuada para el seguimiento de los requerimientos a lo largo del desarrollo de la solución, brindando una secuencia de actividades estructurada y enfocada, con resultados satisfactorios principalmente en la etapa de diseño conceptual y diseño de configuración.

Se realizó la síntesis de la investigación desarrollada en los primeros capítulos del presente documento, así como el trabajo del diseño conceptual en dos artículos, presentados exitosamente en el Congreso Internacional Anual de la SOMIM correspondiente a los años 2018 y 2019.

Respecto al sistema propuesto

Se realizó la identificación de tecnologías probadas para la aplicación de la metodología de recubrimiento elegida, resultando en la propuesta de una configuración para un sistema empleado para la modificación de mallas quirúrgicas para hernia abdominal.

Se generó un modelo tridimensional del sistema propuesto, presentando exitosamente las características de apariencia e interacción física entre los elementos propuestos.

Se generó un modelo matemático para validar el funcionamiento del sistema propuesto, enfocado en el módulo de desplazamiento, a partir de la revisión de literatura realizada sobre los modelos matemáticos que describen el proceso de recubrimiento. A la vez, se validó el modelo propuesto a través de los datos recopilados en dicha revisión de literatura.

Se generó la información suficiente para presentar el diseño de un sistema para la modificación de mallas para hernioplastia por medio del recubrimiento por inmersión, incluyendo el desarrollo de piezas especializadas y la utilización de piezas estandarizadas.

5.2 Trabajo futuro

Se requiere una validación más completa del sistema propuesto, que incluya un conjunto de pruebas experimentales para reafirmar las decisiones tomadas y presentadas en este documento. Para ello, queda como trabajo futuro la construcción de un modelo físico que integre todos los elementos propuestos y sea capaz de ejecutar todas las funciones del sistema, así como la realización de pruebas que complementen la validación del modelo matemático.

Se requiere también de la realización simultánea de investigación respecto a posibles materiales empleados para el recubrimiento de las mallas, así como de la caracterización tanto de materiales ya existentes en el mercado, como aquellos que se llegasen a generar, para obtener los valores de los parámetros requeridos para la utilización del modelo generado en el presente trabajo, de manera que se pueda parametrizar y predecir la generación de recubrimiento sobre las mallas, para su modificación.

Como trabajo a largo plazo, la continuación del presente proyecto derivará en la prueba de mallas modificadas, para lo cual se deberá trabajar en la generación de los protocolos adecuados, así como su aprobación, con el fin de realizar pruebas de validación de la calidad de las mallas modificadas para su posible aplicación en la reparación del padecimiento de hernias abdominales.

Referencias

1. Mayagoitia González J. C., Cisneros Muñoz H. A., Martínez Munive A. (2015), Guías de práctica para Hernias de la Pared Abdominal, Asociación Mexicana de Hernia, A.C.
2. Travi Antonio M. (2015), Tipos de malla para la reparación de hernias [diapositivas de PowerPoint]. <https://www.slideshare.net/ivojvodvic2000/tipos-de-mallas-para-hernioplastas>
3. Sánchez—Montes (2019), Todo sobre hernias. Centro de Hernias. <http://www.herniascentro.com/informacion.htm>
4. Holland K. Sanyal S. (2017), Seroma: Causes, Treatment, and More. Helathline <https://www.healthline.com/health/seroma#causes>
5. Barredo C., Covaro J. A., Gómez F. A. (2009), Materiales de suturas y mallas, Cirugía Digestiva F. Galindo.
6. Brown C.N., Finch J.G. (2010), Which mesh for hernia repair, Annals of the Royal College of Surgeons of England.
7. Bilsel Y., Abci I. (2012), The search for ideal hernia repair; mesh materials and types, International Journal of Surgery.
8. Ericksen J.R., Gögenur I., Rosenberg J. (2007), Choice of mesh for laparoscopic ventral hernia repair, Hernia.
9. Banoriya D., Purohit R., Dwivedi R. K. (2017), Advanced Application of Polymer based Biomaterials, Materials Today: Proceedings.
10. Binnebösel M., Rosch R., Junge K. (2007), Biomechanical analyses of overlap and mesh dislocation in an incisional hernia model in vitro, Surgery.
11. Novitsky Y.W., Harrell A.G., Cristiano J. A. (2007), Comparative Evaluation of Adhesion Formation, Strength of Ingrowth, and Textile Properties of Prosthetic Meshes After Long-Term Intra-Abdominal Implantation in a Rabbit, Journal of Surgical Research.
12. Kalaba S., Gerhard E., Winder J. S. (2016), Design strategies and applications of biomaterials and devices for Hernia repair, Bioactive Materials.
13. Le D., Deveney C.W., Reaven N.L. (2013), Mesh choice in ventral hernia repair: so many choices, so little time, The American Journal of Surgery.
14. Liang M.K., Clapp M.L., Garcia A. (2012), Mesh shift following laparoscopic ventral hernia repair, Journal of Surgical Research.
15. Bellón J.M. (2014), Revisión de una clasificación de materiales protésicos destinados a la reparación herniaria: correlación entre estructura y comportamiento en los tejidos receptores, Revista Hispanoamericana Hernia.
16. Nistico R., Rosellinia A., Rivolob P. (2015), Surface functionalization of polypropylene hernia-repair meshes by RF-activated plasma polymerization of acrylic acid and silver nanoparticles, Applied Surface Science.
17. Bellón J. M., Rodríguez M., García-Honduvilla N. (2007), Partially absorbable meshes for hernia repair offer advantages over nonabsorbable meshes, The American Journal of Surgery.
18. García-Moreno F., Pérez-López P., Sotomayor S. (2015), Comparing the host tissue response and peritoneal behavior of composite meshes used for ventral hernia repair, Journal of Surgical Research.
19. Wu W., Cheng R. (2017), Advances in biomaterials for preventing tissue adhesion, Journal of Controlled Release.

- 20.**Batniji R. K., Hutchison J. L., Dahiya R., Lam S.L., Williams E.F. (2002), Tissue Response to Expanded Polytetrafluoroethylene and Silicone Implants in a Rabbit Model, Archives Facial Plastic Surgery.
- 21.**Álvarez-Cabrales A., (2014) Síntesis guiada de soluciones acumulativas para el diseño conceptual de un fogón eficiente para biomasa, Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias
- 22.**Ashiri R. (2014), Crack-free nanostructured BaTiO₃ thin films prepared by sol-gel dip-coating technique, Ceramics International.
- 23.**Pahl G., Beitz W. (2007), Engineering Design: A systematic Approach, Springer.
- 24.**Hundal M. S. (1990), A Systematic Method for Developing Function Structures, Solutions and Variants, Mechanism and Machine Theory.
- 25.**Andrade-Nieves M.G. Paisano-Rodríguez F. (2008), Diseño de una máquina prototipo peladora de tunas a nivel planta piloto y construcción de un prototipo del mecanismo de pelado de la misma, Tesis Profesional Universidad de las Américas Puebla.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/andrade_n_mg/capitulo3.pdf
- 26.**Serrano-Lledó R. (2012), Tema 3. Metodología del diseño por IC.
<http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/Metodo-t3.pdf>
- 27.**Summers J.D., Mocko G.M. (2006), Concept Exploration Through Morphological Charts: An Experimental Study, Journal of Mechanical Design.
- 28.**Chaur-Bernal J., (2005), Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- 29.**Nacif N.E. (2015), Métodos de Diseño, Documento de cátedra de Metodología, Facultad de Arquitectura Universidad Nacional de San Juan.
- 30.**Guillen-Mandujano M., Dorador-González J.M. (2018), Importancia del diseño mecánico en la fabricación de mallas para hernioplastia: Revisión literaria de áreas de oportunidad, Memorias XXIV Congreso SOMIM 2018.
- 31.**Mind Tools Content Team (2019), Paired Comparison Analysis.
https://www.mindtools.com/pages/article/newTED_02.htm
- 32.**Ulrich K.T., Eppinger S.D. (2013), Diseño y desarrollo de productos, McGRAW-HILL.
- 33.**Bachman S., Ramshaw B. (2008), Prosthetic Material in Ventral Hernia Repair: How Do I Choose, Surgical Clinics of North America.
- 34.**Baptista L.G. (2015), Multilayer Graphene Films Obtained by Dip Coating Technique, Materials Research.
- 35.**Rossi S. (2003), Corrosion protection properties of electroless NickelyPTFE, Phosphatey MoS₂ and BronzeyPTFE coatings applied to improve the wear resistance of carbon steel, Surface and Coatings Technology.
- 36.**Baylón K. (2017), Past, Present and Future of Surgical Meshes: A Review, Membranes.
- 37.**Bevers D. (1996), Examination of the influence of PTFE coating on the properties of carbon paper in polymer electrolyte fuel cells, Journal of Power Sources.
- 38.**Bilsel Y. (2012), The search for ideal hernia repair; mesh materials and types, International Journal of Surgery.
- 39.**Bishop C.A. (2011), Vacuum Deposition onto Webs, Films, and Foils, Elsevier.
- 40.**Blanchet G.B. (1993) Deposition of amorphous fluoropolymers thin films by laser ablation, Applied Physics Letters.

41. Bunshah R.F., Martin P.M. (1994), Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, William Andrew Publications.
42. CY Scientific Instruments (2019), Dip Coater. <https://www.cysi.wang/Dip-Coater/>
43. Dupont (2007), Applying Teflon® Coatings, RJ Chase Company http://www.rjchase.com/application_guidelines.pdf
44. Eikos Inc. (2018), Coating Deposition, Technology. <https://www.eikos.com/coating-deposition.html>
45. Foust S.A. (2014), Ultrathin PTFE Coating for Hypodermic Needles Enabled by Mussel-Inspired PDA Adhesive Layer, University of Arkansas.
46. Glenro Inc. (2018), Standard Automated Dip Coating & Drying Systems (2018). <http://www.glenro.com/conformal-auto.html>
47. Giampa F. (2004), Design by Function: A Methodology to Support Designer Creativity, International Design Conference.
48. Himma N.F. (2017), Preparation of Superhydrophobic Polypropylene Membrane Using Dip-Coating Method: The Effects of Solution and Process Parameters Polymer-Plastics Technology and Engineering.
49. Holmarc (2018), Dip coating Unit. https://www.holmarc.com/dip_coating_unit.php
50. Jafari R., Menini R., Farzaneh M. (2010), Superhydrophobic and icephobic surfaces prepared by RF-sputtered polytetrafluoroethylene coatings, Applied Surface Science.
51. Lawson K.J. (2012), Fluoropolymers 1: Synthesis, Topics in Applied Chemistry, Springer.
52. Le D. (2013), Mesh choice in ventral hernia repair: so many choices, so little time, American Journal of Surgery.
53. Dabirian R., Guerrero V.H., Loza D. (2014), Construction of Low Cost Sin and Dip Coaters for Thin Film Deposition Using Open Source Technology, Momento 49 (2014).
54. Makhlof A.S.H. (2011), Nanocoatings and ultra-thin films, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering.
55. Matl F.D. (2008), New Anti-Infective Coatings of Medical Implants, Antimicrobial Agents and Chemotherapy.
56. Mayagoitia-González J.C. (2015), Guías de Práctica Clínica para Hernias de la Pared Abdominal, Asociación Mexicana de Hernia, A.C.
57. Mikhailov I.V., Sidorchuk S.V., Lavrusenko S. R. (2001), Polytetrafluoroethylene in medicine, Plasticheskie Massy.
58. Rastegarpour A., Cheung M., Vardhan M., Ibrahim M.M., Butler C.E., Levinson H. (2016), Surgical mesh for ventral incisional hernia repairs: Understanding mesh design, Plastic Surgery.
59. Scriven L.E. (2011), Physics and Applications of DIP Coating and Spin Coating, Materials Research Society, Symposium Proceedings.
60. 3D Polymers (2018), Dip coating. <http://www.3-dpolymers.com/dip-coating/>
61. Seshan K. (2002), Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques, William Andrew Publications.
62. SHC Technologies (2017), Conformal Coating Dip System. <https://www.conformalcoating.co.uk/>
63. SKF (2019), Coating Technologies and Measurement Methods, Evolution Online. <http://evolution.skf.com/coating-technologies-and-measurement-methods-2/>
64. Takács I. (2009), Silicone Covered Polypropylene Mesh for Laparoscopic Ventral Hernia Repair, Tesis Doctoral University of Pécs School of Medicine.

65. Vaideki K. (2016), Plasma technology for antimicrobial Textiles, Plasma technology for antimicrobial textiles, Elsevier.
66. Weng R., Zhang H., Liu X. (2014), Spray-coating process in preparing PTFE-PPS composite super-hydrophobic coating, AIP Advances.
67. Wilk S.J. (2004), Teflon™-coated silicon apertures for supported lipid bilayer membranes, Applied Physics Letters.
68. Wu X., Wyman I., Zhang G., Lina J., Liua Z., Wang Y., Hu H. (2016), Preparation of superamphiphobic polymer-based coatings via spray- and dip-coating strategies, Progress in Organic Coatings.
69. Xia C. (2000), Preparation of yttria stabilized zirconia membranes on porous substrates by a dip-coating process, Solid State Ionics.
70. Brown C.M., Nash C. (1988), Aquaculture Development and Coordination Programme, Guidelines for bioprogramming and design, United Nations Development Programme FAO. <http://www.fao.org/3/s6665e/s6665e04.htm#3.1%20preliminary%20design>
71. Canton A. (2008), Diseño Preliminar, <http://antoniojosecanton.blogspot.com/2008/04/clase-1.html>
72. Nirosa Ingeniería (2017), Basic Engineering. <http://nirosa.es/en/servicio/ingenieria-basica/>
73. Guato-Burgos M.F. (2013), Ingeniería de Concepto, Ingeniería Básica, Ingeniería de Detalle, Empresa y tecnología. <http://empresamastecnologia.blogspot.com/2013/05>
74. Hidalgo-Aznar J.M. (2016), Ingeniería Básica, Proyectos Industriales. <https://proyectplant.wordpress.com/ingenieria-basica/>
75. Francor Construcción Industrial (2015), Ingeniería Conceptual Básica y de Detalle, <http://francor.com.mx/ingenieria-basica-y-de-detalle/>
76. Corona F. (2006), Ingeniería Conceptual, Básica y de Detalle, Ingeniería Química Net. <http://www.ingenieriaquimica.net/noticias/155-ingenieria-conceptual-basica-y-de-detalle>
77. Sanchez-Mejía C. (2019), Elementos Básicos del Diseño de Productos, La Guía del Ingeniero Industrial y del Emprendedor. <http://www.ingenieria.unam.mx/~guiaindustrial/iip/disenomenu3.htm>
78. Ibañez-Aguilera M., Sánchez M. (2016), Etapas de Ingeniería Conceptual, Ingeniería Básica, Ingeniería de Detalle. https://www.academia.edu/11460301/ETAPAS_DE_INGENIERIA_INGENIERIA_CONCEPTUAL_INGENIERIA_BASICA_INGENIERIA_DETALLE
79. Gudmundsson S. (2013), General Process of Aircraft Design, Methods and Procedures, Butterworth-Heinemann.
80. Insignares F.J. (2016), Ingeniería Conceptual, Básica, Detallada y Procura de Equipos para la Construcción de una Planta de Tratamiento de Agua en una Central de Procesamiento de Fluidos (CFP), Universidad de Santo Tomás de Aquino, Colombia.
81. Sforza P.M. (2014) Commercial Airplane Design Principles, Butterworth-Heinemann.
82. <https://www.oreilly.com/library/view/commercial-airplane-design/9780124199538/>
83. Nieto-Morote A.M., Asís Ruz F. (2013), Tema 3 Ingeniería básica, OpenCourseWare de la Universidad Politécnica de Cartagena. http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/11565/mod_resource/content/
84. Dieter G.E., Schmidt L.C. (2007), Engineering Design, McGraw-Hill.
85. Strawbridge I., JAMES P.F. (1986), The Factors Affecting the Thickness of Sol-Gel Derived Silica Coatings Prepared by Dipping, Journal of Non-Crystalline Solids.

86. Brinker C.J., Frye G.C., Hurd A. J., Ashley C.S. (1991), Fundamentals of Sol-Gel Dip Coating, Thin Solid Films.
87. Fang H.W., Li K.Y., Su T.L., Yang T.C.K., Chang J.S., Lin P.L., Chang W.C. (2008), Dip coating assisted polylactic acid deposition on steel surface: Film thickness affected by drag force and gravity, Materials Letters.
88. Mena B., Masahide T., Yomei T., Toshinobu Y. (2007), Preparation and properties of polyphenylsiloxane-based hybrid glass films obtained from a non-aqueous coating sol via a single-step dip-coating, Optical Materials.
89. Benramache S., Benhaoua B., Chabane F., Bentrach H., Abdessemed S. (2012), Effect of the Dip-coating Speed on the Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films, International Journal of Science and Engineering Investigations.
90. Soufiani J.M. (2016), Investigation and Modeling of Dip-Coating Process for Dispersions, Tesis Doctoral, The University of Western Ontario. <https://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=5220&context=etd>
91. O'Kane Mary (2019), Dip Coating: Guide to Troubleshooting Defects, University of Sheffield in collaboration with Ossila Ltd. <https://www.ossila.com/pages/dip-coating-defect-troubleshooting>
92. Brinker C.J. (2013), Chapter 10 Dip Coating, Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films, Springer. <https://www.semanticscholar.org/paper/Chapter-10-Dip-Coating-Brinker>
93. Molaire M. (2005), A Semi-Empirical Model For Dip Coating: Thickness and Thickness Uniformity Control, NexPress Solutions Inc.
94. Bindini E., Naudin G., Faustini M., Grosso D., Boissiere C. (2017), Critical Role of the Atmosphere in Dip-Coating Process, The Journal of Physical Chemistry.
95. Ossila (2019), Dip Coating Theory: Film Thickness. <https://www.ossila.com/pages/dip-coating-theory-film-thickness#Overview>
96. Campbell C. (2015), Cartesian, Delta, and Polar: The Most Common 3D Printers, Makezine, Make Community. <https://makezine.com/2015/03/10/cartesian-delta-polar-common-3d-printers/>
97. Obudho B. (2019), 3D Printer Axis – All You Need To Know, All3DP, <https://all3dp.com/2/3d-printer-axis-all-you-need-to-know/>
98. Beskrivelse (2019), Creality Ender-5 – 220*220*300 mm, Tollefsen-Trading, <https://tollefsen-trading.no/produkt/creality-ender-5-220220300-mm/>
99. Locker A. (2019), Creality Ender 5 Review: Best 3D Printer Under \$500, Sep 20, 2019, All3DP, <https://all3dp.com/1/creality-ender-5-review-3d-printer-specs/>
100. Lorenzo J. (2019), Análisis de la Ender 5, La mejor actualización de la Ender 3 con diferencia, Of3lia, <https://of3lia.com/analisis-opinion-ender-5/>
101. Peña-García S., Cañete-Vela I (2014)., Diseño del prototipo de un kit de impresora 3D, Trabajo final de grado, Universidad Politécnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/24671>
102. Grutle Ø.K. (2015), 5-axis 3D Printer: Designing a 5-axis 3D printer, Tesis de Maestría, University of Oslo. http://www.robotikk.com/student/projects/OyvindKallevikGrutle3Dprint_5ax_ELDAT/Grutle-master.pdf
103. Weiss J. (2019), Dip coater from KSV NIMA, Quantum Design Europe , <https://lot-gd.de/en/products/materials-science/dip-coater/product/dip-coater/>
104. Ossila (2018), Dip Coater in Development, <https://www.ossila.com/blogs/news/dip-coater-in-development>

105. Apex Instruments (2016), Single-Vessel Dip Coating System –NXT dip- 150S, <http://www.apexicindia.com/products/dip-coating-unit/nxt-dip-150s>
106. Segura L.J., Loza-Matovelle D.; Guerrero V.H.; Reza D. (2016), Mechanical and Electronic Systems of an Open Source Based Spin and Dip Coater, Revista Politécnica.
107. Ewanss J. (2019), What Is Backlash In Engineering?, Santander Formula 1, <https://formulasantander.com/what-is-backlash-in-engineering/>
108. Nikolov A., Wasan D. (2014), Wetting–dewetting films: The role of structural forces, *Advances in Colloid and Interface Science*
109. Kazemian A. (2017), Construction –Scale 3D Printing: Shape Stability of Fresh Printing Concrete, Proceedings of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference.
110. MTI Corporation (2019), Desktop Dip Coater with variable Speed (1-200 mm/min) - PTL-MM01, <https://www.mtixtl.com/DesktopDipCoaterwithvariableSpeed1-200mm/min-PTL-MM01.aspx>
111. KSV NIMA (2019), Dip Coaters, <https://www.biolinscientific.com/ksvnima/fabrication-and-deposition-of-thin-films/dip-coaters>
112. Aleksandar (2016), SCoreXY, Openbuilds. <https://openbuilds.com/builds/scorexy.4212/>
113. Heinz N. (2017), Tronxy X5 3D printer, HomoFaciens. https://www.homofaciens.de/technics-machines-3D-printer-Tronxy-X5_en.htm
114. Aniwaa (2017), Original Prusa I3 MK3 Prusa Research. <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/prusa-research-original-prusa-i3-mk3/>
115. Global Sources (2019), Creality 3D Printer FDM Ender-3 Dual Z-axis T-lead Screws and Motor Filament Sensor Cheap, <https://creality3dprinter.manufacturer.globalsources.com/si/6008850402580/pdtl/3D-printer/1163872296/3D-Printer.htm>
116. Imprimalia (2011), MendelMax 1.5, <http://imprimalia3d.com/services/mendelmax-15>
117. RepRap BCN (2019), Presentación oficial de la nueva BCN3D+ en Barcelona, <https://repprapbcn.wordpress.com/category/bcn-3d/>
118. RepRap Pro (2017), <http://repprapltd.com/repprapro/documentation/ormerod/index.html>
119. NOVELEC (2018), Finales de carrera: Qué son y características principales, <https://blog.gruponovelec.com/electricidad/finales-de-carrera-que-son-y-caracteristicas-principales/>
120. Carlyle Ryan (2016), ¿Qué finales de carrera son más precisos? <https://es.switch-case.com/50874898>
121. Escorza Manuel (2019), Finales de carrera, <http://www.mescorza.com/neumatica/sensoresweb>
122. Schneider (2018), Diferencia entre Contacto de ruptura brusca y Contacto de ruptura lenta. <https://www.se.com/es/es/faqs/FA235235/>
123. Sensor Fin de carrera (2019), <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-698775378-limit-switch-interruptor-fin-de-carrera-arduino-pic- JM?quantity=1>
124. PROMETEC (2018), Displays LCD. <https://www.prometec.net/displays-lcd/>
125. Fuente de poder (2019). https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-726910738-fuente-de-poder-k-mex-450w-atx-204-pines-2-conectores-sata- JM?quantity=1#position=7&type=item&tracking_id=eac67667-05ae-463d-bb7c-cc6e3bd29977
126. A4988 Stepper Motor Driver Carrier (2019), Octopart. https://octopart.com/a4988stepper+motor+driver+carrierpololu87292632?gclid=Cj0KCQiAno_uBRC1ARIsAB496IVRe30RI322sPx7AeJEK0j70cpf0SbwyFtdkMv1SwMJt_clclr0EaAi-ZEALw_wcB#

127. ARDUINO UNO REV (2019), Arduino. <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
128. DIP COATER (2019), Fytronix https://fytronix.com/index.php?route=product/product&product_id=340
129. DS102 bench top dip coating system (2016), SCH Technologies <https://www.conformalcoating.co.uk/index.php/coating-equipment/conformal-coating-systems>
130. Nano-Coat Dip Coating Systems (2019), ESD Center. https://www.esd-center.se/fileadmin/user_upload/esd_center/pdf_produkter/Gen3/Dipcoating_DC_2000_NANO_Brochure.
131. PLC Controlled Precision Dip Coater for Large Substrate upto 10"x12" - PTL-200 (2019), MTI Corporation. <https://www.mtixtl.com/PLCControlledPrecisionDipCoaterforLargeSubstrate-PTL-200.aspx>
132. Aurel Dip Coatin Unit (2019), Aurel Automation <https://www.aurelautomation.com/wp-content/uploads/2015/01/deep-coating.pdf>
133. 3D Eliminar vibraciones en impresión 3D (2019), LifeHacks. <https://lifelifehacks3d.com/ciencia-y-tecnologia/eliminar-vibraciones-en-impresion-3d/>
134. Mejorando la calidad de impresión (2017), PLA Impresiones. <https://plaimpresiones.wordpress.com/2017/09/20/mejorando-la-calidad-de-impresion-vibraciones/>
135. Diagnosing and fixing ringing versus vibration artefacts (2017), Desi Quintans. <http://www.desiquintans.com/ringing>
136. Vibration-Mitigating Algorithm Increases Speed of 3D Printing (2017), Schelmetic Tracy. <https://www.designnews.com/materials-assembly/vibration-mitigating-algorithm-increases-speed-3d-printing/120098194157871>
137. Cork Gasket Damper for NEMA 17 - 3mm (2019), Grobotronics. <https://grobotronics.com/cork-gasket-damper-for-nema-17-3mm.html?sl=en>
138. Pads para Lavadora Aísla Ruidos Anti Vibración Amortigua (2019). <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-615668765-kit-4-pads-p-lavadora-aisla-ruidos-anti-vibracion-amortigua- JM?quantity=1>
139. Vibration Isolator (2019), SDI Company. <https://www.sdicompany.com/en/dipcoater/list-08.php>
140. Cejarosu (2005), Mecanismo Tornillo-Tuerca, Mecanoso. <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/>
141. Ikazkuntza Birtual eta Digitalizatuen LHII (2019), CIFP de Aprendizajes Virtuales https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/DPM/DPM06/es_DFM_DPM06_Contenidos/CalculoHusillo.htm
142. Kerk H. (2018), Noise and Vibration in Leadscrew-Driven Motion Designs and How to Avoid Them, Advanced Motion Solutions white PAPERS, Ametek. <https://www.engineeringwhitepapers.com/white-papers/noise-and-vibration-in-leadscrew-driven-motion-designs-and-how-to-avoid-them/>
143. González-Viñas J.L. (2019), MECANISMO DE HUSILLO Y TUERCA, Mecanismos de transmisión de movimiento, <http://almez.pntic.mec.es/jgonza86/>
144. Torres-Búa M. (1999), Tornillo-, tuerca, Espazo Abalar. https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/54_tornillotuerca.html
145. Salazar S. (2016), Husillo: el tornillo sin fin. <http://www.sebastiansalazar.com/husillo-el-tornillo-sin-fin/>

- 146.** Bruscianelli C. (2011), Acoples Giro-Desplazamiento Lineal, Laboratorio C, Universidad Simón Bolívar. <http://www.labc.usb.ve/paginas/EC5136/AcoplesGiroDesp.pdf>
- 147.** THK (2011), Rodamiento lineal de rodillos. <https://thk.com/?q=mexico/node/7508>
- 148.** Schaeffler (2019), Rodamientos lineales y unidades de rodadura lineal. <https://medias.schaeffler.com/medias/es!hp.info/KH>
- 149.** Thomson (2019), Rodamientos lineales y otros productos de rodamientos lineales. <https://www.thomsonlinear.com/es/productos/rodamientos-lineales/acerca-de-rodamientos-lineales>
- 150.** Logicbus (2012), Motores a pasos. https://www.logicbus.com.mx/info_motores_a_pasos.php
- 151.** Collin D. (2016), Detent torque and holding torque, Motion control tips, <https://www.motioncontroltips.com/faq-whats-the-difference-between-detent-torque-and-holding-torque/>
- 152.** Sánchez-Sánchez L.H. (2011), Construcción de una máquina fresadora de control numérico, Tesis profesional Universidad Nacional Autónoma de México.
- 153.** Bertomeu J., Garcóa J., Gardonio S., Gómez M., Granados F. (2019), Motor Paso a Paso Máquinas e Instalaciones Eléctricas. http://www1.frm.utn.edu.ar/mielectricas/docs2/PaP/MOTOR_PaP_FINAL.pdf
- 154.** Benne de Bakker (2019), How to control a stepper motor with A4988 driver and Arduino, Makerguides. <https://www.makerguides.com/a4988-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/>
- 155.** Pons F. (2018), Control de motor paso a paso con Arduino y pololu A4988, Yo Maker. <http://yomaker.com/control-de-motor-paso-a-paso/>
- 156.** Crespo J.E. (2019), Motor paso a paso con Arduino, Aprendiendo Arduino. <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/motor-paso-a-paso/>
- 157.** Mecatronica LATAM (2018), ¿Qué es un Motor Paso a Paso? <https://www.mecatronicalatam.com/motores/motor-paso-a-paso>
- 158.** Carletti E.J. (2019), Motores paso a paso: Características básicas, Robots argentina. http://robots-argentina.com.ar/MotorPP_basico.htm
- 159.** Allegro MicroSystems (2019), A4988- DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection, <https://www.allegromicro.com/en/Products/Motor-Drivers/Brush-DC-Motor-Drivers/A4988>
- 160.** Brico Geek, Motor paso a paso 3.2 kg/cm NEMA 17. <https://tienda.bricogeek.com/motores-paso-a-paso/546-motor-paso-a-paso-nema-17-32kg-cm.html>
- 161.** HetPro (2019), NEMA 17, <https://hetpro-store.com/nema-17/>
- 162.** Disai automatic systems (2019), Acoplamiento flexibles, https://www.disai.net/wp-content/uploads/catalogos_pdf/Acoplamiento.pdf
- 163.** Zikodrive (2017), ¿Cuál es la velocidad máxima que puedo conseguir con un motor de pasos? <https://www.zikodrive.com/es/ufags/whats-maxima-velocidad-i-can-get-stepper-motor/>
- 164.** Bai W., Yang M., Dai J., Yu H., Wang G., Qi C. (2016), Novel polyimide coated fiber Bragg grating sensing network for relative humidity measurements, Optics Express.
- 165.** Scherino L., Giaquinto M., Micco A., Aliberti A., Bobeico E., La Ferrara V., Ruvo M., Ricciardi A., Cusano A. (2018), A Time-Efficient Dip Coating Technique for the Deposition of Microgels onto the Optical Fiber Tip, Fibers.

- 166.** Rambausek L., Bruneel E., Mey G., Van Langenhove L. (2014), Polyimide Dielectric Layer on Filaments for Organic Field Effect Transistors: Choice of Solvent, Solution Composition and Dip-Coating Speed. *Autex Research Journal*.
- 167.** El Yamny S. (2012). Preparation and Characterization of ZnO: In Transparent Conductor by Low Cost Dip Coating Technique. *Journal of Modern Physics*.
- 168.** Wang G., Hirasa T., Moses D., Heeger A.J. (2004), Fabrication of regioregular poly(3-hexylthiophene) field-effect transistors by dip-coating, *Synthetic Metals*.
- 169.** Apsari R., Yusliza Y. (2015), Synthesis and characterization of hydroxyapatite layer on cobalt alloys through dip coating method as a prosthetic bone implant candidate, *Journal of Optoelectronics and Biomedical Materials*.
- 170.** Abbas F., Bensaha R., Taroré H. (2019), The influence of Zn²⁺ doping and annealing temperature on grown-up of nanostructures TiO₂ thin films prepared by sol-gel dip-coating method and their photocatalytic application, *Optik*.
- 171.** Martínez-Saucedo G., Castanedo-Pérez R., Torres-Delgado G., Mendoza-Galván A., Zelaya Ángel O. (2017), Cuprous oxide thin films obtained by dip-coating method using rapid thermal annealing treatments, *Materials Science in Semiconductor Processing*.
- 172.** Vital A., Vayer M., Tillocher T., Dussart R., Boufnichel M., Sinturel C. (2017), Morphology control in thin films of PS:PLA homopolymer blends by dip-coating deposition, *Applied Surface Science*.
- 173.** Jiang Y., Shi K., Tang H., Wang Y. (2019), Enhanced wettability and wear resistance on TiO₂/PDA thin films prepared by sol-gel dip coating, *Surface and Coatings Technology*.
- 174.** Roland S., Gamys C.G., Grosrenaud J., Boissé S., Pellerin C., Prud'homme R.E., Bazuin C.G. (2015), Solvent Influence on Thickness, Composition, and Morphology Variation with Dip-Coating Rate in Supramolecular PS-b-P4VP Thin Films, *Macromolecules*.
- 175.** Boukerika A., Guerbous L., Chelef H., Benharrat L. (2019), Preparation and characterization of bright high quality YAG: Eu³⁺ thin films grown by sol-gel dip-coating technique, *Thin Solid Films*.
- 176.** Faustini M., Louis B. Albouy P.A., Kuemmel M., Grosso D. (2010), Preparation of Sol-Gel Films by Dip-Coating in Extreme Conditions, *The Journal of Physical Chemistry C*.
- 177.** Roland S., Pellerin C., Bazuin C.G., Prud'homme R.E. (2012), Evolution of Small Molecule Content and Morphology with Dip-Coating Rate in Supramolecular PS-P4VP Thin Films, *Macromolecules*.
- 178.** Zhang Y., Vandaele A., Seveno d., De Coninck J. (2018), Wetting dynamics of polydimethylsiloxane mixtures on a poly(ethylene terephthalate) fiber, *Journal of Colloid and Interface Science*.
- 179.** Afsarimanesh N., Mukhopadhyay S.C., Kruger M., (2018), Performance Assessment of Interdigital Sensor for Varied Coating Thicknesses to Detect CTX-I, *IEEE Sensors Journal*.
- 180.** Beckford S., Wang Y., Zou M. (2011), Wear-resistant PTFE/SiO₂ nanoparticle composite films, *Tribology Transactions*.

APÉNDICE A- Matriz QFD

Requerimiento	Especificación														Prioridad relativa	Importancia absoluta
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV		
a	5	3	1	5	5	0	3	3	1	0	1	5	5	1	5	190
b	1	1	1	3	5	0	5	3	1	0	0	1	3	0	5	120
c	0	1	1	0	0	5	1	3	0	0	1	1	3	0	3	48
d	0	1	1	0	1	5	3	5	0	0	0	5	5	0	3	78
e	1	5	3	1	5	0	5	5	5	0	3	5	1	5	5	220
f	0	0	0	0	1	1	1	5	3	3	5	5	5	0	3	87
g	3	5	5	5	5	1	5	5	3	3	5	1	1	1	5	240
h	1	3	1	1	5	5	3	5	3	3	3	1	0	3	1	37
i	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	1	1	1	5	1	14
j	0	3	0	0	0	1	5	1	5	5	3	1	1	5	1	30
k	0	1	0	1	1	0	1	3	1	0	1	5	5	3	1	22
l	0	1	0	1	1	0	1	5	0	0	5	3	1	3	3	63
m	1	0	0	1	0	0	1	1	3	3	5	1	1	5	1	22
	12	24	13	18	29	21	34	47	25	17	33	35	32	31		
Dificultad técnica	1	3	5	3	1	3	3	1	3	1	1	3	1	3		
Importancia absoluta	52	86	57	76	115	47	118	147	71	35	91	111	100	65		

Nivel de relación	
Sin relación	0
Poca relación	1
Mediana relación	3
Alta relación	5

Importancia	
Mínima	1
Media	3
Máxima	5

Nivel de Dificultad	
Mínima	1
Media	3
Máxima	5

Relación técnica	
Directa	●
Inversa	○

Prioridad a.t.	●
Segunda p.a.t.	○
Tercera p.a.t.	○

REQUERIMIENTO		Importancia
1	Que sostenga la malla (Sujeción)	5
2	Que mantenga la misma posición en todo el sustrato/ pueda generar capas uniformes	5
3	Que se pueda trabajar con el material elegido	4
4	Que pueda contener el material a ocupar	4
5	Que pueda mover el sustrato y ponerlo en contacto con la solución	5
6	Que esté integrado en un solo dispositivo, o tenga el menor número de elementos.	4
7	Que el proceso sea repetible	5
8	Que funcione de manera automática/programada	3
9	Que sea seguro/ no genere daños a salud y/o ambiente	3
10	Que sea rápido	1
11	Que no ocupe demasiado espacio	2
12	Que no sea muy complejo en cuanto a su operación	4
13	Que consuma la menor cantidad de recursos energéticos	2

ESPECIFICACIÓN	
I	Fuerza sobre sustrato
II	Espesor de la capa
III	Peso final sustrato
IV	Tensión de la malla
V	Desnivel
VI	Material
VII	Variabilidad (de espesores bajo mismas condiciones)
VIII	Intervención de usuarios
IX	Variación de velocidades desplazamiento
X	Velocidad de procesamiento
XI	Número de etapas o subprocesos
XII	Dimensiones
XIII	Volumen del sistema (interior)
XIV	Voltaje de operación

APÉNDICE B- Comparativa dip coaters comerciales

Marca y modelo	Velocidades de desplazamiento		Tamaño de muestras cm x cm	Carrera mm	Tipo de mecanismo	Actuador	Energía de operación V y/o A	Dimensiones cm x cm x cm	Referencia
	Inmersión mm/min	Retracción mm/min							
 <p>MTI Corporation EQ-PTL-OV5P-L 5</p>	1-200	1-200	25,4 x 7,62	300	Polea con cable de acero*	motor a pasos	208-240V AC (2300W)	60 x 50 x 75 (L W H) (225L)	https://www.mtixtl.com/images/products/detail/EQPTLOV5PL.jpg
 <p>MTI Corporation PTL-HT-2-L</p>	0,12 -540	0,12 -540	4 x 5	150	Tornillo de avance (tornillo sin fin)	servomotor	208-240VAC, 50/60Hz 600 W max	63 x 36.8 x 42	https://www.mtixtl.com/PTL-HT-2.aspx
 <p>MTI Corporation PTL-MM02</p>	1-200	1-200	5 x 2,5 (x0,25)	0-75	Polea con cable de acero*	motor a pasos	DC24V, 90W (110/220V AC adapter)	34 x 36 x 54	https://www.mtixtl.com/MillimeterGradeProgrammableDipCoaterwithTouchScreenDigitalControlle.aspx
 <p>SCH DS101</p>	0-150	0-150	n/e	n/e	n/e	Neumático	n/e	95 x 59 x 179,5	https://www.conformalcoating.co.uk/wp-content/uploads/2016/11/SCH-Brochure-DS101-web.pdf
 <p>HOLMARC HO-TH-01</p>	1,08 - 540	1,08 - 540	n/e	100	Tornillo de avance (tornillo sin fin)	servo motor	230 V (50 Hz)	20 x 15 x 38	https://www.holmarc.com/dip_coating_unit.php
 <p>Holmarc PTL-MM01</p>	1-200	1-200	50 x 25 x 2,5	0-200	Cable	motor a pasos	110/220 V (AC)	32 x 25,5 x 54	https://www.cysi.wang/Dip-Coater/Desktop-Program-control-dip-coater-machine.html
 <p>GLENRO 4124 DIP COATER</p>	50,8 - 508	50,8 - 508	n/e	254	transportador de rodillos con cadena	n/e	n/e	n/e	http://www.glenro.com/conformal-auto.html

APÉNDICE C- Comparativa dip coaters desarrollados para investigación

Carrera mm	Variables que controla	Tipo de mecanismo	Actuador	Energía de operación	Dimensiones	Referencia	Viscosidad solución	Espesores de capa logrados
				V y/o W	cm x cm xcm			µm
n/e	Velocidad de inmersión/retracción, tiempo de inmersión, número de ciclos, posición del sustrato dentro y fuera de la solución	Tornillo	Motor a pasos	n/e	n/e	Gelamo, Baptista, et al., Multilayer Graphene Films Obtained by Dip Coating Technique, Mat. Res. vol.18 no.4 São Carlos July/Aug. 2015	n/e	n/e
n/e	n/e	Tornillo	Motor a pasos	n/e	n/e	Ashiri R., Nemati A., Sasani M., Crack-free nanostructured BaTiO ₃ thin films prepared by sol-gel dip-coating technique, Ceramics International 40 (2014) 8613–8619	n/e	0,026
n/e	Velocidad de inmersión/retracción	Cremallera y piñones + caja de velocidades/ engranes (x3)	motor DC (x2)	5 y 24 V (DC)	25 x 25	Loza D., Guerrero V., Dabirian R., Construction of low cost spin and dip coaters for thin film deposition using open source technology, MOMENTO, No 49 (2014)	n/e	n/e
220	Velocidad de inmersión/retracción, posición de la muestra, número de inmersiones, tiempo de inmersión.	Caja de engranes y banda de transmisión con polea. Eje guía (de	motor a pasos	5 y 24 V (DC)	n/e	Adamek P., Construction of dip coater, Edukacja – Technika – Informatyka” nr 2/16/2016	n/e	n/e
n/e	n/e	n/e	n/e	n/e	n/e	Yang M., Bai W., et al., Novel polyimide coated fiber Bragg grating sensing network for relative humidity measurements, Optical Society of America, 22 Feb 2016, Vol. 24, No. 4	Poliimida (ZKPI-305IIE, viscosidad: 5000-6000cp)	12,7 - 55,3
200	Velocidad de inmersión/retracción, tiempo de inmersión, número de ciclos	Cable	Motor a pasos	110/220 V (AC)	32 x 25,5 x 54	N. Afsarimanesh, S. C. Mukhopadhyay and M. Kruger, Performance Assessment of Interdigital Sensor for Varied Coating Thicknesses to Detect CTX-I, IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 10, pp. 3924-3931, 2018	n/e	21-35
								30-42

APÉNDICE D- Tabla de compatibilidad para eliminación de soluciones

		CRITERIOS DE SELECCIÓN								
Concepto		Compatibilidad asegurada	Cumplimiento de lista de requerimientos	Realizable (en principio)	Dentro de los costos permitidos	Incorpora medidas de seguridad	Preferido por el diseñador/empresa	Información adecuada	Observaciones (indicaciones, razones)	Decisión
A1	1	+	+	+	?		+	+	No existen antecedentes específicos, pero posee grandes ventajas.	+
A2	2	?	?	+	?		-	?	Cumple menos cantidad de requerimientos. No hay mucha información.	-
A3	3	+	+	+	?			+	Probado para aplicaciones de tensión, no probado para esta aplicación.	+
A4	4	?	!	?	-		-	?	Mayor complejidad de fabricación y utilización. No hay mucha información.	-
B1	5	+	+	+	?		+	+	Se ha probado en sistemas de dio coating.	+
B2	6	-	?	!	?		-	+	No cumple con varios de los requerimientos.	-
B3	7	+	+	+	?		?	+	No se ha probado realmente para este tipo de aplicación.	+
B4	8	+	+	+	?		+	+	Excelente en aplicaciones de desplazamiento lineal de precisión.	+
C1	9	+	+	+	?		+	+	Cumple mayor número de requerimientos. Mucha información.	+
C2	10	+	+	+	?			?	No existe mucha información. Puede presentar mayor dificultad que C1.	?
C3	11	+	+	+	-			?	Requiere mayor complejidad e incorporación de elementos.	?
C4	12	?	?	+	-		-	-	No existen grandes ventajas de su uso. No hay mucha información. No se asegura compatibilidad.	-
D1	13	+	+	+	?		+	+	Existe mucha información y ha sido empleado en proyectos similares.	+
D2	14	+	?	+	?		-	+	Mayor complejidad en programación e implementación.	!
D3	15	+	+	+	?			?	Existe información sobre su utilización, pero no es tan accesible.	?
D4	16	+	+	+	?		+	+	Sus características pueden exceder los requerimientos. Más complejo de programar.	+

Evaluación por criterios de selección	
+	Sí
-	No
?	Falta de información
!	Revisar lista de requerimientos

Decisión	
+	Continuar con solución
-	Descartar solución
?	Revisar información/ reevaluar solución
!	Revisar lista de requerimientos para cambios

APÉNDICE E- Matriz de comparación por pares para ponderación de los criterios de evaluación

MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES

CRITERIO		PESO
A	Desplazamiento lineal	0,07602339
B	Suceptibilidad a vibraciones	0,08187135
C	Menor afectación del material	0,10526316
D	Menor ocupación de espacio	0,01754386
E	Mayor control en la velocidad de procesamiento	0,02923977
F	Menor número de componentes	0,03508772
G	Menor complejidad de interconexiones	0,05847953
H	Mayor facilidad de comunicación entre elementos	0,05847953
I	Menor dependencia entre elementos	0,02339181
J	Menor cantidad de recursos energéticos	0,04093567
K	Menores errores de operación	0,0994152
L	Menor complejidad para el ensamble	0,04678363
M	Mayor número de piezas estandarizadas o comerciales	0,03508772
N	Fácil mantenimiento	0,04093567
O	Componentes adicionales requeridos	0,00584795
P	Facilidad de control	0,0877193
Q	Menor tiempo de desarrollo	0,01754386
R	Menor complejidad de programación	0,07017544
S	Asequibilidad	0,07017544

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	SUMA	PESO
A		0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	13	0,07602339
B	1		0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	14	0,08187135
C	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18	0,10526316
D	0	0	0		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	3	0,01754386
E	0	0	0	1		1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5	0,02923977
F	0	0	0	1	0		0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	6	0,03508772
G	0	0	0	1	1	1		0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	10	0,05847953
H	0	0	0	1	0	1	1		1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	10	0,05847953
I	0	0	0	0	0	1	0	0		0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	4	0,02339181
J	0	0	0	1	1	0	0	0	1		0	1	1	0	1	0	0	0	1	7	0,04093567
K	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	17	0,0994152
L	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0		0	1	1	0	1	0	1	8	0,04678363
M	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1		0	1	0	1	0	1	6	0,03508772
N	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1		1	0	1	0	0	7	0,04093567
O	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1	0,00584795
P	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1		1	1	0	15	0,0877193
Q	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0		0	0	3	0,01754386
R	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1		0	12	0,07017544
S	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1		12	0,07017544

TOTAL 171 1

Criterios de mayor importancia. (Empleados para la generación de perfil de valor).

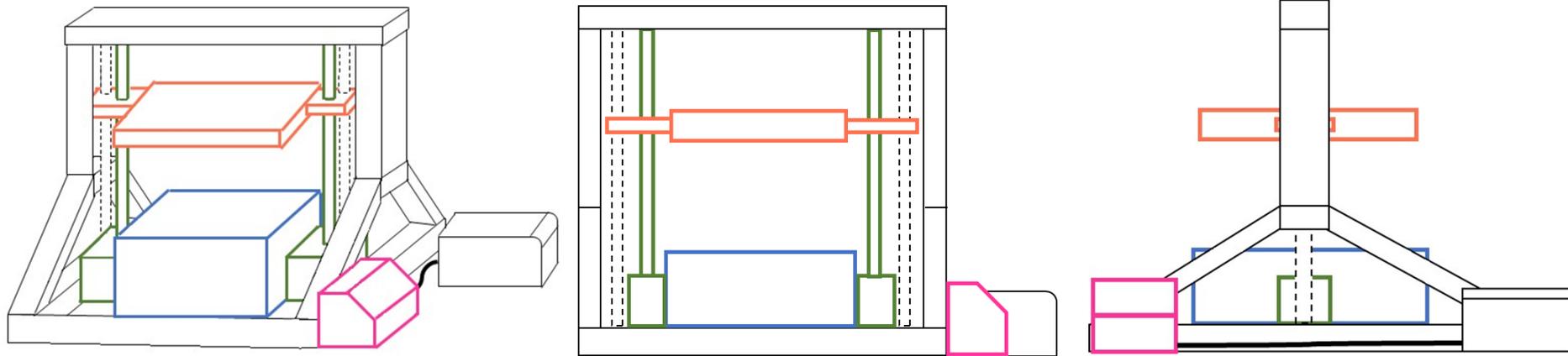
APÉNDICE F- Matriz de decisión para selección del concepto

CRITERIOS DE EVALUACIÓN		CONCEPTO I		CONCEPTO II		CONCEPTO III		CONCEPTO IV		CONCEPTO V		CONCEPTO VI		CONCEPTO VII		
CRITERIO	PESO	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	
A	Desplazamiento lineal	0,076023392	5	0,3801	4	0,3041	4	0,3041	3	0,2281	5	0,3801	3	0,2281	3	0,2281
B	Suceptibilidad a vibraciones	0,081871345	4	0,3275	3	-0,2456	3	-0,2456	2	0,1637	4	-0,3275	2	-0,1637	2	0,1637
C	Menor afectación del material	0,105263158	4	0,4211	4	0,4211	4	0,4211	4	0,4211	3	0,3158	3	0,3158	3	0,3158
D	Menor ocupación de espacio	0,01754386	4	0,0702	3	0,0526	3	0,0526	5	0,0877	4	0,0702	5	0,0877	5	0,0877
E	Mayor control en la velocidad de procesamiento	0,029239766	3	0,0877	3	0,0877	3	0,0877	5	0,1462	5	0,1462	3	0,0877	5	0,1462
F	Menor número de componentes	0,035087719	3	0,1053	3	0,1053	2	0,0702	3	0,1053	2	0,0702	3	0,1053	4	0,1404
G	Menor complejidad de interconexiones	0,058479532	5	0,2924	3	0,1754	2	0,1170	3	0,1754	2	0,1170	3	0,1754	4	0,2339
H	Mayor facilidad de comunicación entre elementos	0,058479532	4	0,2339	4	0,2339	3	0,1754	3	0,1754	4	0,2339	3	0,1754	4	0,2339
I	Menor dependencia entre elementos	0,023391813	4	0,0936	4	0,0936	4	0,0936	4	0,0936	4	0,0936	4	0,0936	4	0,0936
J	Menor cantidad de recursos energéticos	0,040935673	4	0,1637	3	0,1228	2	0,0819	4	0,1637	2	0,0819	3	0,1228	4	0,1637
K	Menores errores de operación	0,099415205	5	0,4971	4	0,3977	3	0,2982	5	0,4971	2	0,1988	3	0,2982	5	0,4971
L	Menor complejidad para el ensamble	0,046783626	5	0,2339	3	0,1404	2	0,0936	4	0,1871	2	0,0936	2	0,0936	4	0,1871
M	Mayor número de piezas estandarizadas o comerciales	0,035087719	3	0,1053	2	0,0702	2	0,0702	3	0,1053	2	0,0702	2	0,0702	3	0,1053
N	Fácil mantenimiento	0,040935673	4	0,1637	3	0,1228	3	0,1228	3	0,1228	2	0,0819	3	0,1228	3	0,1228
O	Componentes adicionales requeridos	0,005847953	3	0,0175	3	0,0175	2	0,0117	3	0,0175	2	0,0117	2	0,0117	4	0,0234
P	Facilidad de control	0,087719298	5	0,4386	4	0,3509	5	0,4386	5	0,4386	3	0,2632	4	0,3509	4	0,3509
Q	Menor tiempo de desarrollo	0,01754386	4	0,0702	3	0,0526	3	0,0526	4	0,0702	2	0,0351	3	0,0526	4	0,0702
R	Menor complejidad de programación	0,070175439	5	0,3509	3	0,2105	5	0,3509	2	0,1404	2	0,1404	3	0,2105	2	0,1404
S	Asequibilidad	0,070175439	5	0,3509	4	0,2807	4	0,2807	3	0,2105	2	0,1404	3	0,2105	3	0,2105
TOTAL				4,404		2,994		2,877		3,550		2,216		2,649		3,515
LUGAR				1		4		5		2		8		6		3

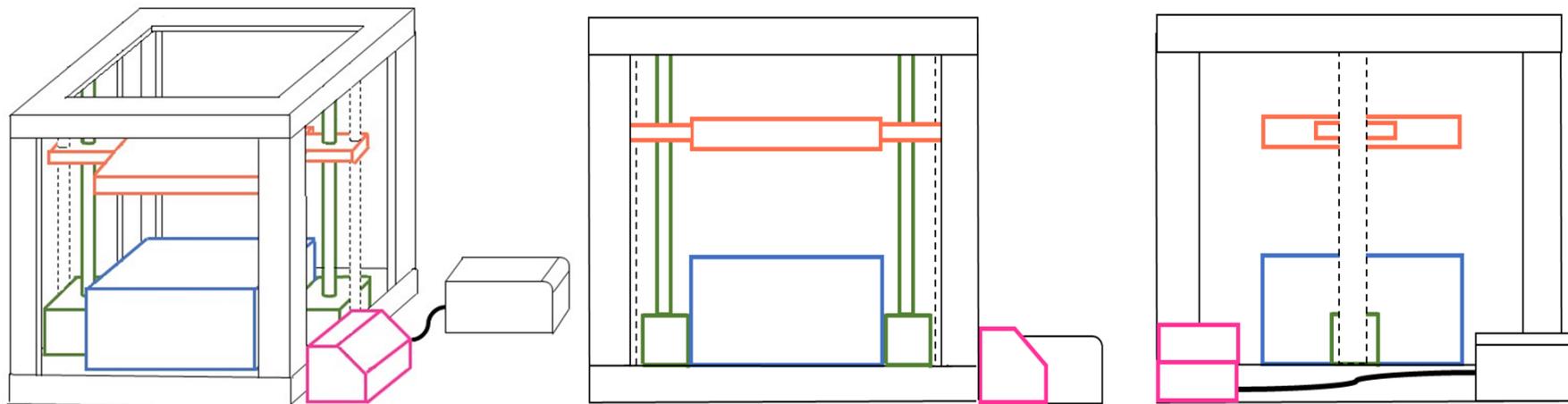
APÉNDICE G- Propuestas de Distribución Geométrica Aproximada del Sistema

Para todas las propuestas: **Sistema de Desplazamiento**, **Sistema de Sujeción**, **Sistema de Procesamiento**, **Sistema de Recubrimiento**

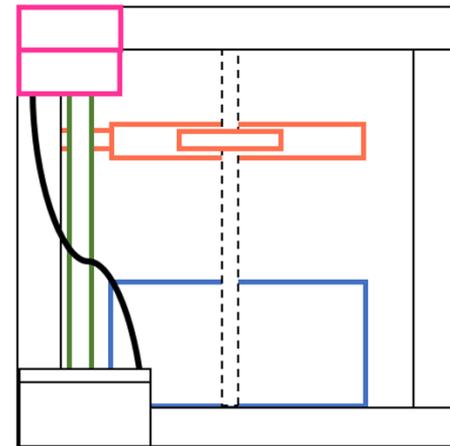
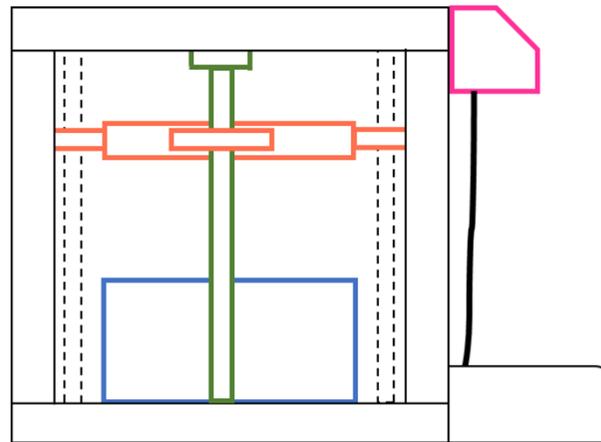
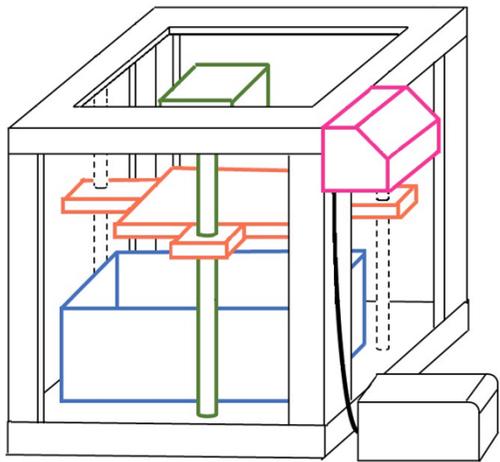
PROPUESTA 1



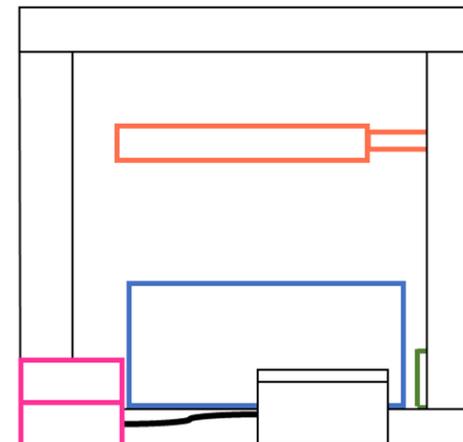
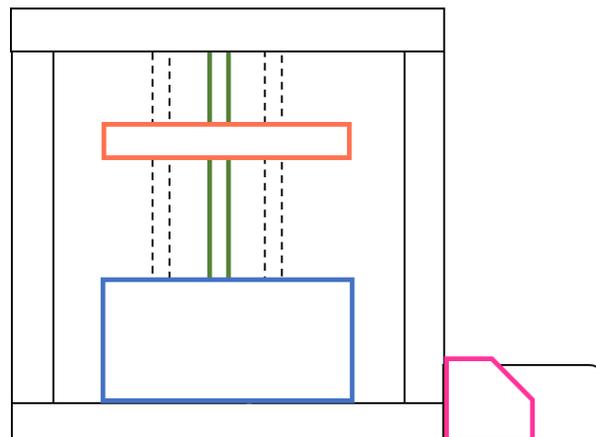
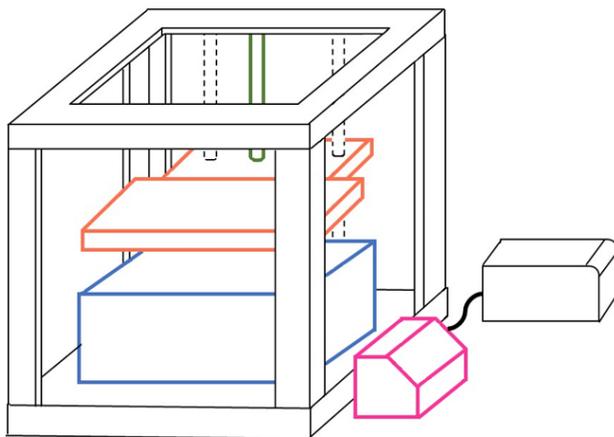
PROPUESTA 2



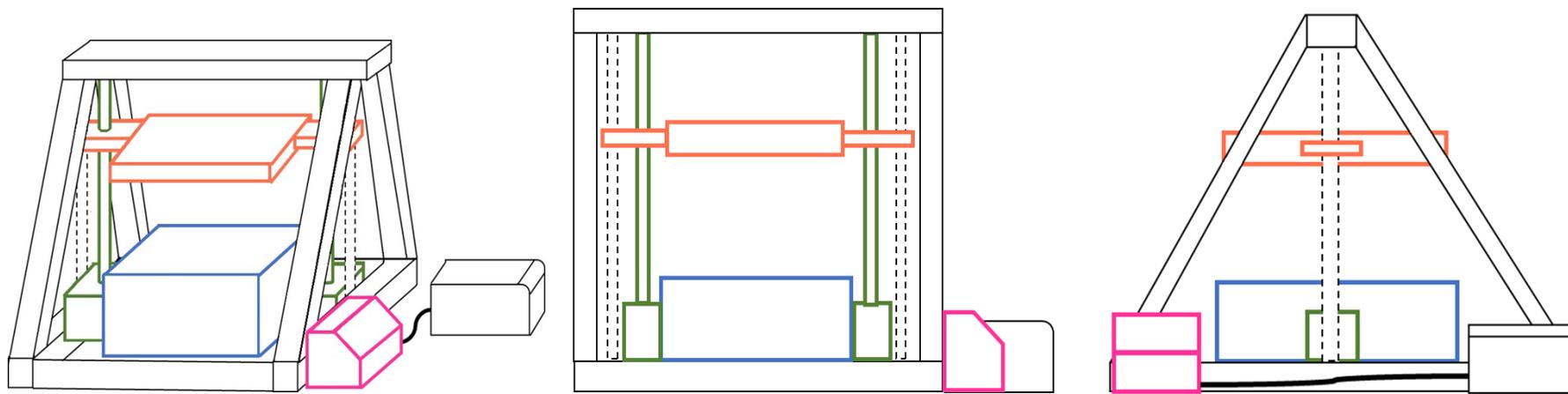
PROPUESTA 3



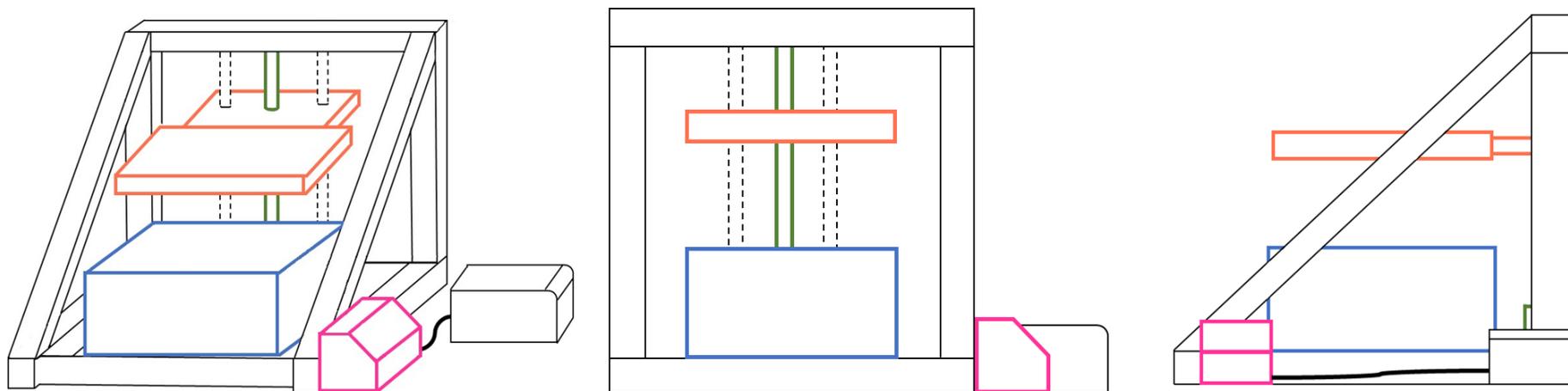
PROPUESTA 4



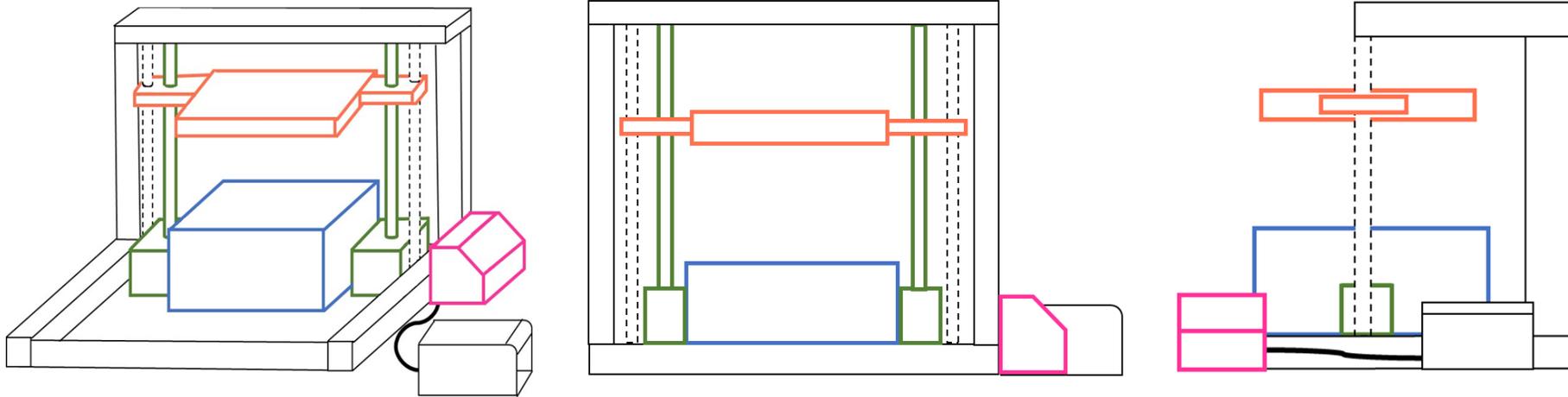
PROPUESTA 5



PROPUESTA 6



PROPUESTA 7



PROPUESTA 8

