



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Metodología de diseño para manufactura aditiva por proceso
de fotopolimerización en un modelo de prótesis mamaria
externa.”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE LA
MANUFACTURA**

Presentada por:

Christian Eduardo Rodríguez Echeverría

Sigrit Dailin Delgado Vega

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a todas las mujeres que atravesaron una mastectomía, pero que tienen ganas de seguir adelante para disfrutar de lo bello de la vida y sus alegrías. Fue una ardua labor para comprender el sentir de ellas, su realidad, deben de estar seguras de que esto lo hice con dedicación y cariño. Le agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de realizar un proyecto que sé que dejará huella en este mundo, y le agradezco a mi esposa Olguita, por su amor, su cariño y su entrega por apoyarme siempre que lo necesito, gracias por todo en este largo camino. Le agradezco a mi familia por su amor y sus ánimos para alentarme y siempre seguir adelante. A mi compañera de proyecto por su apoyo, paciencia y ardua contribución. A mi tutor Carlos Helguero PhD. por la grandiosa oportunidad de haberme animado a tomar la maestría e incluido en este proyecto y a todos los profesores de la maestría quienes me aportaron sus valiosos conocimientos, fue un placer haber estudiado nuevamente en ESPOL y en la rama de la ingeniería que más disfruto, la manufactura.

Christian Rodríguez

Este proyecto marca el cierre de una etapa de esfuerzo, aprendizaje y crecimiento, construida con el apoyo de grandes profesionales, experiencias internacionales y el redescubrimiento de la belleza de la manufactura. No habría sido posible sin aquellas personas que, con su ayuda y motivación, hicieron de este camino una travesía valiosa. A mi esperanza y motor, Carlos Javier Lasso, por estar presente en cada paso, brindándome su apoyo incondicional; a mi hermana Victoria, cuya palabra de aliento ha sido un refugio en los momentos difíciles; a mi compañero de proyecto, por su paciencia, dedicación y respaldo constante durante todo este proceso; a nuestro tutor de tesis, por su guía, enseñanzas y compromiso en cada etapa de este trabajo; y a nuestros profesores, por compartir su conocimiento y fomentar nuestra pasión por el aprendizaje. Finalmente, a Silvia, por enseñarme que, aunque la vida puede cambiar en un instante, la tenacidad y la motivación permiten que el tiempo borre poco a poco las huellas de los momentos más difíciles, recordándonos el seguir adelante de la mano de la familia y amigos que son la sal de la vida.

Sigrit Delgado

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

**Emérita Alexandra Delgado
Plaza**

Profesor de Materia

**Carlos Gabriel Helguero
Alcívar**

Tutor de proyecto

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros Christian Eduardo Rodríguez Echeverría y Sigrít Dailin Delgado Vega acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 04 de abril del 2025.

**Christian Eduardo Rodríguez
Echeverría**

Sigrít Dailin Delgado Vega

RESUMEN

El presente proyecto se centró en optimizar el diseño para manufactura aditiva mediante la utilización de un software con inteligencia artificial de un modelo de prótesis mamaria externa, creando una mejora de su estructura topológica para que la prótesis alcance las características biomecánicas de un seno sano. Además, se utilizó herramientas computacionales de manufactura para la simulación de características biomecánicas semejantes a las de un seno sano, proponer un nuevo diseño para ser manufacturado por una impresora 3D con metodología de fotopolimerización. Para la revisión de los resultados se realizó una comparativa entre el modelo obtenido por optimización topológica y uno fabricado con patrón giroide con 7.5% de relleno.

Este proyecto busca seguir la línea de objetivos del Proyecto Zule para el desarrollo de una prótesis mamaria personalizada mediante el uso de tecnologías de escaneo y de manufactura aditiva para beneficio de pacientes que hayan pasado por una mastectomía. Ofreciendo una solución cómoda y a un costo accesible.

Para la fabricación de la propuesta presentada en este proyecto se realizaron tres escaneos a pacientes que tienen mastectomía. Centrándose en el caso de una paciente, se realizó una malla de su torso, esto es, el seno sano y cicatriz, para posterior darle forma a la prótesis. Luego, esta malla pasó por un proceso de revisión, reparación y edición hasta convertirse en sólido. Una vez se realizó este procedimiento se generó la prótesis, utilizando herramientas de diseño y aplicaciones de optimización topológica en el software Fusion de Autodesk.

Obtenidos los resultados de la optimización topológica se escogió la mejor alternativa de diseño, esto es aquel que consigue los objetivos planteados con el material seleccionado, en este caso el escogido fue la resina flexible 80A de Formlabs, por sus propiedades mecánicas y biocompatibilidad. Este diseño pasó a ser manufacturado con tecnología de fotopolimerización. Además, se realizó una comparación entre los tiempos de impresión, material gastado y análisis de fuerzas entre la alternativa propuesta y la alternativa con patrón de relleno giroide.

Los resultados de este proyecto demostraron que el material utilizado por la prótesis con diseño generativo es mucho menor al que se utiliza con patrón giroide y es mucho más sencillo de retirar soportes, además al estar construido y personalizado con la dirección y magnitud de las fuerzas, este modelo propuesto tiene mucha más resistencia a la manipulación. Es decir que las pacientes no se preocupan por romper la prótesis al acomodarla dentro de un brasier.

Se evidencia que el considerar pliegues de piel en la geometría de cicatriz garantiza un ajuste más cómodo para la paciente, ya que se adapta de mejor manera al contorno de la cicatriz y del cuerpo. Además de proporcionar una reproducción personalizada de la forma del seno lo que hace que la prótesis, en apariencia, sea acorde al peso y anatomía de la paciente independientemente de sus características físicas.

En conclusión, la aplicación de una optimización topológica en la fabricación de prótesis mamarias representa una mejora en las propiedades mecánicas de la prótesis según los resultados obtenidos por simulación además de un ahorro significativo de material, lo que abarata costos de manufactura. Todo esto sin dejar de lado el impacto positivo que esta prótesis pueda tener en las pacientes.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. ANTECEDENTES Y PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Descripción del Problema	2
1.4. Objetivo general:	3
1.5. Objetivos específicos:	3
1.6. Alcance	3
1.6.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible	3
CAPITULO 2.....	4
2. METODOLOGÍA.....	4
2.1. Adquisición de datos	6
2.1.1. Escaneo tridimensional.....	7
2.2. Generación y Edición de Malla	8
2.3. Diseño Anatómico	8
2.4. Diseño Para Manufactura Aditiva	9
2.4.1. Edición de malla	9
2.4.2. Diseño generativo.....	12
2.5. Manufactura Aditiva (MA)	18
Revisión bibliográfica	18
CAPITULO 3:.....	20
3. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN Y DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA 20	
3.1. Primeras pruebas para el desarrollo de la metodología.....	20
3.1.1 Edición de malla.....	20
3.1.2 Diseño generativo	22
3.1.3 Consideraciones en la Manufactura Aditiva.....	23
3.2. Segundo intento	23
3.3. Resultado final.....	24
3.4. Simulación de características biomecánicas semejantes a las de un seno sano 27	
3.5. Impresión de prótesis	28
3.5.1. Modelo de prótesis con patrón giroide:	28
3.5.2. Modelo de prótesis creada por Optimización Topológica.....	29
3.6. Comparativa de Manufactura de las Prótesis	30

3.6.1.	Prótesis con Patrón Giroide al 7.5%	30
3.6.2.	Prótesis con Optimización Topológica	31
CAPITULO 4:.....		34
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
4.1.	Conclusiones.....	34
4.2.	Recomendaciones.....	35
BIBLIOGRAFÍA.....		36

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1:	Metodología del proyecto.....	6
Ilustración 2:	Pacientes voluntarias con mastectomía. a) Fotografía de una paciente con mastectomía, plano coronal. b) Fotografía de paciente con sujetador, plano sagital.....	7
Ilustración 3:	Escaneo de cicatriz y seno de paciente plano coronal	8
Ilustración 4:	Malla generada de prótesis en color morado y forma del seno sano en color rosa.	8
Ilustración 5:	Superficie superior (a) y superficie posterior (b) de prótesis mamaria externa.....	9
Ilustración 6:	Malla importada al software Fusion de Autodesk.	10
Ilustración 7:	Operaciones de reparación de malla realizadas a) Eliminar agujeros b) Reducción de malla c) Suavizar malla	10
Ilustración 8:	Operación "Coser y eliminar agujeros.....	11
Ilustración 9:	Vista plano de corte de la prótesis.	11
Ilustración 10:	a) Operación de transformación de malla a sólido b) Resultado obtenido	12
Ilustración 11:	Vista de cara posterior de prótesis después de esta operación	12
Ilustración 12:	Resultado de operaciones con la malla del torso de la paciente.	12
Ilustración 13:	Supresión de coincidencias entre los sólidos del cuerpo de la paciente y la prótesis.	13
Ilustración 14:	Creación de plano para generación de molde como medio de restricción para el diseño generativo. a) Dibujo de plano b) Creación de molde	13
Ilustración 15:	Propiedades mecánicas utilizadas para crear el material en Autodesk Fusion.....	14
Ilustración 16:	Geometría de obstáculo.....	15
Ilustración 17:	Geometría de conservación	15
Ilustración 18:	Geometrías de restricción	16
Ilustración 19:	Definición de elementos fijos de la prótesis	16
Ilustración 20:	Definición de cargas de fuerza utilizadas en la prótesis.	17
Ilustración 21:	Elección de proceso de manufactura	17
Ilustración 22:	Forma de prótesis obtenida mediante el escaneo de voluntarias del Proyecto Zule	20
Ilustración 23:	Malla de prótesis y sección del cuerpo de la paciente.....	20
Ilustración 24:	Herramienta cerrar agujeros	21
Ilustración 25:	a) Remallado, b) reducción de malla y c) suavización de bordes	21
Ilustración 26:	Prótesis y torso convertidos en sólido	22
Ilustración 27:	Criterios para realizar la generación topológica.	22
Ilustración 28:	Prótesis en diseño generativo	23
Ilustración 29:	Primeros resultados de diseño generativo	24
Ilustración 30:	Ventana de estado de modelo generativo.....	24
Ilustración 31:	Vista frontal de resultados de diseño generativo	25

Ilustración 32: Vista posterior de resultados de diseño generativo.....	25
Ilustración 33: Comparación de masa y coeficiente de seguridad entre resultados.....	26
Ilustración 34: Propiedades y características de la solución escogida	26
Ilustración 35: Modelo de solución final a) Vista malla, b) Vista sólido cara anterior, c) Vista sólido cara posterior.....	27
Ilustración 36 Vista en diagonal del resultado de Simulación, campo de estrés (Von Mises).....	27
Ilustración 37 Vista del Resultado de Simulación de Esfuerzos (Von Mises) de la parte convexa de la prótesis	28
Ilustración 38: Vista del Resultado de Simulación de Esfuerzos (Von Mises) de la parte convexa de la prótesis	28
Ilustración 39: Modelo de prótesis con patrón giroide al 7.5% de relleno para impresión	29
Ilustración 40: Modelo de prótesis realizada con optimización topológica para impresión	29
Ilustración 41: Modelo de prótesis impreso por tecnología SLA	30
Ilustración 42: Peso de Modelo de Prótesis con soportes (a) y (b).....	31
Ilustración 43: Modelo de prótesis con optimización topológica impreso por tecnología SLA.....	31
Ilustración 44: Peso del modelo optimizado con soportes (a) y sin soportes (b).....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación entre prótesis realizada con 7.5% de patrón de relleno y la obtenida por diseño generativo.....	19
Tabla 2: Comparación de tiempo y volumen de impresión entre modelo con patrón giroide al 7.5% de relleno y modelo con optimización topológica	30
Tabla 3: Comparación de modelo con patrón giroide al 7.5% y modelo con optimización topológica	32

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES Y PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Introducción

El cáncer de seno es uno de los más comunes para las mujeres alrededor del mundo. En Estados Unidos y Asia se estima que la tasa de mujeres menores de cuarenta años que son diagnosticadas con esta enfermedad continua en aumento (J. Kim, 2024).

Generalmente esta enfermedad se diagnostica cuando la paciente detecta algún bulto, textura o alteración de la forma del seno (Genomic Variants and Worldwide Epidemiology of Breast Cancer: A Genome-Wide Association Studies Correlation Analysis, 2024). Incluso puede incluir algún tipo de dolor en la zona. Dependiendo del tamaño del bulto y de otras consideraciones la paciente deberá someterse a alguno de los siguientes procesos: quirúrgicos (mastectomía, tumorectomía), radioterapia, quimioterapia, terapia dirigida o inmunoterapia.

La mastectomía es uno de los procedimientos quirúrgicos que se suelen aplicar en estos casos, se diferencia de la tumorectomía ya que esta cirugía consiste en retirar toda la mama en sí y no solo el área del tumor. A su vez esta operación se divide en dos categorías dependiendo de la extracción: Simple (cuando solo se ha extraído una sola mama) y doble (cuando ambas mamas fueron extraídas) (Breast Reconstruction following Mastectomy for Breast Cancer or Prophylactic Mastectomy: Therapeutic Options and Results, 2024).

Esta operación conlleva un impacto profundo en la vida de la paciente y su autoestima (Chances and challenges—analysis of trends in breast reconstruction, 2022), en respuesta a esto se han creado varias alternativas de prótesis mamarias. Las alternativas externas tienen en común utilizar silicón debido a sus propiedades de deformación (American Breast Care) (Fully Automated Ultra-Personalized 3D Printed Prosthetic Breasts), sin embargo, la mayoría de estas tiene una apariencia que no es agradable a simple vista y, en otros casos este material puede generar calor en la zona del pecho. Esto puede conllevar una molestia para la paciente, la cual buscará otras alternativas como telas o semillas para la creación de estas prótesis.

En vista de esta problemática nace el Proyecto Zule, este proyecto está destinado a la creación de un modelo de prótesis mamaria externa que pueda ser fabricado utilizando tecnología de fotopolimerización y que además tenga la forma del seno de la paciente (o de un seno real en caso de que la paciente tenga doble mastectomía). Sin embargo, el proyecto aún se encuentra en la búsqueda de un modelo que pueda cumplir con la deformación y la forma requerida de un seno sano.

En este proyecto de titulación se propone el uso de inteligencia artificial para realizar un diseño generativo de una prótesis mamaria que se apegue más al comportamiento de un seno real y a su vez pueda ser manufacturada por el mismo proceso que las propuestas anteriores.

1.2. Antecedentes

Según el Registro Nacional de Tumores (RNT), 1 de cada 12 mujeres en el mundo tiene cáncer de mama y en Ecuador el riesgo de desarrollar este tumor es de 38.2 casos por cada 100.000 mujeres (SOLCA Núcleo de Quito, 2023). Dependiendo de la gravedad del caso algunas de las pacientes deben recurrir a una cirugía conocida como mastectomía, la cual consiste en la extirpación del tejido del seno, suele incluir el pezón y la aureola (Gentile, et al., 2024). Existen dos tipos de mastectomía: simple, si se trata de la extirpación de un solo seno o parte de él y; doble, cuando el crecimiento de tumores afecta a ambos senos o la probabilidad de una metástasis es alta.

En el mercado circulan prótesis mayoritariamente realizadas a base de silicona, este material es el elegido entre muchos gracias a que su deformación se asemeja a la de un seno. Sin embargo, las prótesis que circulan no cuentan con una buena superficie de contacto a pesar de ofrecer formas como gota o triángulo y, por lo general poseen un costo elevado (Top Care Store, n.d.). Existen organizaciones que ofrecen alternativas más personalizadas, aunque estas son de un costo elevado. Debido a esta realidad el Proyecto Zule ha generado una alternativa de prótesis mamaria externa personalizada de bajo costo, sin embargo, aún existe la necesidad de optimizar este modelo para lograr simular de manera exitosa las características biomecánicas de un seno sano para mujeres mastectomizadas (Breast-torso movement coordination during running in different breast support, 2024).

Dentro del Proyecto Zule, se han evaluado distintas estrategias para optimizar el diseño de una prótesis mamaria externa para su fabricación por manufactura aditiva. Inicialmente, se propuso una estructura de tubos ondulares y semiesfera sólida que alcanzaba el peso ideal, pero presentaba incompatibilidades con procesos de fotopolimerización debido al atrapamiento de resina y defectos en la calidad estructural (Bravo Villa & Garzón Basurto, 2020). Ante esta limitación, se analizaron alternativas basadas en estructuras sólidas, de red y porosas, determinándose que el diseño de red con patrón de relleno giroide era el más prometedor. Las pruebas iniciales con resina 80A y distintas configuraciones de relleno y espesor lograron aproximaciones en peso, pero presentaron problemas de deformación insuficiente o grietas internas (Villacís Apolinario & Romero Murga, 2022). Finalmente, se optimizó el diseño mediante pruebas con porcentajes de relleno del 5%, 7.5%, 10% y 25%, identificándose que un 7.5% de relleno ofrecía la mejor relación entre deformación y estabilidad estructural, posicionándose como la alternativa más viable para manufactura aditiva (Coello Del Pozo & Recalde Merchán, 2023).

1.3. Descripción del Problema

El diseño actual de la prótesis mamaria externa del Proyecto Zule no logra una relación óptima entre los parámetros de deformación y peso, necesarios para simular las características biomecánicas de un seno sano, lo que limita su funcionalidad. Este problema se presenta en el contexto de la fabricación mediante manufactura aditiva y ha sido identificado a partir de estudios realizados hasta la última propuesta del proyecto en 2023. La magnitud de este problema se refleja en los ensayos previos, donde las prótesis mostraron deformaciones insuficientes o fracturas internas. Para resolverlo,

se plantea mejorar el diseño utilizando la metodología de diseño para manufactura y software avanzado de optimización topológica, tal como es Fusion de Autodesk, el cual nos permitirá evaluar el desempeño mediante ensayos de resistencia y deformación de las prótesis objetivo.

1.4. **Objetivo general:**

Optimizar el diseño para manufactura aditiva mediante la utilización de un software con inteligencia artificial de un modelo de prótesis mamaria externa, creando una mejora de su estructura topológica para que la prótesis alcance las características biomecánicas de un seno sano.

1.5. **Objetivos específicos:**

- Utilizar herramientas computacionales de manufactura para la simulación de características biomecánicas semejantes a las de un seno sano.
- Rediseñar el modelo propuesto para que sea manufacturado por una impresora 3D con tecnología de fotopolimerización.
- Realizar comparativas de fabricación de la prótesis con patrón interno giroide y el modelo obtenido mediante optimización topológica.

1.6. **Alcance**

El alcance de este proyecto abarca toda la elaboración de la prótesis desde el proceso de escaneo (obtención de datos) hasta la fabricación utilizando tecnologías de manufactura aditiva. Además, se realizará una comparación con el modelo impreso en propuestas anteriores para comprobar si las propiedades de la nueva propuesta son iguales o mejores. Esta evaluación se realizará mediante un análisis y comparación de resultados mediante la simulación de propiedades mecánicas.

El impacto de este proyecto será simular una propuesta de un modelo de prótesis para que así se pueda continuar con los avances del Proyecto Zule y de esta manera lograr que se cree un modelo de prótesis asequibles, personalizadas y listas para utilizar para mujeres que hayan pasado por mastectomía.

1.6.1. **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

Este proyecto cumple con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible:

- **ODS N° 3 Salud y Bienestar:** Al aportar al estudio de un proyecto que tiene como objetivo que las mujeres que hayan cursado por una mastectomía puedan acceder a prótesis de calidad y personalizadas.
- **ODS N° 9 Innovación e infraestructura:** Dentro del proceso de la fabricación se utilizan tecnologías de manufactura aditiva, diseño con inteligencia artificial y programas de diseño e impresión. Todo este proceso conlleva el uso de tecnologías modernas que optimizan el proceso.
- **ODS N° 12 Producción y consumo responsables:** Al determinar el tiempo de vida y además que el diseño genere la menor cantidad de residuos posibles.

CAPITULO 2

2. METODOLOGÍA

El proceso de creación de la prótesis mamaria externa abarca desde el escaneo de las pacientes, para la realización de este proyecto se tomaron tres escaneos de mujeres con mastectomía simple. Estos datos fueron utilizados para la creación y experimentación con la metodología propuesta a continuación (Ver

Metodología de diseño y manufactura aditiva utilizada para la fabricación de Prótesis Mamarias Externas: Proyecto Zule

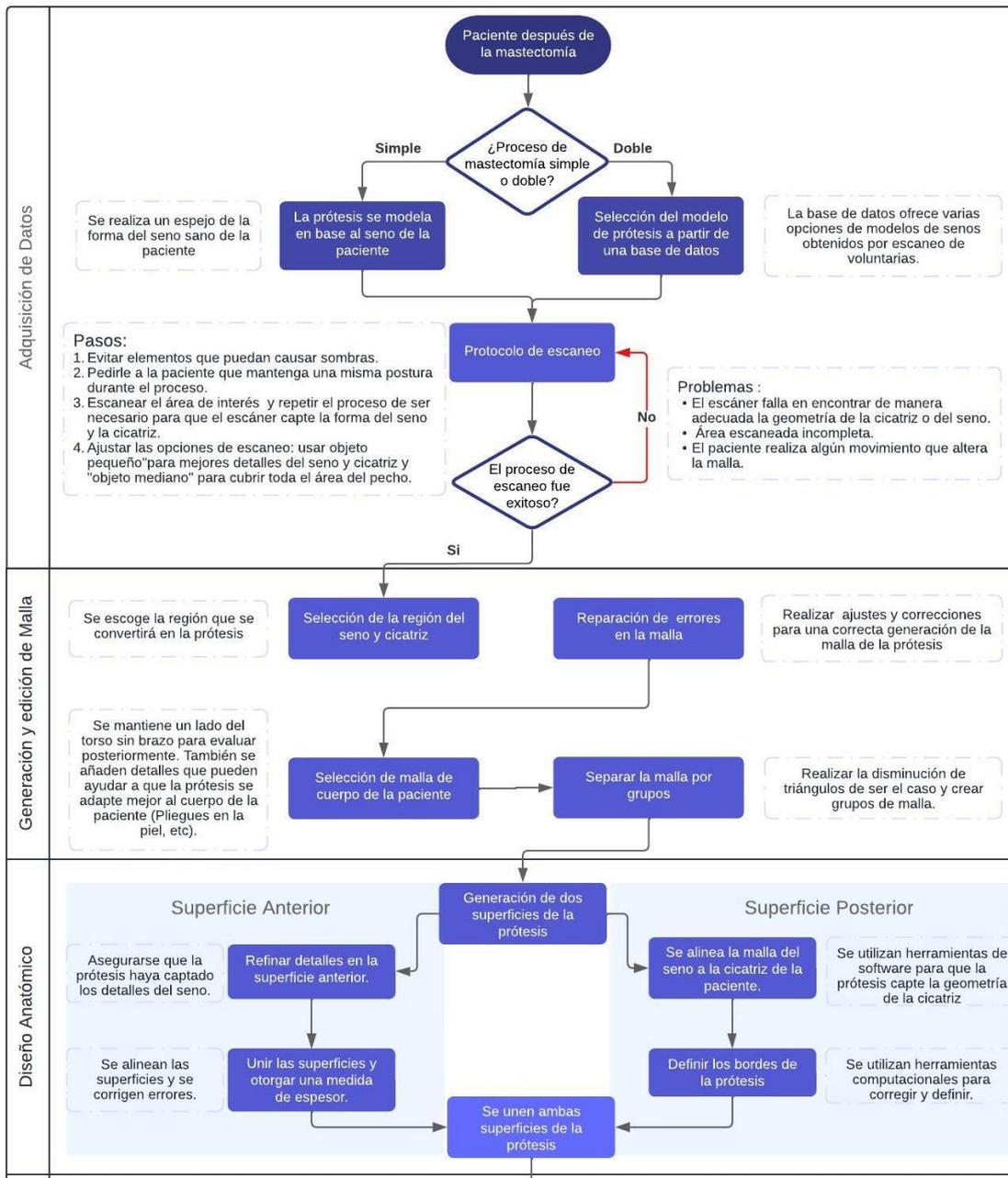
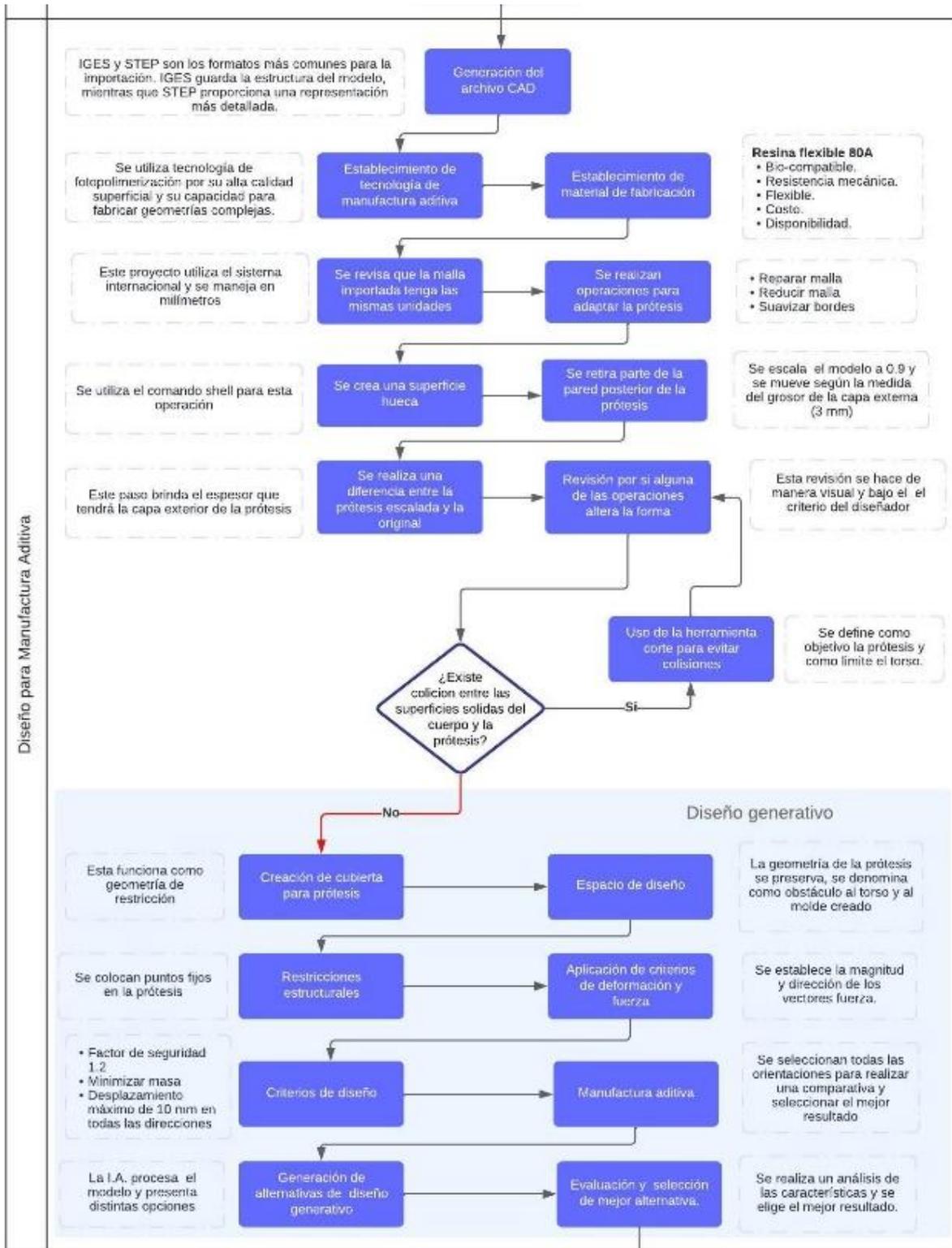


Ilustración 1).



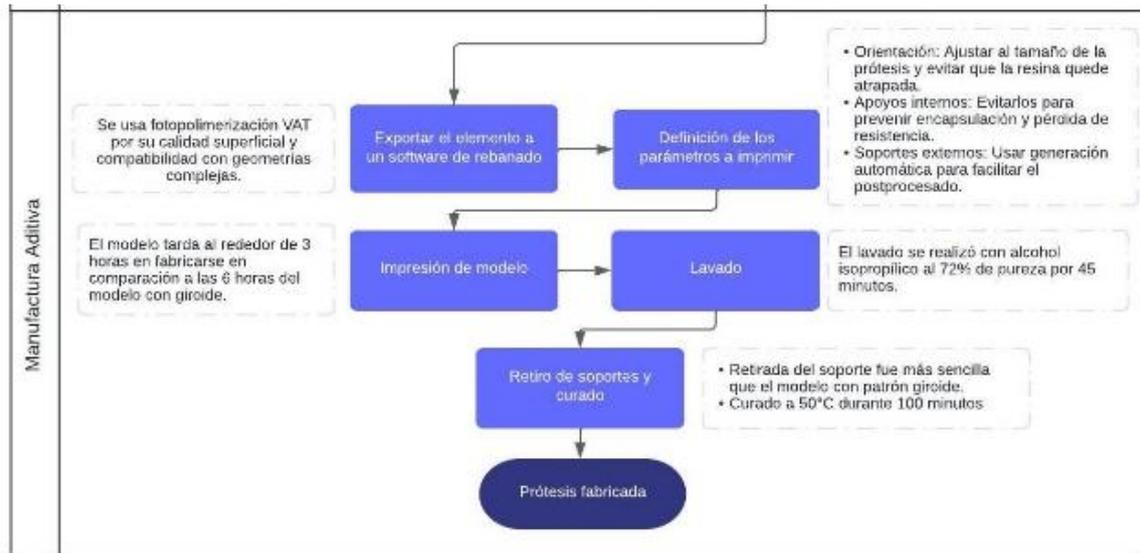


Ilustración 1: Metodología del proyecto

Fuente: Autores

2.1. Adquisición de datos

La personalización constituye un pilar fundamental que diferencia este proyecto. El objetivo es obtener un prototipo que reproduzca fielmente las características anatómicas de un seno real, ya sea el seno sano de una paciente con mastectomía simple o el de una voluntaria perteneciente a una base de datos de mujeres sin mastectomía. Para lograrlo, se captura la forma anatómica del seno y la cicatriz de la paciente, y estos datos de imagen se transforman en una malla digital que actuará como base para el diseño de la prótesis externa.

La obtención de la forma anatómica del seno se realiza por medio del escaneo tridimensional de las pacientes mediante un protocolo de escaneo que se detalla en la siguiente sección 2.1.1.

Para este proyecto se realizó la toma de datos a tres pacientes con mastectomía simple que se ofrecieron a ser voluntarias para la realización de este estudio. Se puede observar a dos de ellas en la siguiente figura: **Ilustración 2.**

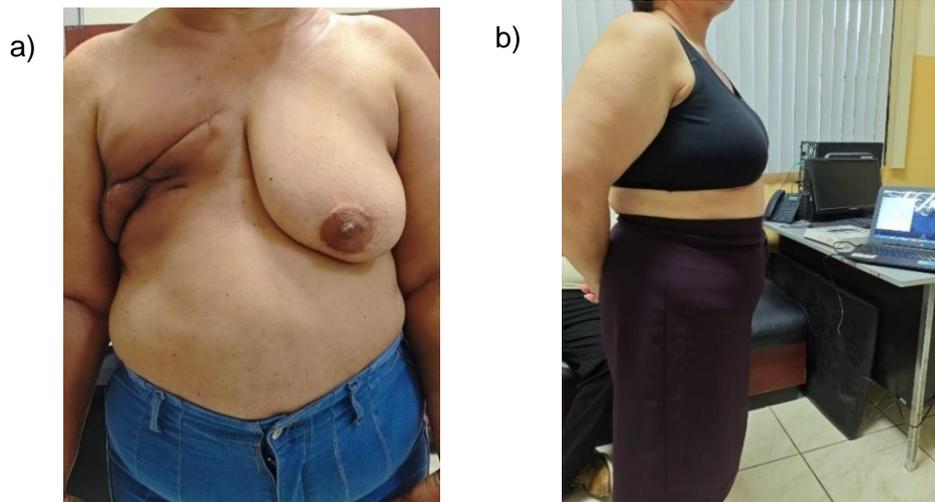


Ilustración 2: Pacientes voluntarias con mastectomía. a) Fotografía de una paciente con mastectomía, plano coronal. b) Fotografía de paciente con sujetador, plano sagital.

Fuente: Autores

2.1.1. Escaneo tridimensional

Para esto se utilizó un protocolo de escaneo el cual empieza con la colocación de una lona con dos caminos y dos marcas. Los caminos sirven para guiar a la persona que va a ejecutar el escaneo de la paciente y las marcas son para ubicar a la paciente en el centro de la lona y otra para colocar un objeto de referencia. Una vez colocada la paciente en el lugar se procede a la captura de la imagen haciendo énfasis en la obtención de la geometría de la cicatriz que posea. En caso de que la paciente tenga una mastectomía simple, la prótesis se elaborará utilizando la forma de su seno sano y reflejándolo en el eje “y”, en caso de que la paciente haya pasado por una doble mastectomía podrá elegir la forma de la prótesis según los datos de escaneo de voluntarias almacenados dentro de un catálogo de alternativas almacenado que van desde la copa A hasta la copa F (DD), teniendo como mayoría datos de mujeres con copa B.

Durante el proceso de escaneo el operador podrá visualizar cualquier particularidad que surja en esta toma de datos para así garantizar la generación de la malla y obtener la mejor calidad de detalle posible en cuanto a la forma y características del seno (cicatrices, geometría, entre otros). Además, se garantiza que en caso de que en la cirugía no se haya retirado del todo el tejido mamario, el ajuste de la prótesis al seno sea lo más compatible posible. De esta manera se disminuyen factores que pueden alterar el contacto con la piel aumentando el confort de la paciente y por tanto previniendo que existan irritaciones, molestias, enrojecimiento, etcétera. Algunos resultados del escaneo a voluntarias se evidencian en la siguiente imagen: **Ilustración 3.**

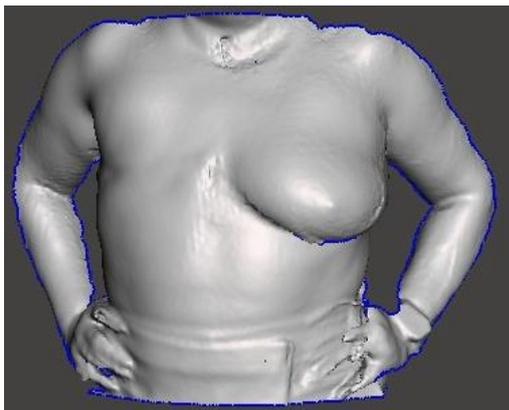


Ilustración 3: Escaneo de cicatriz y seno de paciente plano coronal

Fuente: Autores

2.2. Generación y Edición de Malla

Una vez obtenida la malla, se utiliza el software MESHMIXER de Autodesk para realizar las correcciones respectivas. Es decir; eliminar el ruido¹, delimitar la zona del pecho para obtener la forma de la prótesis, refinar los bordes de la prótesis para darle un aspecto más suave, completar espacios abiertos y de ser el caso realizar un espejo del seno sano. Una vez completada la revisión y realizadas las correcciones correspondientes se obtiene la malla con la forma y detalles en la que se basará el diseño de la prótesis, como se observa en la **Ilustración 4**.

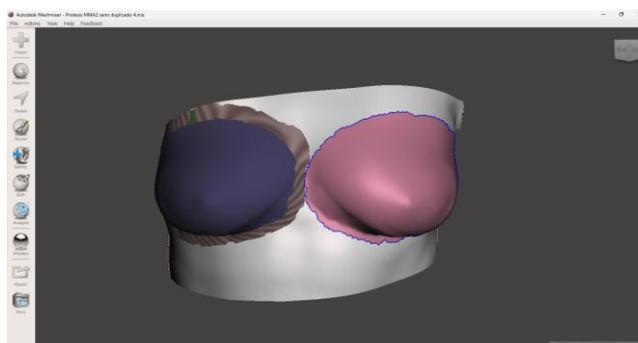


Ilustración 4: Malla generada de prótesis en color morado y forma del seno sano en color rosa.

Fuente: Autores

2.3. Diseño Anatómico

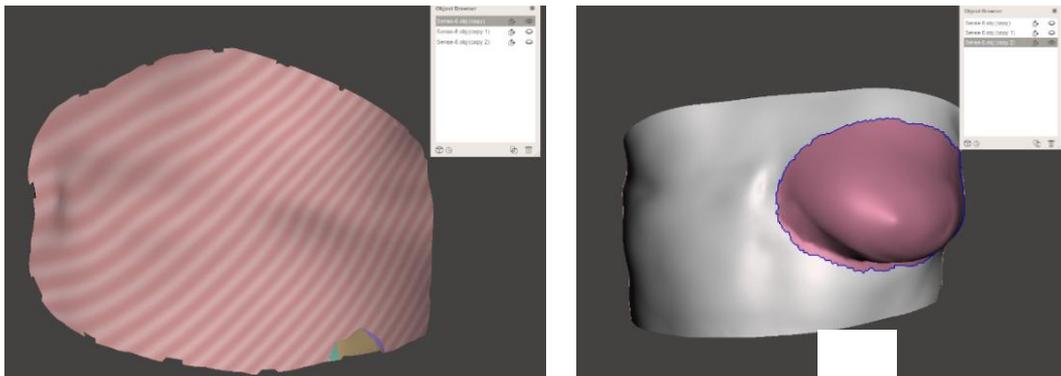
Una vez obtenida la malla se la divide en dos partes: una frontal y una posterior. La frontal corresponde con el detalle de la aureola y el pezón además es la que proporciona la forma que tendrá la prótesis y sirve como aislante del relleno de la prótesis y la piel de la paciente. Posteriormente, se le aplicará un espesor para que al ser manipulada la prótesis esta no se rompa, además de entregar una mejor resistencia al producto.

La malla posterior se encarga de generar la conexión entre las mallas para garantizar que se forme un sólido y que guarde la información topológica de la cicatriz o tejido mamario que posea la paciente. Para garantizar que el

¹ Se considera como ruido de malla a cualquier objeto que pueda ser captado fuera del cuerpo de la paciente y que se observa dentro del escaneo.

punto de contacto sea el mejor posible se utiliza optimización topológica para obtener el aspecto de la cicatriz, ver Ilustración 5 (a) y (b). Para este proyecto también fueron tomados en cuenta los pliegues que pueda tener la piel en el lado de la cicatriz, esto para brindar mejor comodidad y sujeción de la prótesis.

Una vez realizado esto se alinea la cara posterior de la malla a la de la paciente para comprobar el ajuste y el punto de contacto que tiene entre sí. Una vez más se revisan y corrigen errores para que la prótesis encaje sin problemas a la piel de la paciente y una vez corregidos se pasa a la siguiente etapa.



(a)

(b)

Ilustración 5: Superficie superior (a) y superficie posterior (b) de prótesis mamaria externa.

Fuente: Autores

2.4. Diseño Para Manufactura Aditiva

2.4.1. Edición de malla

Para este procedimiento se importa la malla, con las correcciones realizadas en el proceso anterior, al software Autodesk Fusion. Esta importación debe realizarse considerando que las unidades en las que se trabaje pertenezcan al mismo sistema métrico, de no ser de esta manera se alterará de forma involuntaria las dimensiones de la prótesis.

Una vez revisada la importación se procede a alinear las mallas del cuerpo y la prótesis de la paciente y se alinean ambas con el origen del plano de trabajo para mejor manejo. A continuación, se puede ver la malla importada en la **Ilustración 6**.

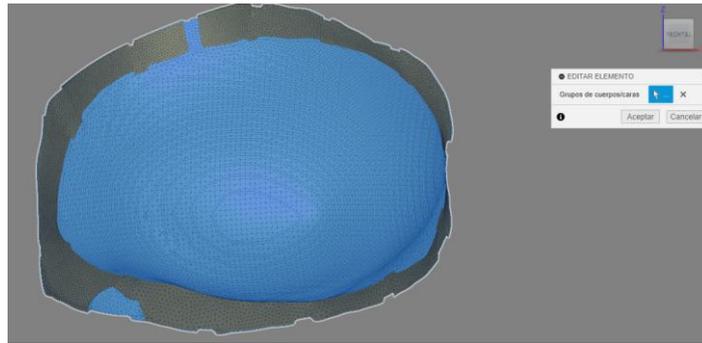
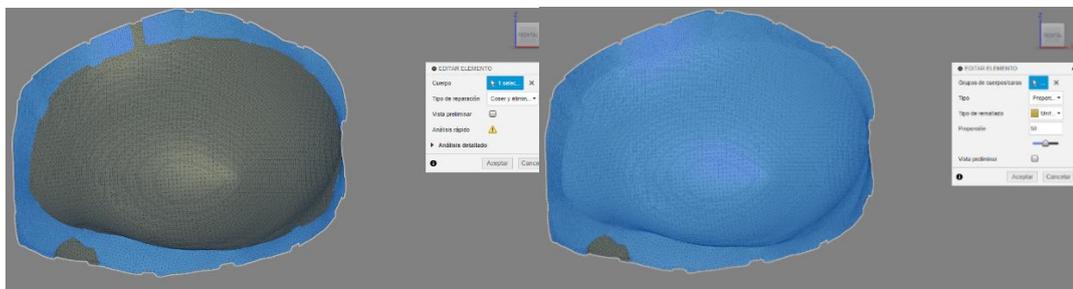


Ilustración 6: Malla importada al software Fusion de Autodesk.

Fuente: Autores

En la **Ilustración 7** presentamos reparaciones en la malla para evitar orificios y brindar una mejor uniformidad a la prótesis. Se reduce el número de elementos para un mejor análisis y reducción del uso de recursos computacionales para la posterior generación topológica. En este proceso también se realiza una inspección ocular de la malla para asegurar que las operaciones realizadas no afectan la forma de la superficie de esta.



a)

b)

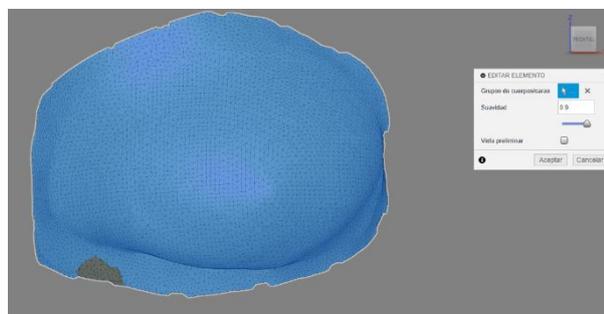


Ilustración 7: Operaciones de reparación de malla realizadas a) Eliminar agujeros b) Reducción de malla c) Suavizar malla

Fuente: Autores

Es importante indicar, que la para la reparación de la malla se utilice el tipo de reparación de malla “Coser y eliminar” (ver **Ilustración 8**) para garantizar que no se hayan formado agujeros por la manipulación de las distintas herramientas antes señaladas.

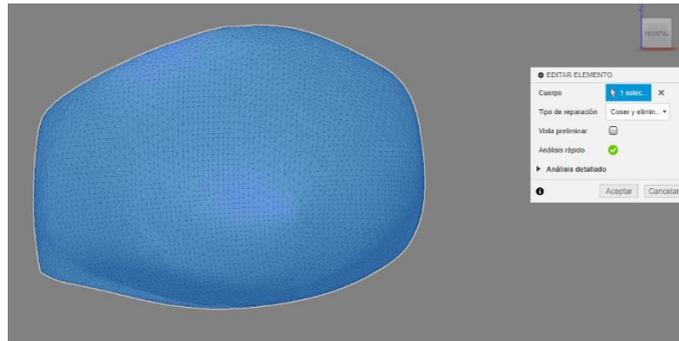


Ilustración 8: Operación "Coser y eliminar agujeros.

Fuente: Autores

Se realiza una operación de creación de generación de cavidad ("Shell"), que permite la generación del espesor de la capa interna de la prótesis. El espesor de la capa utilizado es de 3 mm, debido a que este es el mismo espesor de pared de la prótesis obtenida mediante la metodología de diseño de prótesis en la cual se utiliza el patrón giroide a un 7.5% como relleno (Coello Del Pozo & Recalde Merchán, 2023). El resultado de esta operación se puede evidenciar en la Ilustración 9.

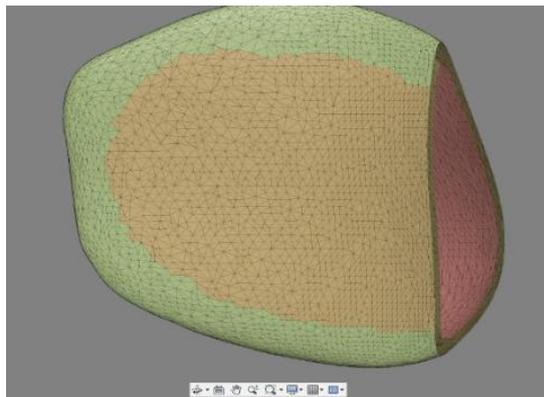
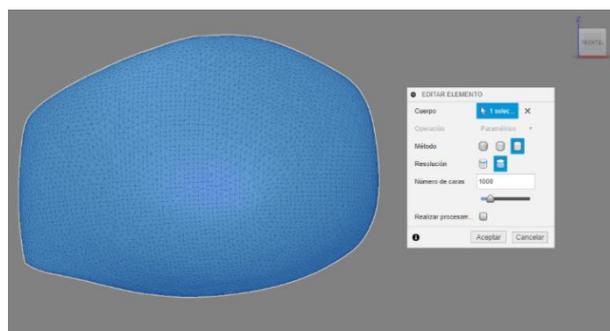


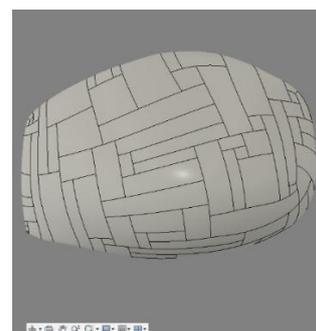
Ilustración 9: Vista plano de corte de la prótesis.

Fuente: Autores.

Es recomendable trabajar con la menor cantidad de caras posibles para el procesamiento del diseño generativo de la prótesis. Por lo cual, al convertir la malla en sólido, se recomienda utilizar el método "orgánico" con una resolución menor de 10.000 caras, ver Ilustración 10 (a).



a)



b)

Ilustración 10: a) Operación de transformación de malla a sólido b) Resultado obtenido

Fuente: Autores

Como resultado de esta operación se obtiene un cuerpo, el cual se asemeja a un cascarón. Adicional, para realizar una comparativa contra la prótesis con patrón giroide de relleno 7.5% y que ambas prótesis tengan una forma similar se proporciona la forma de copa de brasier que posee la antes mencionada.

Para esto se realiza un duplicado de la prótesis y se escala a 0.9. Con ambas superficies alineadas se realiza un corte de la pared posterior de la prótesis, el resultado se puede evidenciar en la *Ilustración 11*.

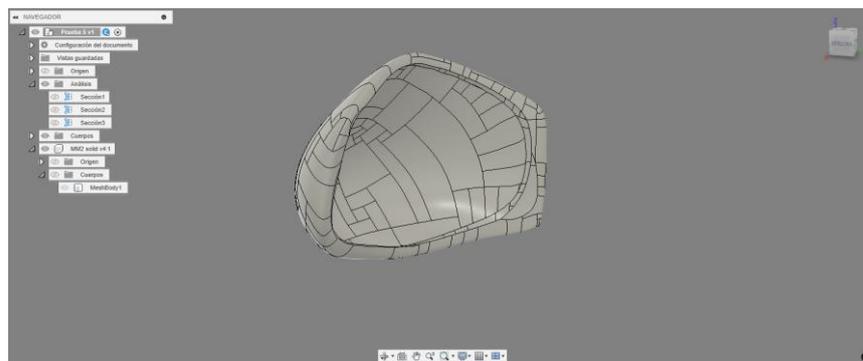


Ilustración 11: Vista de cara posterior de prótesis después de esta operación

Fuente: Autores

De ser necesario se realiza un suavizado de los bordes de la malla utilizando un empalme, para evitar zonas que puedan incomodar al paciente, también esta operación mejora el aspecto físico de la prótesis.

Se realiza el mismo proceso para la generación del sólido del torso a partir de la malla teniendo como resultado el sólido mostrado en la *Ilustración 12*. Una vez realizados ambos sólidos estos se alinean en el lugar de la cicatriz y se prepara para iniciar el proceso de diseño generativo.

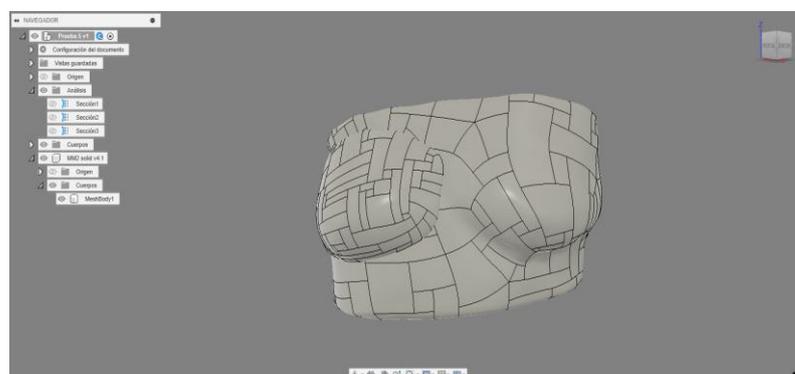


Ilustración 12: Resultado de operaciones con la malla del torso de la paciente.

Fuente: Autores

2.4.2. Diseño generativo

Para iniciar el proceso de diseño generativo se elimina cualquier coincidencia u obstrucción entre ambos cuerpos (prótesis y torso) para garantizar que la prótesis encaje perfectamente con la cicatriz y piel de la paciente y, evitar la generación de errores. Esto se hace con la operación corte, como se muestra en la *Ilustración 13*

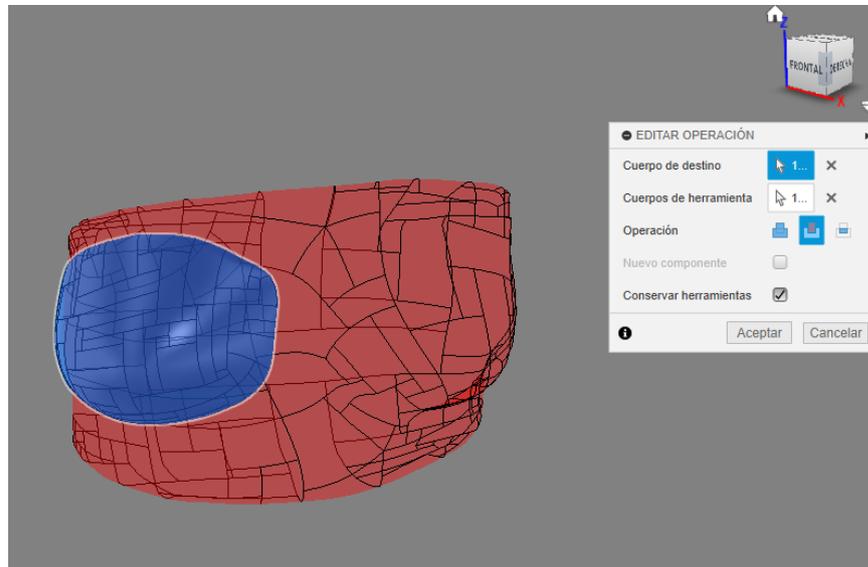
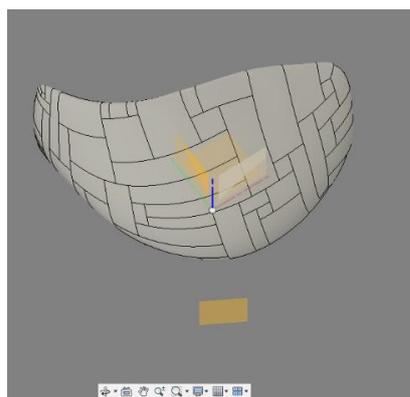


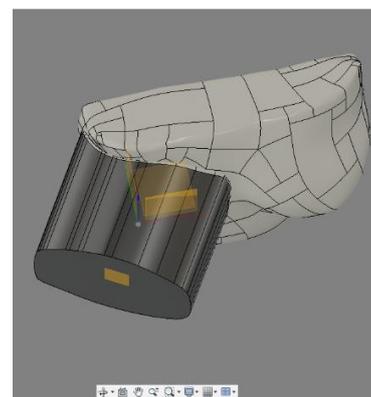
Ilustración 13: Supresión de coincidencias entre los sólidos del cuerpo de la paciente y la prótesis.

Fuente: Autores

Se crea un plano para proyectar la geometría anterior de la prótesis como se puede observar en la Ilustración 14 (a), se genera un boceto sobre este plano con la proyección de la geometría de la prótesis y se hace un desfase de este boceto a 0.5 mm hacia el interior. Este boceto sirve para generar un molde, este molde es utilizado para evitar la expansión del sólido de la prótesis hacia la parte anterior durante la optimización topológica dentro del software.



a)



b)

Ilustración 14: Creación de plano para generación de molde como medio de restricción para el diseño generativo. a) Dibujo de plano b) Creación de molde

Fuente: Autores

Se añade manualmente el material (Resina Flexible 80A de la empresa FormLabs), ya que dentro la librería de materiales del software no existe. Por tanto, se ingresa las propiedades físicas y mecánicas del material como se muestra en la *Ilustración 15*. Dichas propiedades fueron obtenidas mediante el estudio del material realizado en la Escuela Superior Politécnica del Ejercito.

Propiedades básicas		<input checked="" type="checkbox"/> Propiedades avanzadas
Información		
Térmico básico		
Conductividad térmica	2,500E-01 W/(m·K)	
Calor específico	1,629 J/(g·°C)	
Coeficiente de dilatación térmica	131,340 µm/(m·°C)	
Mecánico		
Módulo de Young	0,005 GPa	
Coeficiente de Poisson	0,45	
Módulo cortante	2,125 MPa	
Densidad	1,060 g/cm³	
Coeficiente de amortiguamiento	0,00	
Resistencia		

Ilustración 15: Propiedades mecánicas utilizadas para crear el material en Autodesk Fusion

Fuente: Autores

A continuación, se proceden a definir las geometrías del espacio de diseño, es decir, se seleccionan las geometrías de obstáculo y las de conservación. La geometría de obstáculo indica los límites que debe respetar el diseño generativo y la geometría de conservación muestra la geometría que se preservará en el diseño, como su nombre lo indica.

Como geometría de obstáculo se encuentran el torso de la paciente y el elemento molde. Estos elementos se marcan en color rojo como lo muestra la *Ilustración 16*.

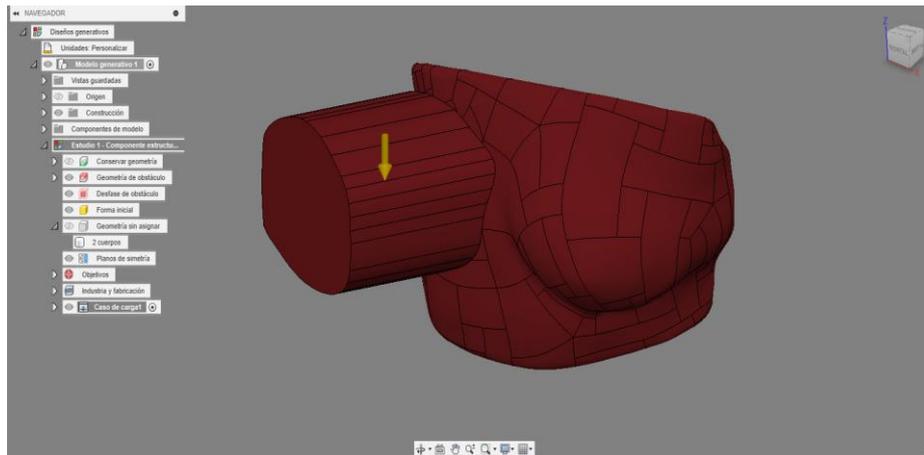


Ilustración 16: Geometría de obstáculo

Fuente: Autores

En la *Ilustración 17*, se observa la prótesis en color verde, esta es la forma inicial de la prótesis, antes de aplicar las restricciones, cargas y optimizarla durante la aplicación del diseño generativo.

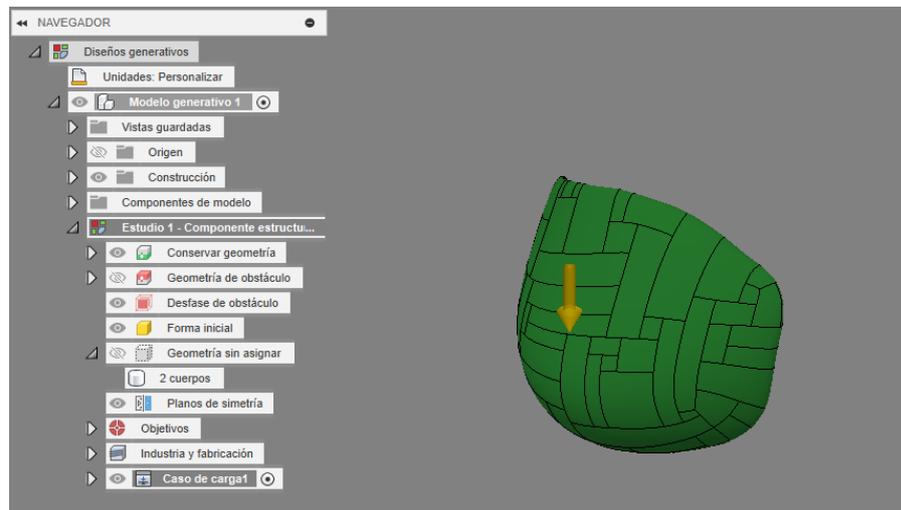


Ilustración 17: Geometría de conservación

Fuente: Autores

El diseño con ambas geometrías restringidas se puede visualizar en la *Ilustración 18*.

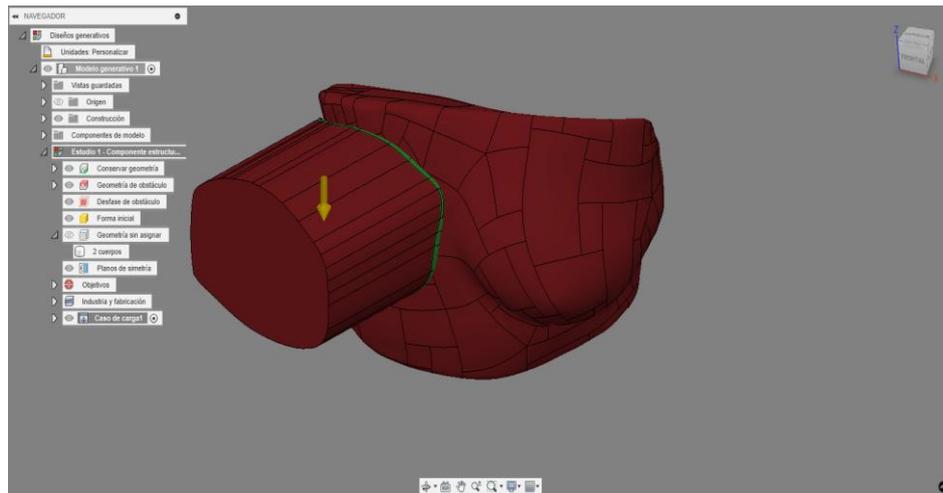


Ilustración 18: Geometrías de restricción
Fuente: Autores

A continuación, se colocan las restricciones de movimiento, con esta operación se indica al software todos los elementos fijos y móviles que tiene el elemento al que se le realizará la optimización topológica. En el caso de la prótesis se utilizó la mayor cantidad de caras posteriores para convertirlas en elementos fijos.

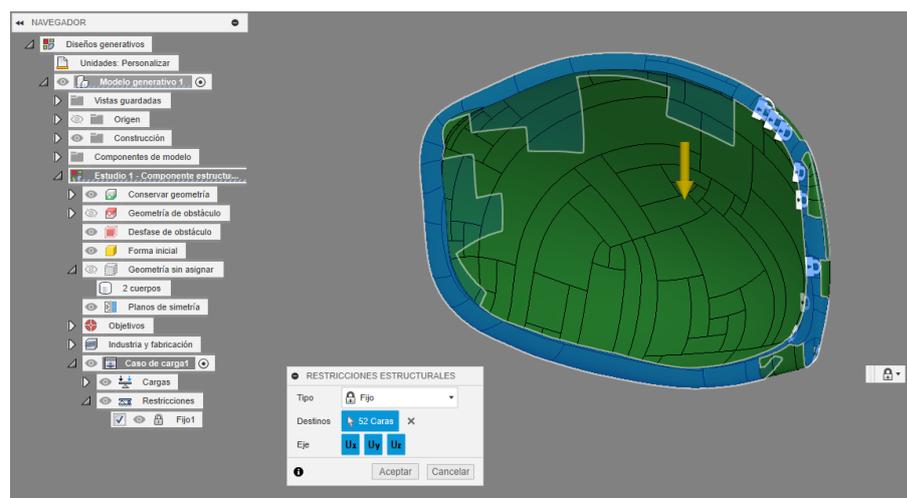


Ilustración 19: Definición de elementos fijos de la prótesis
Fuente: Autores

Una vez se definieron los elementos fijos se procede a colocar los componentes de la fuerza como cargas distribuidas (*Ilustración 20*). Esta distribución fue la misma que se utilizó en una simulación anterior realizada por estudiantes de grado (Coello Del Pozo & Recalde Merchán, 2023) en una prótesis con patrón giroide. La carga distribuida tiene como finalidad emular la fuerza que ejerce el brasier con respecto a un seno.

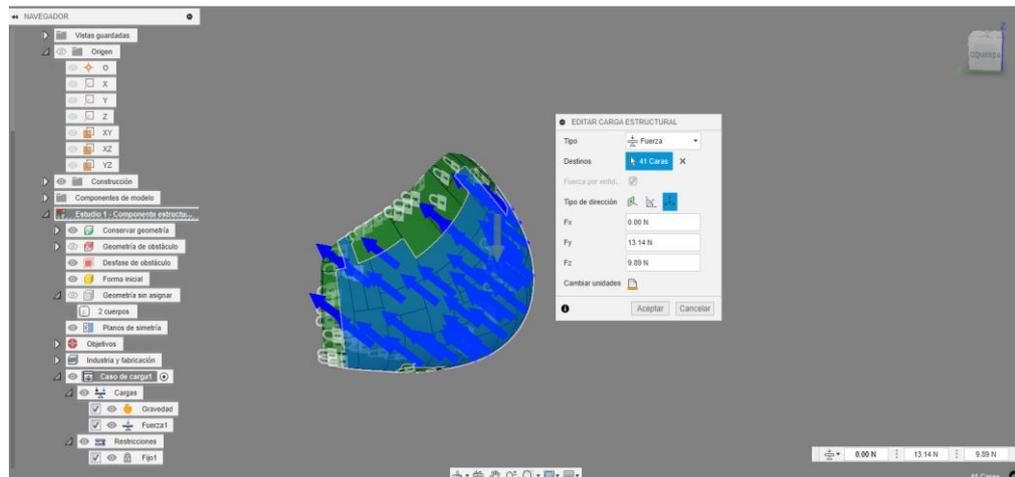


Ilustración 20: Definición de cargas de fuerza utilizadas en la prótesis.
Fuente: Autores

Continuando con el procedimiento se selecciona el proceso de manufactura que se utilizará en la fabricación, para este proyecto esta opción es Manufactura Aditiva. También se selecciona los ejes, ángulo de saliente y grosor mínimo del elemento a fabricar.

Para obtener una mejor comparación de los resultados se selecciona también la opción de manufactura “Sin restricciones” como se evidencia en la *Ilustración 21*.

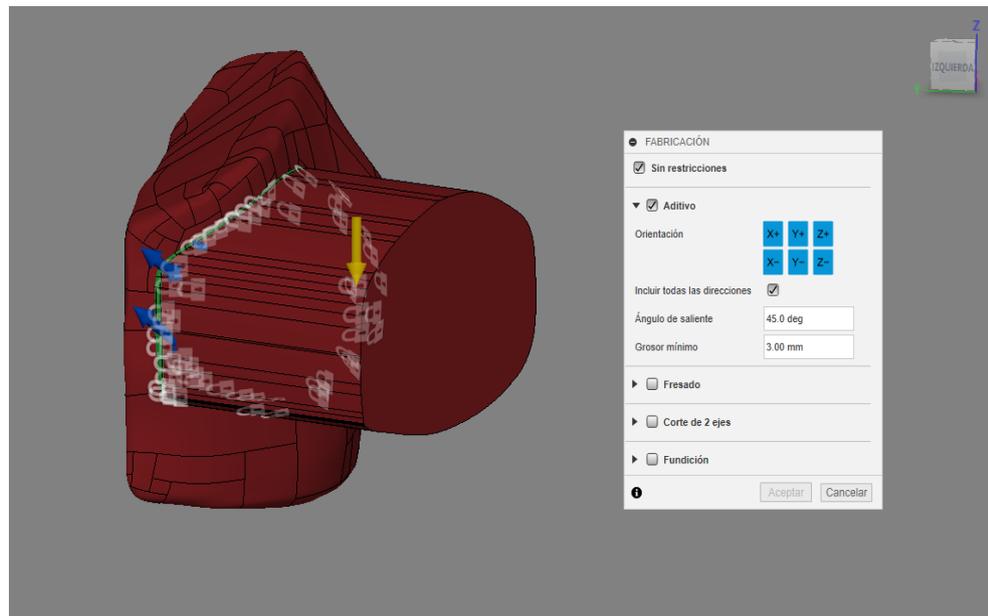


Ilustración 21: Elección de proceso de manufactura
Fuente: Autores

Una vez finalizado el proceso se envía a que el programa realice el diseño generativo y se muestren las opciones para su respectiva evaluación y selección.

2.5. Manufactura Aditiva (MA)

Para la generación de la prótesis se utiliza la tecnología de fotopolimerización, manejada por una máquina modelo FORM 4. Esta tecnología tiene la particularidad de permitir el uso de resinas flexibles lo que hace que la prótesis sea más agradable al tacto y más parecida a un seno real. Además, que las características de la forma del seno y detalles de la cicatriz pueden quedar plasmados de manera más exacta en el producto final.

La resina utilizada tiene la capacidad de ser biocompatible, es decir que evita que la paciente desarrolle alguna afección en su piel que pueda derivar en irritación o alergia por el uso de la prótesis.

Para la manufactura de la prótesis es importante tener en cuenta los parámetros mostrados a continuación:

- **Orientación:** Este parámetro juega un papel importante en la fabricación al depender de la generación de soportes internos, cavidades en las que se pueda almacenar la resina. Estos errores pueden afectar tanto a la funcionalidad de la prótesis como a su tiempo de vida.
- **Soportes externos:** Son una característica importante en cuanto a la formación de la prótesis, sin embargo, estos no deben interferir con la superficie de la prótesis ya que esto afectaría su textura y en casos extremos su apariencia.
- **Características del postproceso:** El proceso de fotopolimerización requiere de la realización de un postproceso, se deben tomar en cuenta factores como el líquido con el que se realizará el lavado, tiempos de secado y sumergimiento, etcétera. Además de tener sumo cuidado en la remoción de los soportes externos para no afectar la superficie de la prótesis.

Revisión bibliográfica

Para esta sección se realiza una tabla comparativa entre el mejor resultado de la tesis de grado (Coello Del Pozo & Recalde Merchán, 2023), en el cual se muestra una prótesis con patrón de relleno giroide al 7.5% de su densidad. La metodología de este resultado se compara con la metodología propuesta en este proyecto, el resultado de esta comparación se puede visualizar en la siguiente tabla:

Características	Prótesis de patrón giroide al 7.5% de relleno	Prótesis realizada por diseño generativo
Patrón de relleno	Giroide	No posee patrón de relleno
Material utilizado (sin contar soportes)	Mayor debido al patrón de relleno	Menor, ya que solo se deposita material en sectores específicos para evitar el rompimiento de la prótesis según la fuerza aplicada.
Obtención de datos	La obtención de la prótesis se realiza con una	Se obtienen los datos de forma de seno y cicatriz de

	simulación de una mastectomía utilizando los datos de las voluntarias.	tres mujeres con mastectomía simple.
Aplicación de inteligencia artificial para el diseño para manufactura aditiva de la prótesis.	No	Si
Tipo de ensayo realizado	Ensayo de compresión	Ensayo de simulación
Protocolo de escaneo	Ejecución de todos los pasos para obtener la forma y deformación del seno.	Eje central el captar la imagen del seno y cicatriz de la paciente.
Orientación de impresión	Se realiza a criterio del diseñador.	El software de diseño generativo la proporciona.

Tabla 1: Comparación entre prótesis realizada con 7.5% de patrón de relleno y la obtenida por diseño generativo

Fuente: Autores

CAPITULO 3:

3. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN Y DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

3.1. Primeras pruebas para el desarrollo de la metodología

3.1.1 Edición de malla

Se realizó un primer intento tomando como referencia el escaneo de una de las pacientes voluntarias que han pasado por un proceso de mastectomía. La forma del seno sano de la paciente corresponde a una copa B como se puede evidenciar en la siguiente imagen.

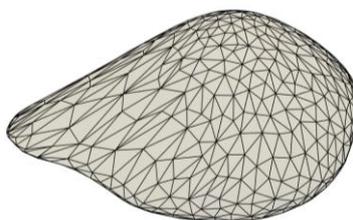


Ilustración 22: Forma de prótesis obtenida mediante el escaneo de voluntarias del Proyecto Zule

Fuente: Autores

Con esta malla obtenida siguiendo la misma metodología que se aplicó para la obtención y generación de malla se realizaron los intentos para obtener el diseño generativo de esta prótesis siguiendo el siguiente proceso:

Se aplicó el criterio del diseñador para realizar y escoger las operaciones con las que se trabajó la malla. Después se seleccionó el área del cuerpo de la paciente y se realizó un corte de malla, manteniendo el área del pecho (dorso) y cortando la malla que conforma el brazo como se observa en la Ilustración 23.

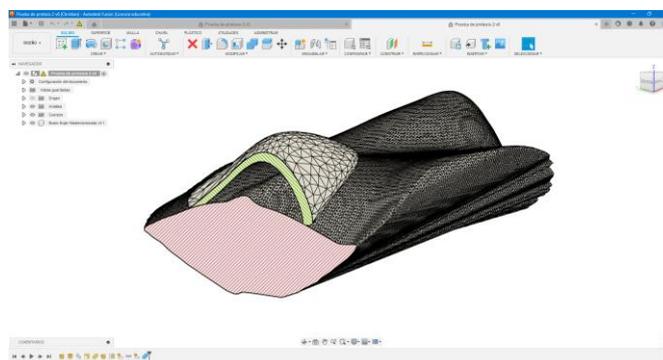


Ilustración 23: Malla de prótesis y sección del cuerpo de la paciente

Fuente: Autores

Se reparó la malla cerrando todos los agujeros que pudieron generarse en la captura de imagen. Este paso se realizó para evitar que en la generación de

solido exista algún error por alguno de estos agujeros. Este proceso se puede ver en la siguiente Ilustración 24

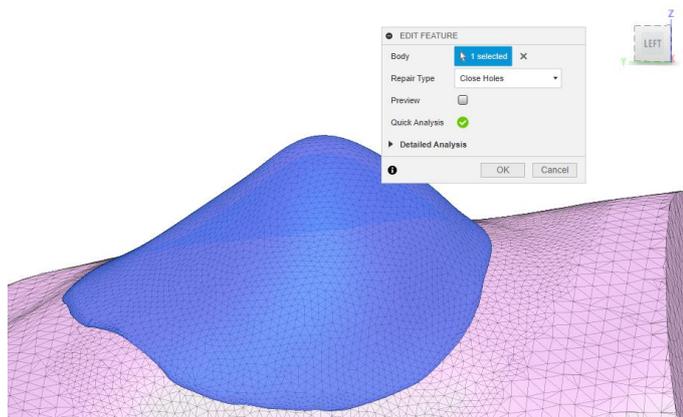


Ilustración 24: Herramienta cerrar agujeros

Fuente: Autores

Se realizó un remallado para asegurar que la forma de la prótesis se conserve, asimismo se realiza una reducción de malla. Además, se suavizan los bordes y se realiza una inspección visual de la forma de la prótesis para asegurar que las operaciones realizadas no alteren la forma de la malla. Estas operaciones se aprecian en la Ilustración 25.

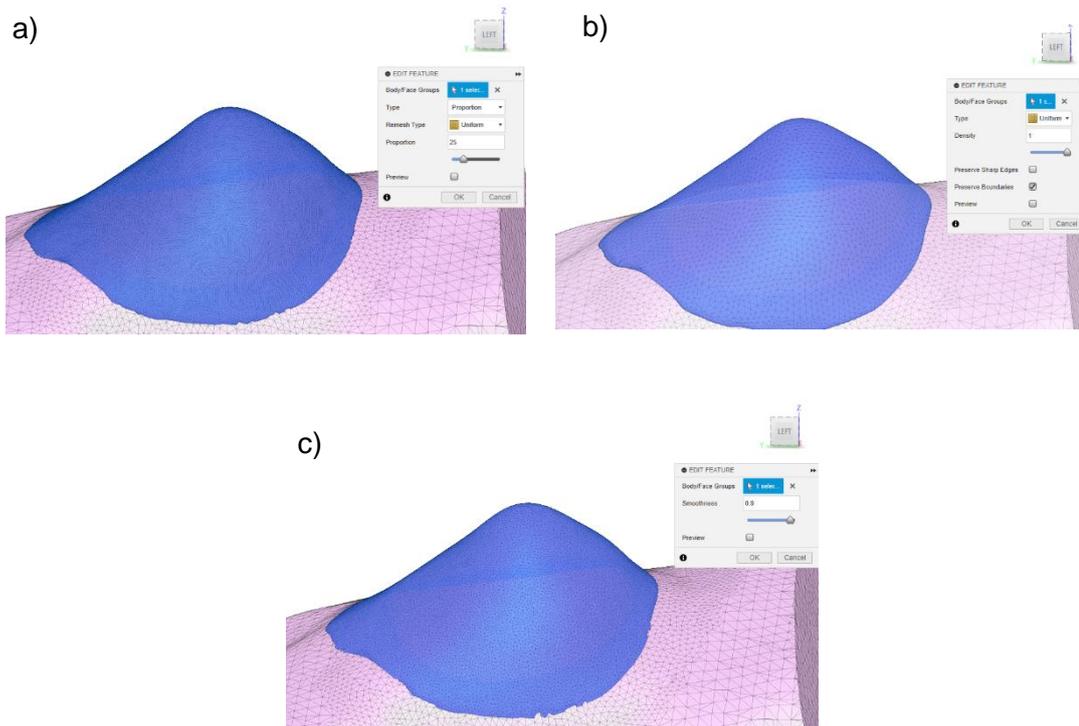


Ilustración 25: a) Remallado, b) reducción de malla y c) suavización de bordes

Fuente: Autores

Como siguiente paso se transforma las mallas del cuerpo de la paciente y de la prótesis en sólido.

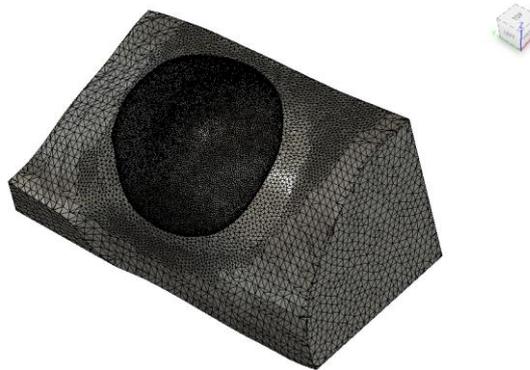


Ilustración 26: Prótesis y torso convertidos en sólido

Fuente: Autor propio

3.1.2 Diseño generativo

Para la realización del diseño generativo se consideró la forma de la superficie exterior como la geometría a preservar y el cuerpo de la paciente como el obstáculo, es decir como la restricción principal de hasta dónde llegará la prótesis.

Luego se configuraron las restricciones estructurales, escogiendo como punto fijo una de las superficies de los triángulos de la malla (según el criterio del editor). Se consideró utilizar toda la superficie posterior como punto fijo, pero al intentarlo el programa no podía realizar el diseño generativo. Esto posiblemente se deba a la geometría o al gran número de elementos que contiene la malla.

Además, se tomaron en cuenta los siguientes criterios para la generación

- **Factor de seguridad:** Se ha establecido un factor de seguridad de 2 para garantizar la resistencia del material utilizado.
- **Minimización de masa:** Se busca reducir la cantidad de material empleado sin comprometer la integridad estructural.
- **Restricciones de desplazamiento:** Se ha impuesto la condición de que la prótesis no experimente desplazamientos en ninguno de los ejes espaciales. En caso de deformación, esta no deberá superar 10 mm, por lo que se requiere un análisis detallado de la respuesta mecánica del diseño optimizado.

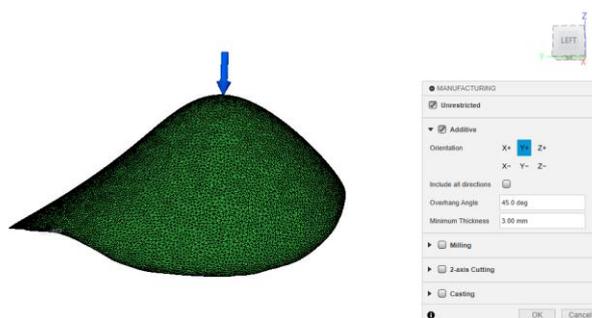


Ilustración 27: Criterios para realizar la generación topológica.

Fuente: Autores

3.1.3 Consideraciones en la Manufactura Aditiva

Para la fabricación de la prótesis, se ha seleccionado la manufactura aditiva debido a su capacidad para producir geometrías complejas con un alto grado de personalización. Se han establecido los siguientes parámetros para optimizar la impresión:

- **Orientación de impresión:** La pieza se debe alinear preferentemente en el eje Y para optimizar la calidad superficial y la precisión dimensional.
- **Ángulos en voladizo:** Se debe evitar la generación de ángulos en voladizo superiores a 45° para minimizar la necesidad de estructuras de soporte adicionales.
- **Espesor mínimo:** Se debe definir un espesor mínimo que garantice tanto la resistencia como la flexibilidad del material, evitando defectos de fabricación y optimizando el uso de la resina flexible seleccionada.

El modelo de la Ilustración 28 posee múltiples caras, en las cuales se debe de aplicar la carga, esta carga se coloca considerando las fuerza de un brasier, sin embargo la cantidad de caras y su orientación introduce variabilidad en la distribución de esfuerzos. La cantidad de caras generadas depende de la forma en la que se ha generado el sólido el cual es una copia de la malla inicial, por lo que, pretender realizar un análisis para la optimización topológica se convirtió en un gran desafío por el poder de cómputo necesario para poder obtener un resultado a partir de este modelo, por lo que el abordar la optimización por esta ruta tiene altas limitaciones.

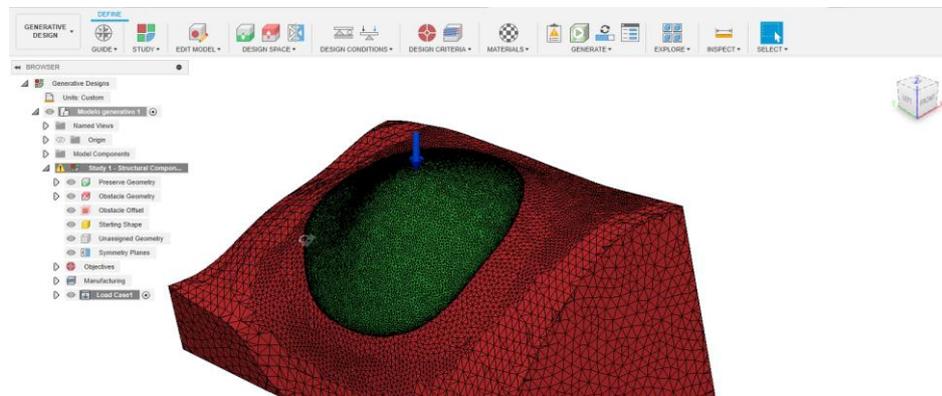


Ilustración 28: Prótesis en diseño generativo

Fuente: Autores

3.2. Segundo intento

Para este nuevo desarrollo de la metodología se consideró lo aprendido en el intento anterior. Se realiza una copia simétrica del seno de la paciente y se incluye para poder crear una prótesis que se adapte al cuerpo de la paciente, se realiza el tratamiento de la malla de esta prótesis con Meshmixer. Luego, se importa la malla a Fusion asegurándose de importarlo en las unidades correctas, es decir, en milímetros, centímetros o metros, según correspondan las medidas.

Este intento tiene la misma metodología que el resultado final variando solamente en la creación de caras en la malla para la realización de un

entramado volumétrico. Además, se añaden las propiedades físicas y mecánicas de la resina 80 A, lo que cambia el resultado del diseño generativo.

Estos primeros resultados otorgados por la inteligencia artificial del software se pueden apreciar en la *Ilustración 29*.

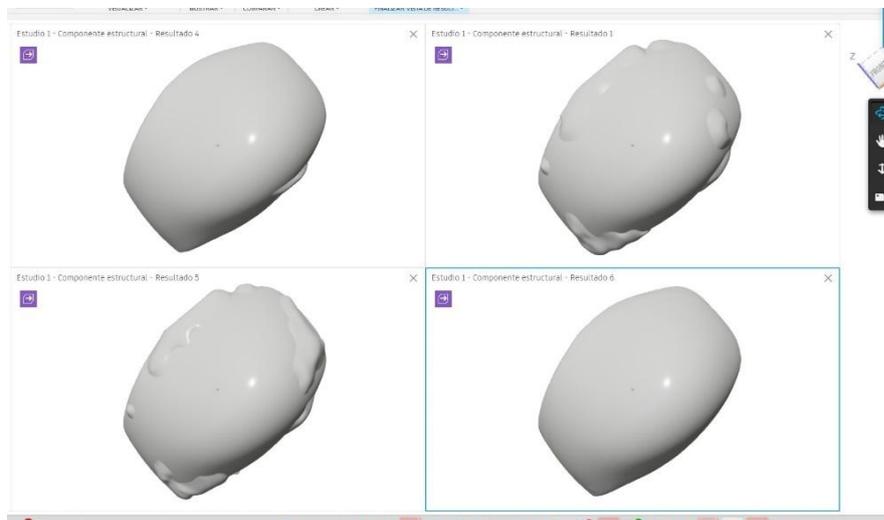


Ilustración 29: Primeros resultados de diseño generativo
Fuente: Autores

3.3. Resultado final

El software realiza el análisis y cálculos respectivos para la obtención de resultados en su nube. Estos resultados pueden variar en tiempo de obtención según la complejidad del diseño y la capacidad de cálculo de la nube en ese momento. El tiempo restante de esta operación y otros detalles se pueden evidenciar en la ventana de “Estado de tarea” del software.

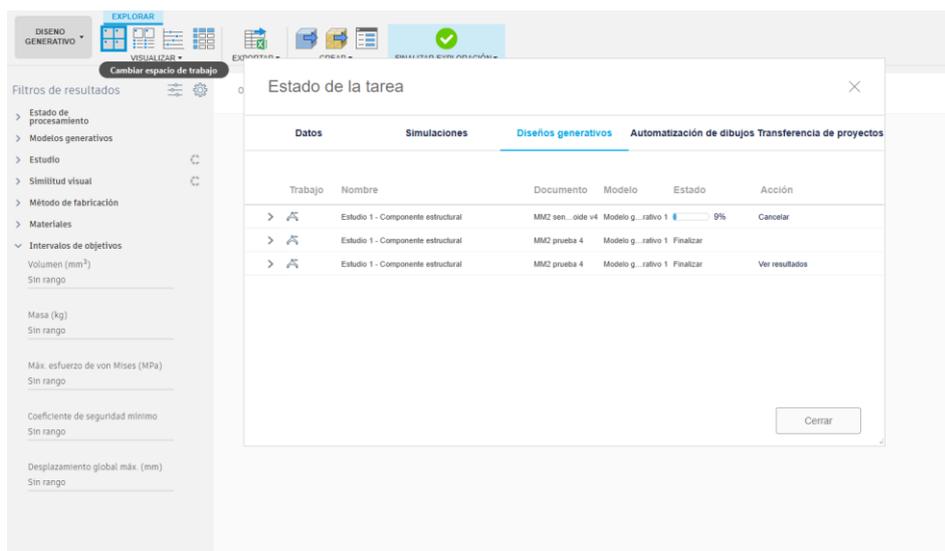


Ilustración 30: Ventana de estado de modelo generativo
Fuente: Autores

En la *Ilustración 31* se observan las 4 mejores alternativas obtenidas a través de diseño generativo, sin embargo, el resultado 3 es el recomendado por el

software y a la vez es el que mejor conserva la forma exterior de la prótesis. Además, en la Ilustración 32 se observa las zonas donde la optimización topológica añade material para resistir la fuerza aplicada según los criterios para los cuales fue optimizada.

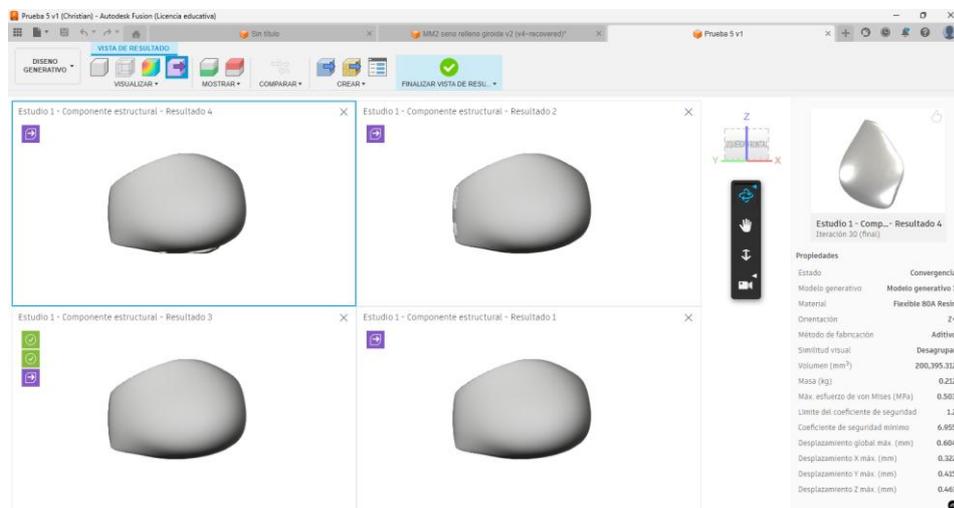


Ilustración 31: Vista frontal de resultados de diseño generativo
Fuente: Autores

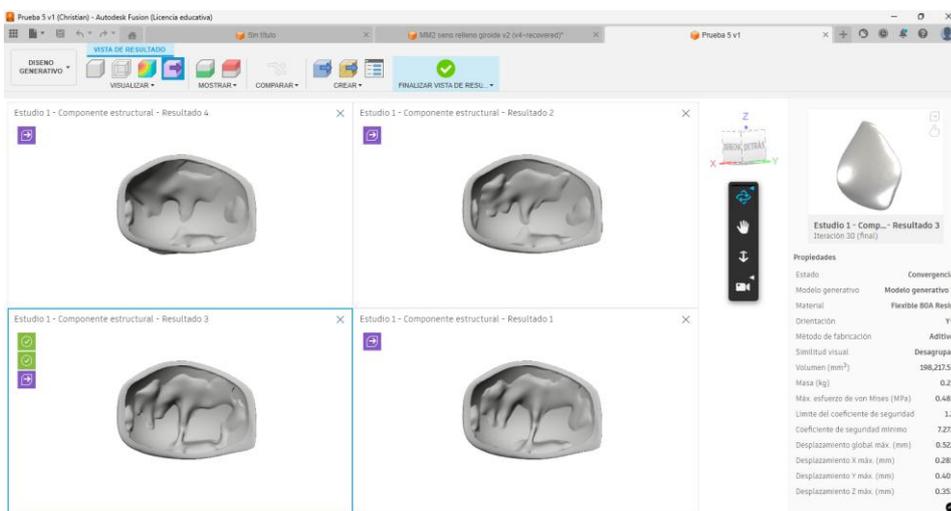


Ilustración 32: Vista posterior de resultados de diseño generativo.
Fuente: Autores

En el siguiente recuadro (ver Ilustración 33) se observan las 7 alternativas obtenidas por la optimización topológica, sin embargo, se observa que los diseños con menor masa y mayor coeficiente de seguridad mínimo está entre los 4 primeros resultados tal como indicó el software anteriormente, siendo el mejor diseño obtenido el de la fabricación sin restricciones.

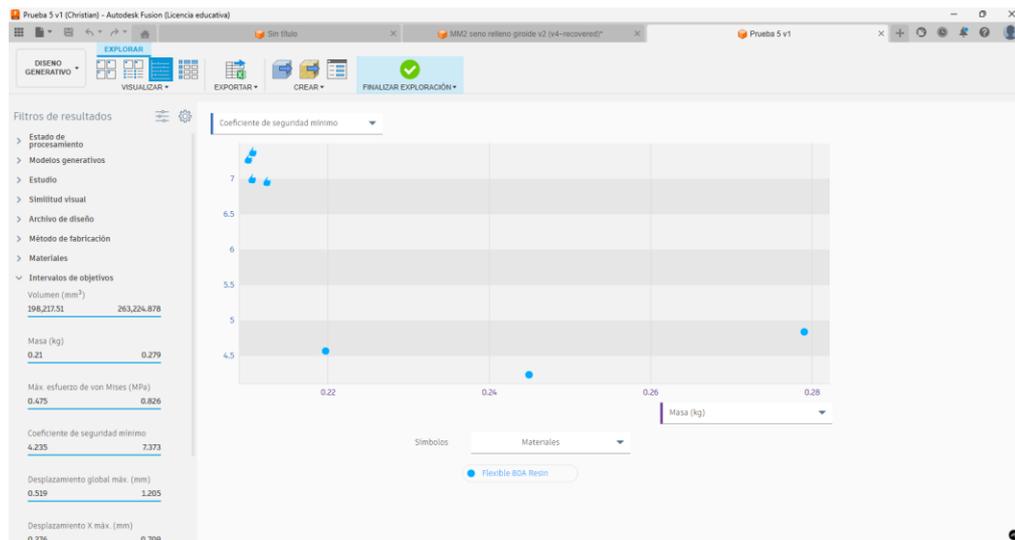


Ilustración 33: Comparación de masa y coeficiente de seguridad entre resultados

Fuente: Autores

En el software además se pudieron observar las propiedades del modelo obtenido, en el cual indicó que la orientación óptima para imprimirlo es orientada en el eje “Y positivo”, considerando las coordenadas del espacio de diseño, es decir, que de esta manera debe de ser llevado a la mesa de impresión.

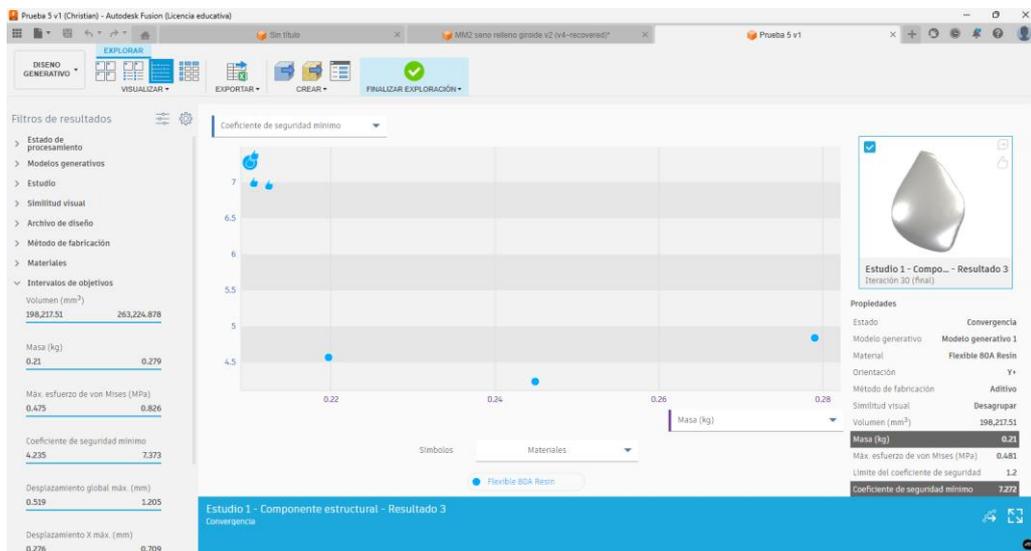


Ilustración 34: Propiedades y características de la solución escogida

Fuente: Autores

A continuación, en la ilustración 35 se muestra el modelo en malla y como cuerpo sólido, que fueron obtenidos a partir de la alternativa 3.

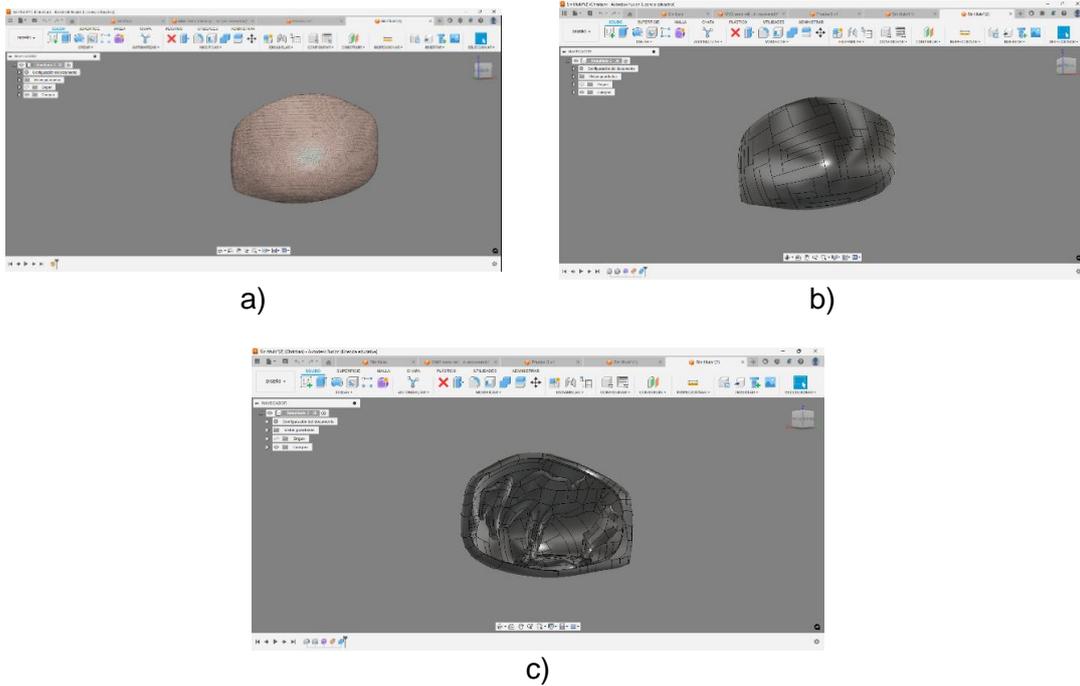


Ilustración 35: Modelo de solución final a) Vista malla, b) Vista sólido cara anterior, c) Vista sólido cara posterior.

Fuente: Autores

3.4. Simulación de características biomecánicas semejantes a las de un seno sano

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones aplicando las fuerzas establecidas en la ilustración 20 de la metodología:

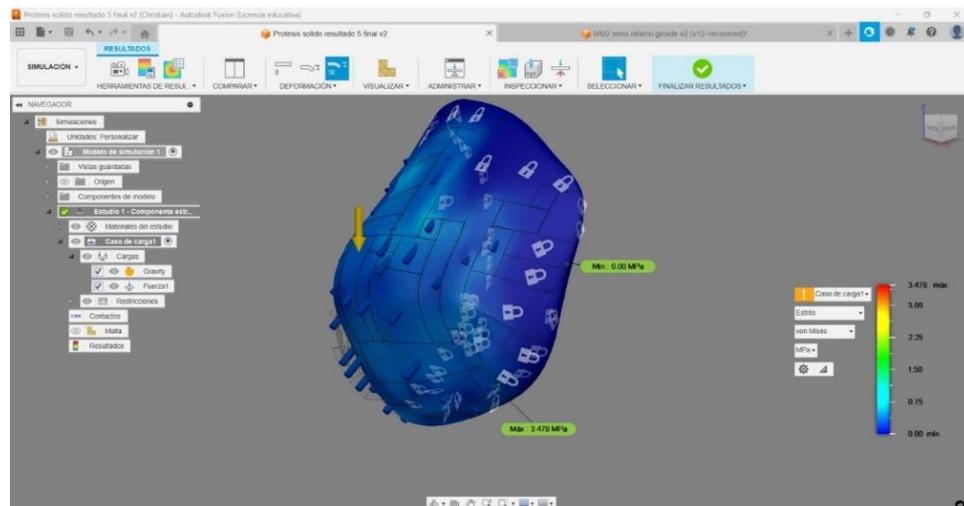


Ilustración 36 Vista en diagonal del resultado de Simulación, campo de estrés (Von Mises)

Fuente: Autores

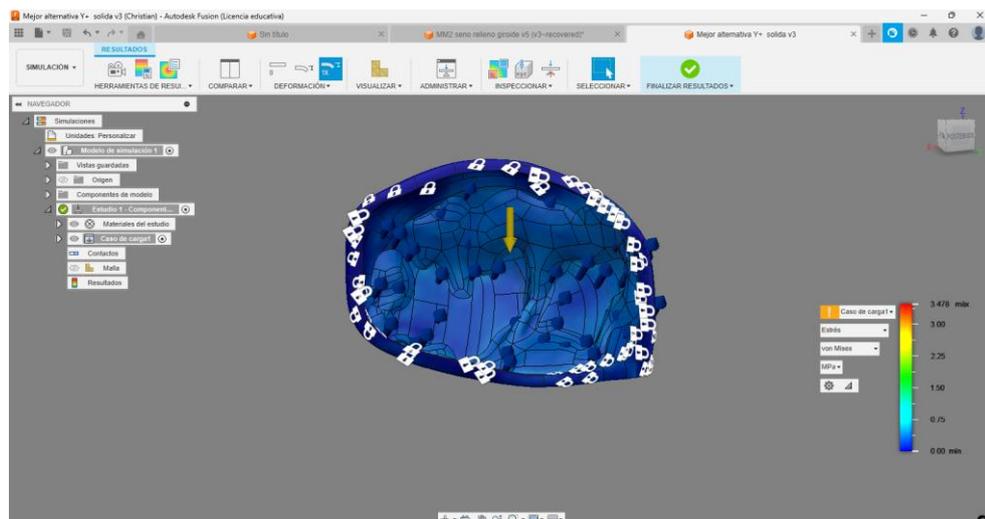


Ilustración 37 Vista del Resultado de Simulación de Esfuerzos (Von Mises) de la parte convexa de la prótesis

Fuente: Autores

A continuación, se observan los resultados de los desplazamientos de la prótesis:

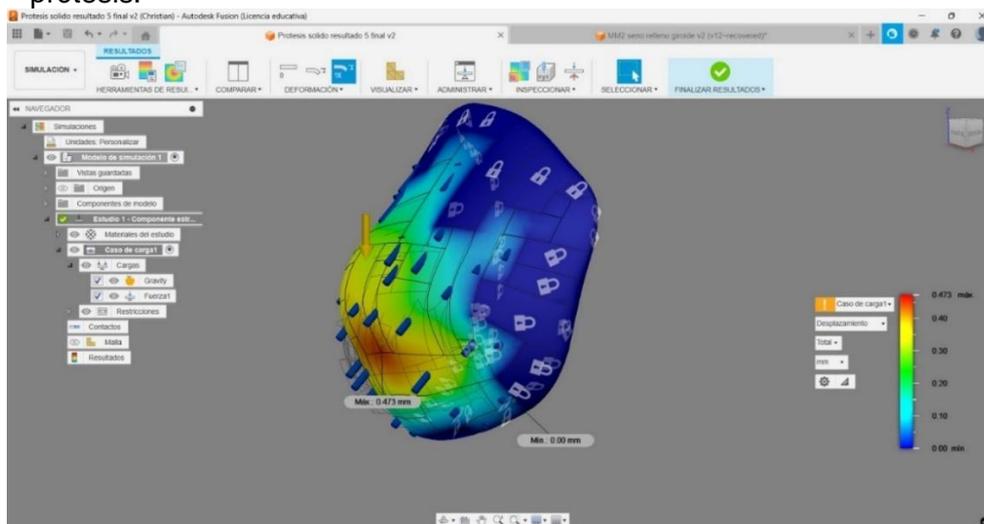


Ilustración 38: Vista del Resultado de Simulación de Esfuerzos (Von Mises) de la parte convexa de la prótesis

Fuente: Autores

Aquí se observa que el desplazamiento máximo es de 0.473 mm, este pequeño desplazamiento coincide con el obtenido del estudio generativo el cual indica que el desplazamiento máximo global es de 0.522 mm.

3.5. Impresión de prótesis

3.5.1. Modelo de prótesis con patrón giroide:

Se introduce el modelo a la cama de impresión dentro del software PreForm siguiendo la metodología de manufactura anterior:

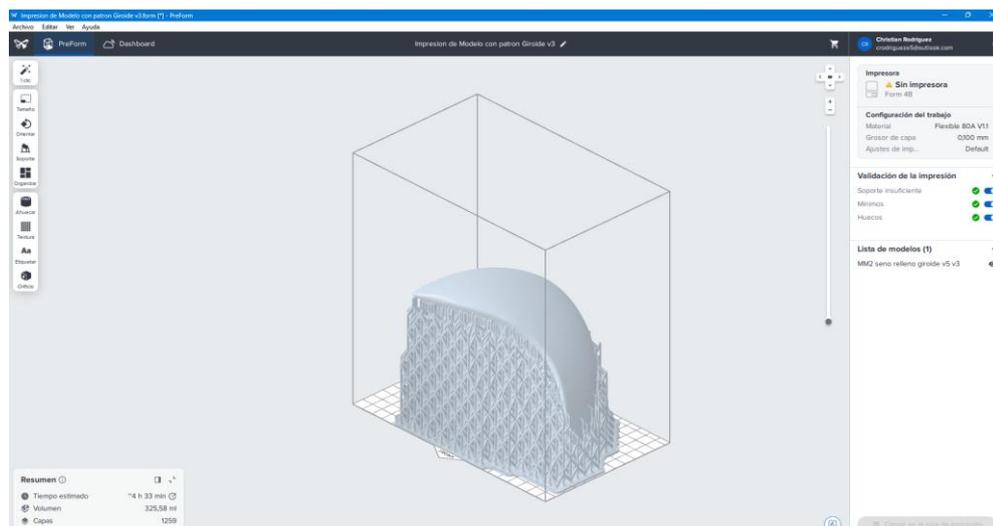


Ilustración 39: Modelo de prótesis con patrón giroide al 7.5% de relleno para impresión
Fuente: Autores

Esta representación del modelo en la cama de impresión según la ilustración 35 es la óptima debido a que se tuvo que orientar el modelo para evitar efectos de copa durante la impresión. Esto es que se quede resina líquida en espacios en donde no pueda escapar. Sin embargo, para imprimir este modelo en esta orientación se escaló este a 0.8 de su tamaño original.

3.5.2. Modelo de prótesis creada por Optimización Topológica.

En este caso también se introduce el modelo a la cama de impresión dentro del software PreForm siguiendo la orientación para la cual fue optimizada según la optimización topológica realizada:

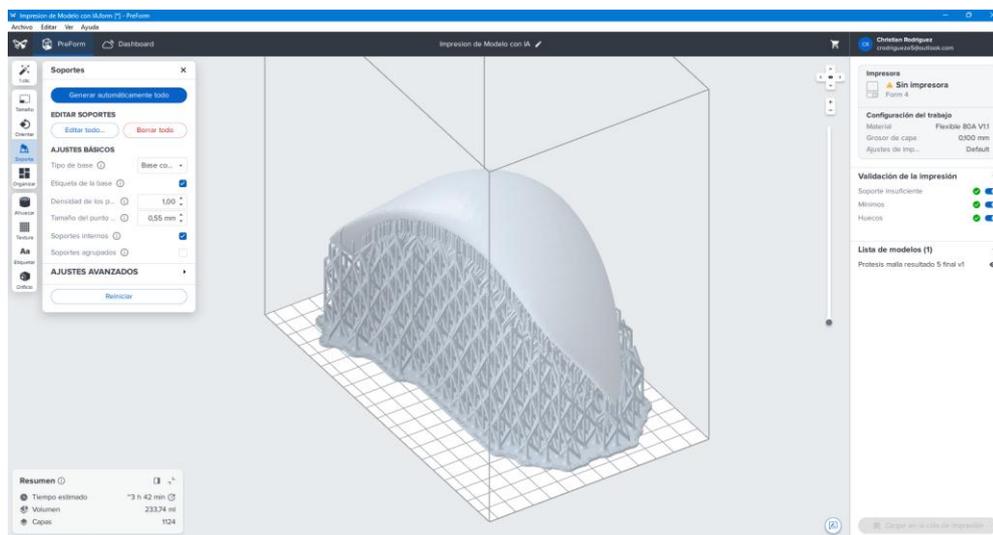


Ilustración 40: Modelo de prótesis realizada con optimización topológica para impresión
Fuente: Autores

Si bien este modelo no tiene problemas para ser impreso, para la comparativa con el modelo con patrón giroide se realizó una reducción de un 0.8 de su tamaño original en ambos modelos.

Por tanto, haciendo una comparativa del tiempo de impresión y volumen entre ambos modelos obtenidos mediante el software de Preform, se obtiene que:

Tabla 2: Comparación de tiempo y volumen de impresión entre modelo con patrón giroide al 7.5% de relleno y modelo con optimización topológica

	Patrón giroide 7.5%	Modelo con Optimización Topológica
Tiempo estimado [min]	273	222
Volumen [mL]	325,58	233,74

Esto indica que la nueva metodología aplicada optimiza el tiempo de fabricación, siendo un 18,7% más rápida de fabricar que con la metodología anterior, de la misma manera se observa una optimización en la cantidad de material utilizado, en este caso es de un 28%.

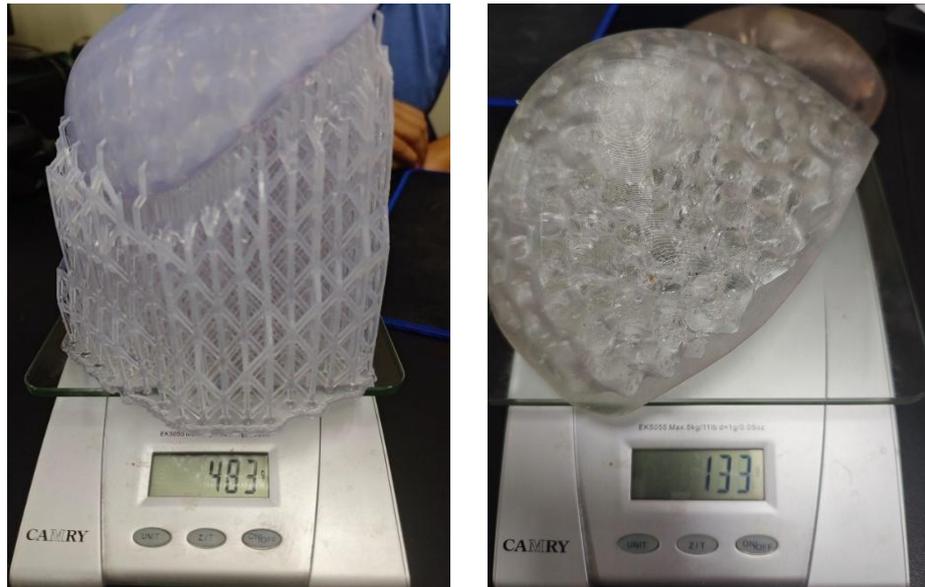
3.6. Comparativa de Manufactura de las Prótesis

3.6.1. Prótesis con Patrón Giroide al 7.5%

A continuación, se observa el modelo de prótesis con patrón giroide



Ilustración 41: Modelo de prótesis impreso por tecnología SLA
Fuente: Autores



(a)

(b)

Ilustración 42: Peso de Modelo de Prótesis con soportes (a) y (b)

Fuente: Autores

3.6.2. Prótesis con Optimización Topológica

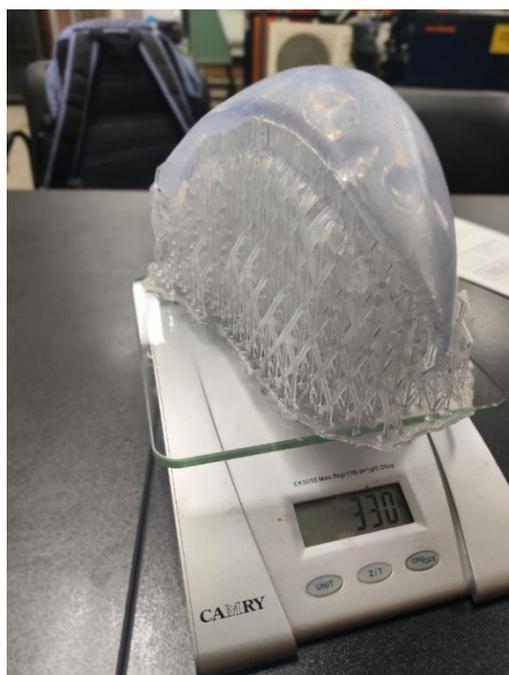
El modelo con optimización topológica se muestra mucho más ligero que el modelo con patrón giroide. Los soportes de este modelo fueron sencillos de retirar ya que este modelo no tiene una estructura interna que dificulte su extracción. Este último factor también influye en el tiempo de impresión.



Ilustración 43: Modelo de prótesis con optimización topológica impreso por tecnología SLA

Fuente: Autor propio

A continuación, se muestra el peso del modelo diseñado por medio de IA con soportes y sin soportes:



(a)



(b)

Ilustración 44: Peso del modelo optimizado con soportes (a) y sin soportes (b).

Fuente: Autores.

Como se menciona en la sección 3.5 de este documento se realizaron las impresiones con resina 80A de ambas prótesis teniendo como resultado la siguiente tabla comparativa:

Tabla 3: Comparación de modelo con patrón giroide al 7.5% y modelo con optimización topológica

Fuente: Autor propio

	Patrón giroide 7.5%	Modelo con Optimización Topológica
Peso con soportes (gramos)	483	330
Peso sin soportes (gramos)	133	109
Tiempo en retiro de soportes	120 minutos	5 minutos

El porcentaje en reducción del peso de las prótesis considerando los soportes es de 31.7%, mientras que sin soportes el peso se optimiza en un 18%.

La complejidad del modelo impreso de la prótesis fabricada con la metodología anterior del proyecto Zule implican tiempos prolongados de retiro de soportes, debido a que, si bien al inicio puede resultar sencillo el retirarlos, luego se debe de tener especial cuidado con la estructura giroide al momento de retirar dichos

soportes, una mala maniobra puede fracturarlos, en este caso el tiempo cronometrado para esta etapa del postproceso tuvo una duración de 120 minutos.

Por otro lado, la prótesis con la metodología desarrollada en este proyecto permite que el retiro de los soportes sea en un tiempo muy bajo en comparación, en este caso tomó un tiempo cronometrado de alrededor de 5 minutos en retirarlos. Se optimizó en total un 95.8%.

Si se considera el costo de la resina 80A en el mercado la cual a la fecha es de \$200 por litro (FORMLABS, 2025), por lo cual, considerando el volumen de resina aproximado utilizado que nos indica la máquina, la prótesis con relleno giroide tiene un costo de material para producción de USD 65,20, sin embargo, la, prótesis con diseño optimizado tiene costo de material para producción de USD 46,75.

CAPITULO 4:

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se concluye que a partir de la metodología estructurada se logró optimizar el diseño para manufactura aditiva mediante la utilización de un software con inteligencia artificial de un modelo de prótesis mamaria externa, creando una mejora de su estructura topológica para que la prótesis alcance las características biomecánicas de un seno sano. A partir de la optimización, se realizó una reducción significativa del tiempo empleado para la fabricación y una disminución del material utilizado en la prótesis para alcanzar la misma resistencia según las cargas soportadas causadas por un brasier, alcanzando así el objetivo general del proyecto.
- Se concluye que mediante la utilización de herramientas computacionales de manufactura se logró la simulación de características biomecánicas semejantes a las de un seno sano, analizando así el comportamiento de esfuerzos y deformación del modelo al estar sometido a cargas externas.
- Por otro lado, la metodología alcanzada permitió realizar un rediseño del modelo propuesto el cual fue manufacturado por una impresora 3D con tecnología de fotopolimerización, el mismo que ha demostrado ser más eficiente y de menor costo para su fabricación.
- Los resultados obtenidos en la primera prueba para el desarrollo de la metodología de manufactura aditiva de prótesis mamarias evidenciaron que el proceso de conversión de la malla a sólido tiene un impacto significativo en la cantidad de análisis requerido dentro de la optimización topológica del modelo, dependiendo de las cargas aplicadas.
- Tras comparar la fabricación de la prótesis con un patrón interno giroide y la obtenida mediante optimización topológica, se concluyó que el primer modelo presenta un tiempo de manufactura considerablemente más prolongado y demanda un mayor consumo de material para su impresión, a pesar de que ambos modelos mantienen el mismo tamaño y orientación, además de que el tiempo de postprocesado de la prótesis optimizada es significativamente menor. Por otro lado, la optimización en la manufactura permite reducir el impacto medio ambiental de esta prótesis, reduciendo energía y material para su producción.
- Se determinó que, en ciertos casos, la superficie de impresión de una impresora de fotopolimerización, como la Formlabs 4B utilizada en este estudio, puede no ser lo suficientemente amplia para imprimir el modelo en la orientación para la cual ha sido optimizado según la metodología propuesta.
- El proyecto ha alcanzado un nivel de escala TRL de 4 ya que el resultado del modelo propuesto ha sido sometido a simulaciones y a comparación con el modelo anterior (patrón giroide), sin embargo, el prototipo aún no ha sido probado en condiciones simuladas aproximadas a un entorno real.
- Por último, al haberse trabajado por primera vez con una paciente mastectomizada dentro del proyecto Zule, el estudio tuvo la ventaja de poder

considerar la cicatriz de la paciente, por tanto, se da un paso más hacia un diseño final en el que la prótesis es amigable con la situación de cada paciente.

4.2. Recomendaciones

- Para optimizar el análisis, es conveniente reducir al mínimo la cantidad de caras o elementos, ya que un mayor número de estos incrementa la complejidad del proceso y prolonga el tiempo necesario para obtener los resultados. En caso de trabajar con un gran número de caras, es recomendable utilizar una computadora con alta capacidad de procesamiento, esto facilitará el cálculo y mejorar los resultados.
- Se sugiere recopilar una mayor cantidad de modelos anatómicos femeninos con el fin de determinar un área de impresión máxima y, con base en ello, adquirir una impresora acorde a las necesidades del proyecto. En este estudio, el modelo se ajustó con un margen mínimo de holgura.
- Es importante evaluar las cargas y deformaciones generadas en otros casos de estudio, por ejemplo: cuando una mujer cruza los brazos, así como otras condiciones mecánicas que puedan influir en el uso cotidiano de la prótesis.
- Se recomienda realizar un análisis más profundo sobre los posibles factores que puedan causar irritación, alergia o alguna otra molestia en la piel por el uso de la prótesis. Esto tiene como finalidad obtener información de una muestra significativa y evaluar el desempeño de la prótesis.
- Dado que la operación de Shell podría no ejecutarse debido a limitaciones de hardware, se recomienda emplear computadoras con mayor capacidad de procesamiento.
- Para fabricar prótesis destinadas a mujeres de contextura más grande, se aconseja optar por una impresora con una cama de impresión de mayor tamaño, ya que la actual restringe la posibilidad de trabajar con modelos de mayor dimensión.
- Se recomienda analizar el impacto de modificar el desfase y la distancia de transición en la operación de entramado volumétrico.
- Es conveniente investigar los efectos de añadir orificios en la parte posterior del modelo para facilitar la evacuación de la resina líquida durante el proceso de impresión.
- Se incentiva a seguir la investigación ya que esta metodología para el diseño de las prótesis es prometedora para la obtención de una prótesis asequible para las mujeres que sufren de cáncer de mama.

BIBLIOGRAFÍA

Obtenido de <https://americanbreastcare.com/custom/>

Bravo Villa, M. E., & Garzón Basurto, J. A. (2020). Diseño de prótesis mamarias externas personalizadas para manufactura. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Escuela Superior Politecnica del Litoral.

Coello Del Pozo, J. F., & Recalde Merchán, R. G. (2023). Diseño, fabricación y caracterización mecánica de prótesis mamarias externas creadas con manufactura aditiva. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Escuela Superior Politecnica del Litoral.

FORMLABS. (3 de Abril de 2025). *Flexible 80A Resin*. Obtenido de FORMLABS: https://formlabs.com/store/materials/flexible-80a-resin/?srsltid=AfmBOorbu6EQWBrWgVzIKCkrhvxINJ_RMmRM4hMBMWyAwtlmqfdoqwTb

Obtenido de www.biomedgrid.com

Gentile, D., Martorana, F., Karakatsanis, A., Caruso, F., Caruso, M., Castiglione, G., . . . Rizzo, A. (2024). Predictors of mastectomy in breast cancer patients with complete remission of primary tumor after neoadjuvant therapy: A retrospective study. *European Journal of Surgical Oncology*, 50(12).

J. Kim, J. K.-H.-S.-S.-Y.-H.-M.-B.-A. (2024). Survival outcomes of young-age female patients with early breast cancer: an international multicenter cohort study. *ESMO Open*.

SOLCA Núcleo de Quito. (24 de octubre de 2023). *SOLCA Núcleo de Quito*. Obtenido de SOLCA promueve la detección oportuna del cáncer de mama: <https://solcaquito.org.ec/solca-promueve-la-deteccion-oportuna-del-cancer-de-mama/#:~:text=M%C3%A1s%20de%2030%20mil%20casos,la%20piel%20de%20la%20mama.&text=Secreci%C3%B3n%20por%20el%20pez%C3%B3n.,permite%20una%20supervivencia%20del%2090%25>.

Top Care Store. (s.f.). *TOP CARE STORE*. Obtenido de https://www.topcarestore.com/collections/mastectomia-protesis-externas?srsltid=AfmBOorOSAOUft2_Nm11tZFKb1fZhbU4sOZc1O2UnPBHil8nMsrbqxWA

Villacís Apolinario, A. G., & Romero Murga, F. A. (2022). Rediseño para manufactura aditiva de prótesis mamarias externas basado en datos anatómicos de escaneo tridimensional. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Escuela Superior Politecnica del Litoral.