



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:**

**EVALUACIÓN DE REVESTIMIENTO POLIMÉRICO A BASE DE SILICONAS COMO  
ALTERNATIVA ESTÉTICA PARA PRÓTESIS DE PLA**

**PRESENTADO POR:**

**21841111 GRECIA FERNANDA CASCO NORIEGA**

**ASESOR: INGENIERO MANUEL GAMERO**

**CAMPUS: SAN PEDRO SULA, DICIEMBRE, 2023**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al llegar a este punto culminante de mi viaje académico, me siento profundamente agradecida y bendecida por tener el apoyo y el amor de tantas personas increíbles a lo largo de este camino.

Primero, mi más profundo agradecimiento a Dios, por ser mi guía constante y fuente de fuerza en los momentos de incertidumbre y desafío. Su presencia en mi vida ha sido la luz que me ha guiado a través de cada paso de este viaje.

A mi querida mamá, mi roca y mi mayor apoyo, mi inspiración. Gracias por tu amor incondicional, tu sabiduría y tus sacrificios. Tu fe inquebrantable en mí y tu apoyo incansable han sido el viento bajo mis alas, empujándome hacia adelante incluso en los momentos más difíciles, gracias mami.

A mis amigos, compañeros de lucha y alegrías Maria José Alvarado , Jennifer Orellana , Eduardo Díaz, Alexandra Aleman, Hugo Soler, Guillermo Mejía, Alejandro Ramos, Alejandro Munguia, Celeste Mendoza, Sammy Aviles , Geovanny Cruz y el Ing. Winder que me brindo su apoyo. Gracias a todos por estar a mi lado, ofreciéndome su ayuda, su hombro para llorar y sus palabras de ánimo. Su apoyo ha sido un regalo invaluable, y nuestra amistad, un tesoro que siempre guardaré.

Este viaje ha estado lleno de obstáculos y desafíos, pero nunca bajé la guardia. A cada paso, he aprendido a creer más en mí misma, a enfrentar las dificultades con determinación y a transformar cada obstáculo en una oportunidad para crecer. Hoy puedo decir con orgullo: "Lo logré". Esta experiencia no solo ha sido una travesía académica, sino también un viaje de autodescubrimiento y fortalecimiento personal.

Estoy profundamente agradecida por cada lección aprendida, cada desafío superado y cada momento de éxito en este camino. Este logro es un testimonio de la fuerza que reside en la perseverancia, la fe y el poder del apoyo y el amor.

## **EPÍGRAFE**

"Siempre parece imposible hasta que esté hecho". Nelson Mandela.

## RESUMEN

Esta investigación presenta un estudio detallado sobre el desarrollo y la integración de piel sintética en prototipos de prótesis impresas en 3D. Se realizaron experimentos para medir la conductividad térmica de los dedos anular, meñique, índice y pulgar de la prótesis, utilizando gráficos lineales para documentar la evolución de la temperatura bajo condiciones de estrés térmico. Los resultados mostraron un aumento lineal y constante en la temperatura de cada dedo, evidenciando una conductividad térmica estable y una respuesta predecible de los materiales utilizados.

Se evaluó el impacto de la incorporación de piel sintética en el prototipo de prótesis de mano. La investigación demostró que la piel sintética no solo mejora la estética y la interacción táctil de la prótesis, sino que también podría incrementar la aceptación del dispositivo por parte de los usuarios. Sin embargo, se identificaron desafíos relacionados con la durabilidad y la sensación táctil de las pieles sintéticas, lo que señala áreas clave para futuras mejoras.

piel sintética en la prótesis. Se enfocó en la optimización de la adhesión, la armonía estética y las propiedades físicas de la piel sintética, culminando con ajustes significativos en su diseño y composición. Estos ajustes resultaron en una mejora notable en la similitud de la piel sintética con la piel humana, así como en su funcionalidad en aplicaciones protésicas.

En conclusión, este estudio aporta conocimientos valiosos en el campo de las prótesis. Los hallazgos tienen implicaciones significativas en el diseño de prótesis más realistas y funcionales, contribuyendo al avance de la ingeniería de prótesis y la mejora de la calidad de vida de los usuarios.

**Palabras clave:** Ingeniería de tejidos, Piel artificial, Prótesis estéticas.

## **ABSTRACT**

This research presents a detailed study on the development and integration of synthetic skin into 3D printed prosthesis prototypes. Experiments were conducted to measure the thermal conductivity of the prosthetic ring, pinky, index and thumb fingers, using line graphs to document the evolution of temperature under thermal stress conditions. The results showed a linear and constant increase in the temperature of each finger, evidencing a stable thermal conductivity and a predictable response of the materials used.

The impact of incorporating synthetic skin into the prototype hand prosthesis was evaluated. The research demonstrated that the synthetic skin not only improves the aesthetics and tactile interaction of the prosthesis, but could also increase user acceptance of the device. However, challenges related to the durability and tactile feel of the synthetic skins were identified, pointing to key areas for future improvements.

The study also covered the development of methodologies for effective integration of the synthetic skin into the prosthesis. It focused on optimizing the adhesion, aesthetic harmony and physical properties of the synthetic skin, culminating in significant adjustments to its design and composition. These adjustments resulted in a marked improvement in the similarity of the synthetic skin to human skin, as well as its functionality in prosthetic applications. In conclusion, this study provides valuable insights into the field of prosthetics. The findings have significant implications in the design of more realistic and functional prostheses, contributing to the advancement of prosthetic engineering and the improvement of users' quality of life.

**Key words:** Tissue engineering, Artificial skin, Aesthetic prosthesis.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE</b>	<b>3</b>
2.1.	Antecedentes	3
2.2.	Problemática	7
2.3.	Imagen Integradora	9
2.4.	Tabla de limitaciones	11
<b>III.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>12</b>
3.1.	Objetivo General	12
3.2.	Objetivo Específico	12
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>13</b>
4.1.	Variable de Investigación	13
4.1.1.	VARIABLE INDEPENDIENTE	13
4.1.2.	VARIABLES DEPENDIENTES	14
4.1.3.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	16
4.2.	Objetivo del método	18
4.3.	Resumen Del Proceso	19
4.4.	Imagen del Proceso	21
4.5.	Métricas de evaluación	23
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>25</b>
5.1	Selección de polímero para piel sintética	26
5.2	Diseño y prototipado de prótesis de mano	33
5.3	Cálculo de volumen de la piel sobre la prótesis en SolidWorks	37
5.4	Impresión 3D	45
5.5	Desarrollo e integración de piel a prótesis	46
5.6	Comparación De Color Utilizando Sistema Pantone	50
5.7	Evaluación De Textura	51
5.8	Pruebas De Adherencia	52
5.8.1	PRUEBA DE CINTA	54

5.8.2	PRUEBA DE FLEXIÓN .....	55
5.8.3	PRUEBA DE IMPACTO.....	56
<b>5.9</b>	<b>Pruebas de durabilidad y resistencia .....</b>	<b>60</b>
5.9.1	PRUEBA DE ABRASIÓN.....	61
<b>5.10</b>	<b>Prueba de humedad .....</b>	<b>62</b>
<b>5.11</b>	<b>Prueba de peso.....</b>	<b>63</b>
<b>5.12</b>	<b>Pruebas de temperatura .....</b>	<b>66</b>
<b>5.13</b>	<b>Desglose de costos .....</b>	<b>76</b>
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>VII.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>80</b>
7.1	Muestra A, colores adquiridos con Pantone Matching System.....	80
7.2	Muestra B, colores adquiridos con Pantone Matching System.....	80
7.3	Muestra 1A, colores adquiridos con Pantone Matching System .....	81
7.4	Muestra de mano A, colores adquiridos con Pantone Matching System.....	81
7.5	Muestra 2A, colores adquiridos con Pantone Matching System .....	82
7.6	Muestra 1A, Técnica fotográfica con bordes definidos .....	82
7.7	Muestra 2A, Técnica fotográfica con bordes definidos .....	83
7.8	Muestra 2A, Técnica fotográfica con bordes definidos, vista frontal .....	83
7.9	Muestra 2A, Técnica fotográfica con bordes definidos, vista lateral.....	84
7.10	Prueba de adherencia.....	84
7.11	Pruebas de durabilidad y resistencia .....	85
7.12	Pruebas de temperatura con cámara termográfica .....	86
7.13	Prueba de peso.....	88
<b>VIII.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>89</b>

#### ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1.	Limitaciones de estudio.....	11
Tabla 2.	Operacionalización de variables.....	16
Tabla 3.	Objetivo del método.....	18

Tabla 4. Características del Platsil FS-10. ....	31
Tabla 5. Propiedades del Platsil FS-10.....	32
Tabla 6. Información Toxicológica del Platsil FS-10.....	32
Tabla 7. Cálculo del volumen de Muestra A.....	41
Tabla 8. Cálculo del volumen de Muestra B.....	43
Tabla 9. Duración Requerida para la Elaboración del Molde Negativo .....	47
Tabla 10. Duración Requerida para el revestimiento de prótesis con piel sintética.....	48
Tabla 11. Hallazgos de comparación de colores utilizados .....	50
Tabla 12. Hallazgos evaluación de textura.....	52
Tabla 13. Prueba de temperatura.....	67
Tabla 14. Matriz de costos.....	77

### **ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Imagen integradora. ....	10
Ilustración 2. Variables sintetizadas.....	15
Ilustración 3. Imagen del proceso. ....	21
Ilustración 4. Imagen del proceso: Prueba y validación.....	22
Ilustración 5. Características de Silicona. ....	26
Ilustración 6. Tipos de Silicona.....	30
Ilustración 7. Modelado de mano en SolidWorks. ....	34
Ilustración 8. Medición de dedo meñique, anular y medio.....	35
Ilustración 9. Medición de dedo índice, pulgar y muñeca. ....	36
Ilustración 10. Modelado en SolidWorks de muestra A.....	38
Ilustración 11. Modelado en SolidWorks de muestra B.....	40
Ilustración 12. Resultados de pruebas de adherencia. ....	59
Ilustración 13. Prueba de peso .....	64
Ilustración 14. Pruebas de durabilidad y resistencia. ....	65
Ilustración 15. Pruebas de temperatura con cámara termográfica. ....	69
Ilustración 16. Gráfico de la prueba del dedo índice en condiciones controladas.....	70
Ilustración 17. Gráfico de prueba de temperatura con el dedo medio en condiciones controladas .....	71
Ilustración 18. Gráfico de prueba de temperatura con el dedo anular en condiciones controladas. ....	72
Ilustración 19. Gráfico de temperatura del dedo meñique en condiciones controladas. ....	74
Ilustración 20. Gráfico de temperatura del dedo índice en condiciones de alta intensidad. ....	75
Ilustración 21. Gráfico de temperatura alcanzada en prueba de alta intensidad del dedo pulgar.....	76

## I. INTRODUCCIÓN

El campo de investigación de las prótesis de mano ha experimentado avances constantes y relevantes que han mejorado significativamente la calidad de vida de personas con pérdida parcial o total de extremidades superiores. Sin embargo, un reto persistente es la apariencia estética de los revestimientos empleados que intentan simular la piel en estas prótesis. Aunque los prototipos actuales son innovadores, aún enfrentan dificultades en términos de calidad, realismo y funcionalidad que cumplen con las expectativas del usuario.

Se identificó el realismo estético como un factor determinante en la aceptación de prótesis por parte de los usuarios. La apariencia visual y táctil de la piel sintética se consideró crítica, impactando directamente en la autoestima del individuo y su capacidad para reintegrarse en contextos sociales. Se constató que las características estéticas de la prótesis influían en la percepción pública y en la auto-percepción del usuario con respecto a su imagen corporal.

En lo que respecta a las características de funcionalidad, se observó que la rigidez inherente y la falta de adaptabilidad de la piel sintética ejercían una influencia significativa en la destreza manual. Durante el período de estudio, se analizó cómo estas propiedades mecánicas afectaban la eficiencia con la que los usuarios podían realizar actividades cotidianas. Se concluyó que la flexibilidad y la adaptabilidad de la piel protésica eran esenciales para facilitar un rango de movimientos naturales, lo cual, a su vez, era fundamental para la ejecución efectiva de tareas diarias y la interacción con diversos objetos. (cruz, 2020).

La elección de materiales adecuados para la piel sintética es crucial. Se busca identificar compuestos avanzados que no solo imiten la apariencia natural de la piel humana, sino que también ofrezcan flexibilidad y durabilidad óptimas para la aplicación específica en prótesis de mano y con la producción a escala y la distribución comercial, llevando esta innovación desde el laboratorio hasta las manos de quienes la necesitan. Por lo tanto, esta investigación busca reducir estas limitaciones a través del uso de tecnologías avanzadas para el desarrollo de piel artificial y nuevos métodos de integración de la piel a una prótesis de mano impresa en 3D.

A través de una revisión integral de la literatura y un enfoque metodológico riguroso basado en 'Printing and Amputation: A scoping review. Disability and Rehabilitation' de SP, Graz, & Wagner (2019), esta investigación se propone abordar no solo los desafíos técnicos asociados con la piel sintética, sino también las importantes repercusiones psicosociales que estas prótesis tienen para sus usuarios. Este análisis multidisciplinario incorpora perspectivas tanto de la ingeniería como de la psicología y la medicina rehabilitadora.

El desarrollo y fabricación de prótesis han experimentado notables avances gracias a la implementación de tecnologías de vanguardia, como lo documenta ( Cannata, G, & Maggiali en 2018). Herramientas como la visualización, el modelado y la impresión en 3D han suplantado a las técnicas tradicionales, ofreciendo métodos más precisos, ergonómicos y eficientes. Estas innovaciones han permitido la creación de prótesis que no solo se ajustan mejor a los usuarios, sino que también imitan más fielmente la apariencia y funcionalidad de las extremidades naturales.

El estudio se centró en fusionar la estética, la sensación táctil, la utilidad y la movilidad en un revestimiento sintético para prótesis de mano. Al analizar y superar las limitaciones existentes, se buscó revolucionar las disciplinas de ingeniería biomédica y medicina. Al superar estas barreras, se aspiraba a mejorar significativamente la calidad de vida de quienes dependen de estas prótesis.

Se exploraron materiales avanzados que ofrecían mayor durabilidad y flexibilidad. Se realizaron pruebas exhaustivas para evaluar la compatibilidad de estos materiales con la piel humana y su capacidad para resistir condiciones ambientales cotidianas.

Este trabajo representó un esfuerzo colaborativo y multidisciplinario para abordar tanto los desafíos técnicos como los aspectos psicosociales de la piel sintética en prótesis de mano. El resultado fue una contribución significativa a la ingeniería de prótesis, con el potencial de transformar la manera en que los usuarios interactúan con estos dispositivos y perciben su propia imagen.

## **II. ESTADO DEL ARTE**

El capítulo presentado detalló la evolución y el desarrollo de la piel sintética para prótesis, destacando los avances históricos y las contribuciones clave en este campo. Se abordó el tema desde una perspectiva integral, evaluando tanto las barreras tecnológicas actuales como las implicaciones sociales y médicas de integrar piel sintética en dispositivos protésicos.

La investigación enfatizó la importancia de mejorar la calidad de vida de los usuarios de prótesis y analizó las limitaciones en la investigación y desarrollo, con énfasis en replicar las propiedades biomecánicas y sensoriales de la piel humana. El estudio resaltó la necesidad de un diseño centrado en el usuario, abarcando aspectos físicos, emocionales y psicosociales, y contribuyó significativamente al campo de la ingeniería biomédica.

### **2.1. ANTECEDENTES**

Las prótesis han tenido un impacto transformador en la rehabilitación de individuos con amputaciones o discapacidades físicas, desempeñando un papel vital al ofrecerles movilidad mejorada y restaurar la funcionalidad de extremidades perdidas. Esta contribución ha sido crucial en la mejora significativa de la calidad de vida de estos pacientes, permitiéndoles llevar a cabo actividades diarias con mayor independencia y eficiencia.

Históricamente, la prótesis más antigua conocida es un notable artefacto: una prótesis de dedo del pie hallada en el pie de una momia egipcia, datada alrededor del año 1000 a.C. La fabricación de esta prótesis, realizada con madera y cuero, revela un enfoque integral que consideraba tanto la funcionalidad como la estética. Este hallazgo es un testimonio temprano del ingenio humano y su deseo de superar las limitaciones físicas, así como de la importancia dada a la apariencia estética en la cultura egipcia.

Avanzando en el tiempo hacia la Edad Media, las prótesis experimentaron una evolución notable, aunque seguían siendo fundamentalmente rudimentarias en su diseño y funcionalidad. Durante este período, las "manos de hierro" emergieron como un tipo de prótesis distintiva. Estos dispositivos, aunque rudimentarios en comparación con los estándares modernos, eran significativos en el contexto de su época. La mano de hierro más famosa, perteneciente a Götz von Berlichingen, un caballero alemán, se convirtió en un

símbolo icónico de la época. Tras perder su mano en el campo de batalla en 1504, von Berlichingen se equipó con una prótesis de hierro que, si bien tenía limitaciones en términos de movimiento y funcionalidad, representaba un notable avance en la tecnología protésica de la época. Estas prótesis no solo cumplían una función práctica sino que también eran vistas como símbolos de valentía y resiliencia, marcando el estatus de sus portadores y recordándoles permanentemente sus hazañas y sacrificios.

Estos desarrollos históricos en la tecnología protésica reflejan un esfuerzo continuo y en evolución de la humanidad por mejorar la vida de aquellos afectados por la pérdida de extremidades. A lo largo de los siglos, la tecnología protésica ha evolucionado desde soluciones básicas y simbólicas hasta sofisticados dispositivos que imitan cada vez más de cerca la funcionalidad y apariencia de las extremidades humanas naturales, mejorando significativamente la calidad de vida de los usuarios. (Bhuyan & Kumar, 2021).

Durante el Renacimiento, un renovado interés en la anatomía y la biomecánica del cuerpo humano llevó a mejoras en el diseño de prótesis. Ambroise Paré, un cirujano francés del siglo XVI, es a menudo acreditado con la invención de prótesis modernas. Desarrolló prótesis de piernas con articulaciones flexibles y manos que podían abrirse y cerrarse.

Históricamente, la creación y desarrollo de prótesis se remonta al siglo XIX, cuando los primeros diseños se elaboraban a partir de materiales básicos como cuero, metal y madera. Posteriormente, la llegada de plásticos y compuestos avanzados transformó el panorama, dando lugar a prototipos más ligeros y funcionales.

En la actualidad, la impresión 3D ha revolucionado en el campo de las prótesis, con técnicas innovadoras de modelado e impresión que han revolucionado el diseño y producción. A medida que pasa el tiempo, se han desarrollado muchas investigaciones y artículos científicos abarcando este tema, tales como:

El estudio **<<A Method for 3-D printing 3-D printing patient-specific prosthetic arms with high accuracy shape and size>>**, expone una metodología clara y sintetizada, la cual combina imágenes obtenidas a través de una tomografía computarizada (TC), diseño asistido por computadora, impresión 3D del brazo y moldeado y fundición de silicona. Este método fue utilizado en el diseño de prótesis tomando en consideración factores como la

forma y el tamaño del brazo para la recreación del prototipo, desarrollando prótesis de alta calidad y precisión mediante la utilización de impresoras 3D y fundición/moldeado de silicona. (Rena L. J. Cruz, 2020)

La estructura y el molde de la prótesis del brazo fue impresa en 3D y se moldeó con silicona. Una vez se obtuvo el prototipo final, se realizó una comparación cuantitativa entre la forma y encaje del brazo con relación a las imágenes de la TC original. El brazo tenía una alta precisión, presentaba un 96% porcentaje de coeficiente de similitud de datos, un error porcentual de 0.67. Por lo tanto, se concluyó que esta metodología es una solución para el diseño de prótesis de alta calidad y precisión para cualquier paciente.

Otro estudio titulado <<**Implementation of 3D printing technology in the field of prosthetics: past, present and future**>>, expone como las técnicas de diseño y fabricación e impresión de 3D han ido progresando rápidamente en cuanto a sus avances tecnológicos. Estableció nuevos métodos, tecnologías y capacitaciones para el desarrollo de prótesis, sin embargo, el enfoque principal del estudio era la impresión en 3D de un brazo que pudiera ser accionado a través de electromiografía. (Manero A, 2019)

De la misma manera, el estudio titulado <<**3D printed prosthetic arm**>>, tiene como objetivo principal el desarrollo de una prótesis de bajo precio, de peso ligero e impreso en 3D. Las contribuciones principales de este estudio fue la posibilidad de adaptar nuevas tecnologías para poder agarrar y posicionar ciertos objetos con la prótesis, como también, que su proceso de desarrollo sea fácil y sano para el ambiente. Resaltó que el 55% por ciento de la población de amputados no tienen los recursos económicos necesarios para poder comprar una prótesis. (Rena L. J. Cruz, 2020)

El desarrollo de prótesis con piel artificial ha constituido tanto un desafío como una oportunidad en el campo de la investigación biomédica, particularmente en la ingeniería de tejidos robóticos. La creación de piel artificial, utilizando materiales como hidrogeles, Platsil o siliconas, ha sido dirigida a emular el tejido humano, con el propósito de reparar o reemplazar áreas afectadas por quemaduras o lesiones. Este enfoque ha abierto nuevas posibilidades en la medicina regenerativa y en la tecnología de prótesis.

Los orígenes de la investigación en piel sintética se remontan a la década de 1970, marcando un período significativo de innovación y descubrimiento. Durante estos años, un equipo de investigadores de la Universidad de Harvard llevó a cabo un desarrollo pionero, creando un prototipo de piel artificial hecha de poliuretano. El principal objetivo de este avance era proporcionar un recubrimiento eficaz que pudiera proteger las heridas, facilitando su curación y previniendo infecciones.

Posteriormente, en la década de 1980, se realizaron investigaciones adicionales enfocadas en mejorar la naturaleza sintética de la piel artificial. Un ejemplo notable de este esfuerzo fue el trabajo realizado en la Universidad de California, Berkeley. En este período, los investigadores se concentraron en desarrollar piel artificial que no solo proporcionara protección y soporte a las heridas, sino que también imitara más de cerca las propiedades físicas y estéticas de la piel humana natural.

Estos avances iniciales en la creación de piel sintética sentaron las bases para desarrollos futuros en el campo, abriendo el camino para investigaciones más avanzadas que buscaron integrar tecnologías emergentes como la impresión en 3D y la robótica. La continua evolución de la piel artificial ha tenido un impacto significativo en la medicina reconstructiva y en la fabricación de prótesis, mejorando la calidad de vida de los pacientes y ofreciendo soluciones innovadoras a desafíos médicos complejos, (Roukes, 1988)

La evolución de los materiales utilizados para la piel artificial en prótesis ha sido notable, marcando importantes hitos en la investigación y desarrollo de tecnologías biomédicas. Durante la década de 1980, se logró un avance significativo con el uso de un polímero conocido como policaprolactona. Esta piel artificial se distinguió por su notable resistencia a altos grados de tensión y abrasión, cualidades que la hacían particularmente adecuada para aplicaciones protésicas.

Posteriormente, en 1990, se introdujo el uso del material Platsil, cuyo componente principal era el polivinilideno fluoruro. La piel sintética desarrollada a partir de este material se caracterizó por su habilidad para repeler agua y suciedad, lo que la hacía ideal para prótesis expuestas a uso frecuente y condiciones ambientales variadas. En los años recientes, Platsil

ha ganado popularidad y demanda en la creación de piel sintética para recubrir prótesis impresas en 3D, debido a sus propiedades únicas y su adaptabilidad a diversas aplicaciones.

Además de la innovación en materiales, el establecimiento de normativas y estándares internacionales ha jugado un papel crucial en la evolución de la tecnología protésica. Estas normativas, como la ISO 10328 y la ISO 22523, no solo establecen directrices para la evaluación estructural y los términos técnicos, sino que también garantizan la uniformidad en la calidad y seguridad de las prótesis en todo el mundo.

La ISO 10328, en particular, es un estándar que detalla métodos de prueba rigurosos para prótesis de extremidades inferiores, incluyendo cargas estáticas y dinámicas, lo que asegura que las prótesis puedan soportar el peso y el movimiento del usuario sin fallo mecánico. Esto es esencial no solo para la seguridad del usuario, sino también para su confianza en el uso del dispositivo.

Por otro lado, la ISO 22523 ofrece un marco de referencia para el entendimiento común y la comunicación en el sector de las prótesis y órtesis. Al proporcionar términos y definiciones claras, esta norma ayuda a los fabricantes, profesionales de la salud y usuarios a tener una comprensión uniforme de lo que pueden esperar de estos dispositivos médicos.

Estas normativas son fundamentales para mantener un alto nivel de calidad en la fabricación de prótesis. Aseguran que los dispositivos no solo sean funcionales y seguros, sino que también cumplan con las expectativas de los usuarios en términos de comodidad y estética. Además, contribuyen a la innovación continua en el sector, ya que los fabricantes deben adaptarse y mejorar constantemente para cumplir con estos estándares.

## **2.2. PROBLEMÁTICA**

La piel sintética desempeñó un papel crucial en la integración efectiva de las prótesis de mano. A pesar de que las tecnologías actuales habían avanzado considerablemente, se identificaron limitaciones significativas en aspectos relacionados con la apariencia y sensación de la piel sintética. Estas limitaciones se centraban específicamente en características como la flexibilidad y la durabilidad de las prótesis de mano. Se reconoció la necesidad de superar estos desafíos para mejorar la funcionalidad y la aceptación de las prótesis por parte de los usuarios.

Estas limitaciones no solo representan un obstáculo técnico. Como lo es en <<**An embedded artificial skin for humanoid**>>, que también tienen consecuencias profundas en el bienestar psicológico y social de los usuarios de prótesis. Este estudio se sumerge en la exploración crítica de estos desafíos, con un enfoque particular en la innovación de la piel sintética que no solo mejora la funcionalidad de las prótesis de mano, sino que también fomenta una integración más armoniosa y positiva para el usuario.

Un estudio crucial sobre la piel sintética integrada en una prótesis utilizada en humanos destacó las implicaciones emocionales y sociales de estas limitaciones. Para lograr una verdadera integración de las prótesis, es fundamental que la piel sintética no solo sea funcional, sino que reproduzca fielmente las características estéticas y táctiles de la piel humana. Esta necesidad se ve reflejada en trabajos como el del Dr. Robert Ledgard, quien, tras un trágico accidente que afectó a su esposa, se dedicó a crear una piel que pudiera haberla ayudado (Cannata, G, & Maggiali, 2018).

Una contribución significativa en este campo ha sido el diseño de articulaciones personalizadas para prótesis, las cuales ofrecen una mayor libertad de movimiento, imitando más de cerca la funcionalidad de una mano humana natural. Además, la integración de resistencias sensibles a la fuerza (FSR) para simular la presión táctil humana representa un avance crucial, ya que esta característica es vital para la interacción y percepción realista en el entorno cotidiano.

No obstante, el desarrollo de una piel sintética que reproduzca con exactitud la textura, el color, la temperatura y la respuesta táctil de la piel humana sigue siendo un desafío formidable. Lograr un equilibrio entre la durabilidad y la flexibilidad del material, manteniendo al mismo tiempo la funcionalidad y la comodidad para el usuario, es esencial. Esto es particularmente relevante en las prótesis de mano, donde el realismo táctil y estético tiene un impacto directo en la autoestima del usuario y en sus interacciones diarias, según lo documentado por (Cruz en 2020).

El objetivo central de este estudio es superar las limitaciones actuales asociadas con la piel sintética en las prótesis de mano. Se pone un énfasis especial en cómo la falta de realismo táctil y estético puede afectar negativamente la autoimagen y la aceptación social

de los usuarios. El desafío no solo radica en desarrollar una piel que sea funcional, sino también en lograr un nivel de adaptabilidad y estética que redefina las expectativas y estándares actuales en el campo de las prótesis.

En este contexto, se han explorado diversas metodologías y materiales, desde polímeros avanzados hasta tecnologías emergentes como la impresión 3D y la electrónica flexible. La investigación también ha incluido estudios sobre la percepción y la aceptación de los usuarios de prótesis, así como la colaboración con especialistas en dermatología y biomecánica para obtener un enfoque multidisciplinario. Estos esfuerzos conjuntos buscan no solo mejorar la funcionalidad y el realismo de las prótesis de mano, sino también abordar los aspectos psicológicos y sociales relacionados con su uso.

El trabajo presentado en este capítulo destaca el potencial transformador de estas innovaciones en la vida de las personas que requieren prótesis de mano, subrayando la importancia de una investigación continua y colaborativa para superar los obstáculos existentes y abrir nuevos horizontes en el diseño y fabricación de prótesis.

### **2.3. IMAGEN INTEGRADORA**

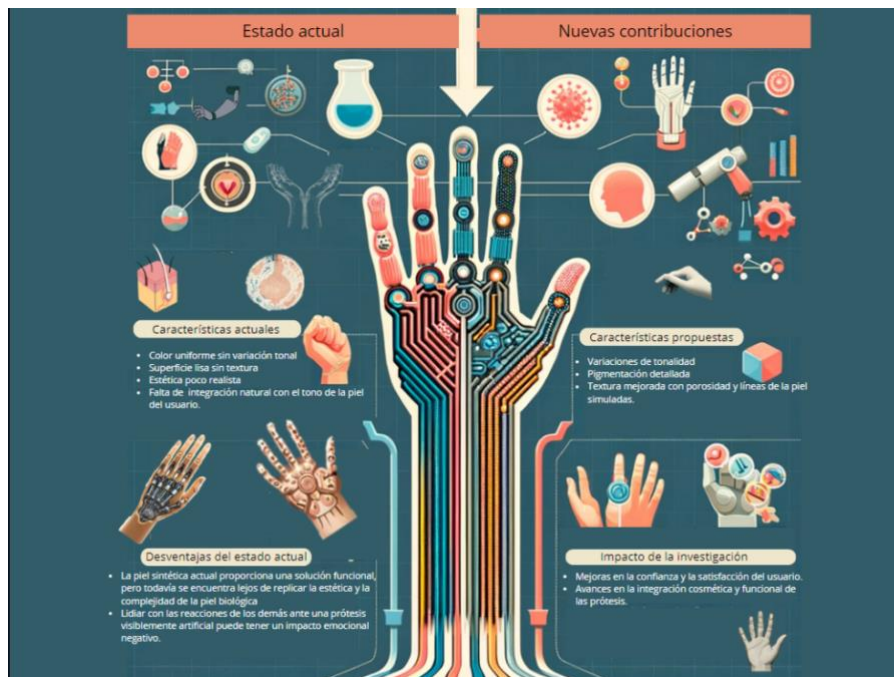
Se identificaron dos segmentos principales: el "Estado actual" de la piel sintética para prótesis de mano y las "Nuevas contribuciones" que la investigación actual busca aportar. (Ilustración 1).

En el lado izquierdo se ilustra y describe el contexto de la piel sintética en la actualidad. Se mencionan los logros hasta la fecha, como la atención en durabilidad y sensibilidad, y también se señalan las carencias estéticas que estas poseen al tener un color uniforme sin variación de tonalidad y una textura poco realista. Se resalta que las soluciones actuales priorizan la funcionalidad sobre la apariencia, resultando en una falta de integración natural con el tono de piel del usuario. Además, se listan desventajas como el impacto emocional de una prótesis visiblemente artificial.

Actualmente, la mayoría de las prótesis de mano cuentan con recubrimientos de piel sintética que, aunque tienen resistencia y elasticidad, aún carecen de la profundidad visual y textura de la piel natural. Tradicionalmente, estos recubrimientos presentan tonalidades uniformes que no capturan la variación sutil y las imperfecciones característicos de la piel

real, como las líneas finas, los poros, las huellas dactilares, y los matices de color causados por la circulación de la sangre.

En el lado derecho se enfoca la importancia estética y las mejoras propuestas por esta investigación. Se destaca la relevancia de una prótesis que imite con precisión la piel real para reconstruir la confianza y normalidad en la vida de los usuarios, favoreciendo una integración cómoda y una mejora en la autoestima. Las características propuestas incluyen variaciones de tonalidad, pigmentación detallada y una textura mejorada que simule porosidad y líneas finas de la piel. Se anticipa que el impacto de esta investigación avanzará la confianza y satisfacción del usuario, así como la integración cosmética y funcional de las prótesis.



**Ilustración 1. Imagen integradora.**

Fuente: Elaboración propia

## 2.4. TABLA DE LIMITACIONES

**Tabla 1. Limitaciones de estudio.**

Fuente: Elaboración propia

<b>AUTOR(ES)</b>	<b>PAÍS DE ESTUDIO</b>	<b>ENFOQUE DEL ESTUDIO</b>	<b>TIPO DE LIMITACIÓN</b>	<b>DETALLE DE LIMITACIÓN</b>
<b>Chen, M. S., et al., 2023</b>	China	Desarrollo experimental de una piel artificial integrada en una prótesis 3D	Funcionalidad	La piel artificial no pudo proporcionar la misma sensibilidad táctil que la piel natural.
<b>Lin, C.-Y., et al., 2023</b>	China	Diseño y evaluación de una prótesis artificial integrada en una prótesis 3d para la mejora de la comodidad y la ergonomía	Poca ergonomía	La prótesis era demasiado pesada y voluminosa para ser cómoda de usar.
<b>Zambrana, 2022</b>	España	Investigación sobre la transmisión de sensaciones táctiles.	Sensación Táctil	Las soluciones actuales no transmiten sensaciones táctiles de manera satisfactoria.
<b>Lopez &amp; Castillo, 2019</b>	Argentina	Desarrollo de materiales flexibles para prótesis.	Flexibilidad	Reto en equilibrar flexibilidad y durabilidad en piel sintética.
<b>Pérez &amp; Ramírez, 2018</b>	México	Análisis del aspecto visual de las prótesis con piel sintética.	Realismo Estético	Dificultad en lograr una apariencia similar a la piel humana.
<b>Osborn, et al., 2018</b>	Estados Unidos	Desarrollo de piel sintética integrado a extremidades protésicas.	Durabilidad y estética	Los materiales utilizados no resistieron el desgaste diario y no asemejaban a la apariencia de la piel real.

### **III. OBJETIVOS**

El presente capítulo está dedicado a presentar los objetivos que guían esta investigación en el ámbito del desarrollo de piel sintética y su integración con prototipos de prótesis de mano.

#### **3.1.OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar el desarrollo de piel sintética en un prototipo de prótesis de mano impresa en 3D para mejorar la estética y funcionalidad de la prótesis.

#### **3.2.OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Analizar las limitaciones actuales de las pieles sintéticas utilizadas en prótesis de mano, considerando aspectos estéticos y funcionales.
- Comparar el efecto que tienen las características físicas de la piel sintética en la efectividad de su adherencia a la prótesis de mano y su semejanza con la piel natural.
- Diseñar metodologías de integración de la piel sintética en prototipos de prótesis de mano impresas en 3D que aseguren una unión segura y una transición estética entre los componentes.
- Realizar ajustes y optimizaciones en el diseño y los materiales de la piel sintética basándose en los resultados de las pruebas.
- Optimizar la relación costo-efectividad en el desarrollo de piel sintética y prótesis de mano impresas en 3D, lograr un equilibrio entre el uso de materiales de alta calidad, como el Platsil FS-10 y pigmentos específicos para la coloración, y la eficiencia en el gasto, especialmente en la producción de prototipos impresos en 3D y en la utilización de yeso dental para moldes.

## **IV. METODOLOGÍA**

Este capítulo detalla el enfoque adoptado para abordar el desarrollo de piel sintética y su integración en prototipos de prótesis de mano impresa en 3D. En este segmento, se define con claridad el conjunto de variables de investigación y cómo estas serán operacionalizadas para permitir una medición y análisis precisos.

El método se escoge con el fin de alcanzar los objetivos de manera eficaz, permitiendo la replicabilidad y autenticación de los resultados. Se sintetiza el proceso investigativo en un flujo coherente, desde la conceptualización hasta la evaluación, y se ilustra visualmente para facilitar la comprensión integral del enfoque. Las métricas de evaluación seleccionadas son cruciales para determinar la efectividad y la aceptación del usuario del prototipo, cerrando la brecha entre la teoría y la aplicación práctica.

### **4.1.VARIABLE DE INVESTIGACIÓN**

En el estudio, una 'variable de investigación' fue definida como un concepto, característica, propiedad o factor que se examina y mide con el fin de entender su relación con otros fenómenos o variables. Estas variables, siendo constructos, atributos o características, estaban sujetas a variación.

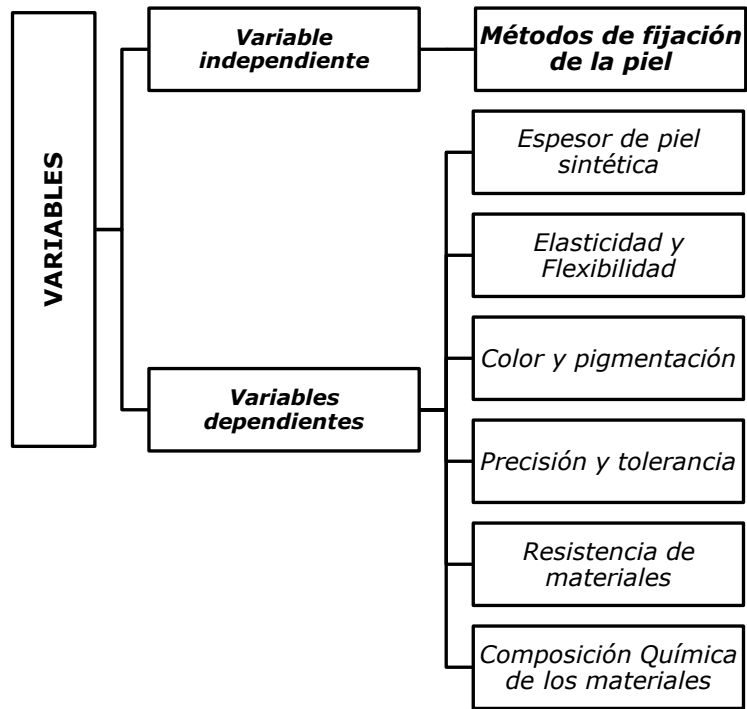
Dentro del marco de la investigación, se identificaron cinco variables dependientes, que se manipularon o controlaron activamente. Por otro lado, la variable independiente, fueron objeto de observación y medición para determinar el efecto o la influencia ejercida por las variables independientes. (Ilustración 2).

#### **4.1.1. VARIABLE INDEPENDIENTE**

- Métodos de fijación: Uno de los primeros métodos empleados fue el uso de adhesivos especializados. Estos adhesivos fueron seleccionados por su capacidad para formar un vínculo duradero entre la piel sintética y la base de la prótesis, sin comprometer la flexibilidad o la apariencia de la piel. La elección del adhesivo adecuado fue crucial, ya que necesitaba mantener su adherencia bajo las condiciones de uso cotidianas de la prótesis, incluyendo la exposición a variaciones de temperatura y humedad.

#### **4.1.2. VARIABLES DEPENDIENTES**

- Espesor de la piel sintética: La medición del grosor de la capa de piel sintética aplicada a la prótesis de mano.
- Textura superficial: se refiere a las características y propiedades físicas de la piel sintética (suavidad, rugosidad, realismo, etc.)
- Color y pigmentación: pruebas de color y pigmentación de la piel sintética para garantizar un realismo adecuado.
- Elasticidad y flexibilidad: La medición de la elasticidad y la flexibilidad de la piel sintética en relación a la piel humana.
- Precisión y tolerancias: Evaluar la precisión de la integración de la piel sintética en la prótesis en términos de tolerancias y ajuste.
- Resistencia de materiales: se refiere a las propiedades mecánicas y físicas de la piel sintética en respuesta a diversas situaciones ambientales.
- Composición química: Diversos componentes químicos o mezclas de material utilizados para el desarrollo de la piel. Dentro de los materiales más conocidos se encuentran, silicona, poliuretano, elastómeros termoplásticos, entre otros.



**Ilustración 2. Variables sintetizadas**

Fuente: Elaboración propia

### 4.1.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 2. Operacionalización de variables.

<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>
<p>Evaluar el desarrollo e integración de piel sintética en un prototipo de prótesis de mano impresa en 3D para mejorar la estética y funcionalidad de la prótesis.</p>	<p>Métodos de fijación de la piel.</p>	<p>Medición de grosor, propiedades táctiles, consistencia</p>	<p>Deformación elástica, resistencia de impacto.</p>	<p>Concentración de polímeros, plastificantes y/o aditivos.</p>
<b>OBJETIVO ESPECÍFICOS</b>	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>
<p>Analizar las limitaciones actuales de las pieles sintéticas utilizada en prótesis de mano, considerando aspectos estéticos y funcionales.</p>	<p>Textura superficial</p>	<p>Grado de similitud de la piel sintética en relación al realismo y funcionalidad de una piel natural.</p>	<p>Apariencia visual, comparación con referencia natural.</p>	<p>Detalles visuales y pruebas táctiles.</p>
<p>Diseñar metodologías de integración de la piel sintética en prototipos de prótesis de mano impresas en 3D que aseguren una unión segura y una transición estética entre los componentes</p>	<p>Métodos de fijación de la piel sintética.</p>	<p>Nuevos métodos y técnicas para la integración de la piel en la prótesis.</p>	<p>Adhesivos, termofijación, fijación por fusión</p>	<p>Tipo de adhesivo utilizado, tiempo de curado, temperatura y tiempo de fusión.</p>

<b>OBJETIVO ESPECÍFICOS</b>	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>
Realizar ajustes optimizaciones en el diseño y los materiales de la piel sintética basándose en los resultados de las pruebas.	Precisión tolerancias. Resistencia materiales	y de La producción continua de piel sintética en la que se mantenga un estándar con un rango de variabilidad permisible en el producto final.	Precisión en la fabricación, tolerancia propiedades mecánicas químicas.	en en y Porcentaje de tolerancia especificada, rango de resistencia y variación de composición química.
Comparar el efecto que tienen las características físicas de la piel sintética en la efectividad de su adherencia a la prótesis de mano y su semejanza con la piel natural.	Espesor de la piel, Textura de la piel, Color pigmentación, Elasticidad flexibilidad,	y y Aspectos y características físicas que se asemejan a la apariencia de una piel realista y natural.	Medición de grosor, propiedades táctiles, consistencia cromática, deformación elástica, resistencia de impacto.	Grosor de la piel, densidad de la piel, presencia de poros, líneas, arrugas, variación de colores, Tiempo de recuperación después de la deformación.

Fuente: Elaboración propia

## 4.2. OBJETIVO DEL MÉTODO

A continuación, se presenta la tabla metodológica (**Error! Reference source not found.**) que detalla los procesos de la investigación, el propósito de cada uno y los recursos, instrumentos o técnicas empleados para llevar a cabo el estudio.

**Tabla 3. Objetivo del método.**

<b>PROCESO</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>TÉCNICA O INSTRUMENTO</b>
<b>Prótesis 3D</b>	Diseño y modelado de prótesis	Crear un modelo digital de la prótesis de mano que se ajuste a un usuario y cumpla con los requisitos funcionales.	SolidWorks
	Impresión 3D de diseño de prótesis	Fabricar la prótesis de mano a partir del modelo digital utilizando técnicas de impresión 3D para obtener un prototipo físico.	Impresora Ender 3 V2
<b>Piel Sintética</b>	Revestimiento de la prótesis	Aplicar una capa de piel sintética sobre la prótesis de mano para mejorar la apariencia estética y la sensación táctil, imitando la textura y el color de la piel humana.	Silicona Líquida

Fuente: Elaboración propia

### **4.3. RESUMEN DEL PROCESO**

El El diseño y procedimiento del proyecto se estructuraron meticulosamente, con un enfoque primordial en el desarrollo de piel sintética y su integración en un prototipo de prótesis de mano impresa en 3D. La fase inicial del proyecto consistió en una investigación exhaustiva, centrada en examinar detalladamente los materiales y tecnologías relevantes en el ámbito de las prótesis y la impresión en 3D. Esta etapa preliminar fue crucial para establecer una base sólida para las fases subsiguientes del desarrollo.

Durante la fase de investigación, se realizaron procesos de selección minuciosos para identificar los materiales más apropiados para la fabricación de piel sintética. Los criterios clave en esta selección incluyeron la durabilidad, textura y capacidad de los materiales para replicar de manera realista la apariencia de la piel humana. Una vez finalizada esta fase de selección, se procedió a la etapa de desarrollo, donde se concretó la creación de prototipos de piel sintética utilizando los materiales elegidos.

Con el propósito de revestir la prótesis de mano con una capa de piel artificial que replicase con alta precisión la anatomía humana, se preparó una mezcla especial de yeso para la creación de un molde negativo. Este molde estaba destinado a capturar con exactitud la forma del prototipo de prótesis, siendo un paso crítico en el proceso de fabricación. La prótesis se sumergió en la mezcla de yeso, permitiéndole solidificar lo suficiente para capturar detalladamente la forma, incluyendo texturas finas como arrugas y poros, aspectos fundamentales para lograr una imitación realista de la piel humana.

Una vez solidificado el yeso, se extrajo cuidadosamente el prototipo para preservar la integridad del molde. A continuación, se preparó una mezcla de Platsil, seleccionado por sus propiedades de durabilidad y flexibilidad, y se vertió meticulosamente en el molde negativo. Este paso fue crucial para asegurar que cada detalle del molde se replicara fielmente en la piel sintética.

Después de aproximadamente 30 minutos, tiempo necesario para que la mezcla de Platsil se asentara y curara, se retiró el molde de yeso, revelando una cubierta de piel sintética que se adhería perfectamente a la prótesis y replicaba con asombrosa fidelidad la apariencia de una mano natural en términos de textura, color y detalles anatómicos.

Los prototipos creados fueron sometidos a una serie exhaustiva de pruebas y evaluaciones, enfocadas en determinar la calidad estética, la textura y la precisión en la replicación de detalles anatómicos humanos. Paralelamente, se avanzó en el diseño de un modelo de prótesis de mano, prestando especial atención a su compatibilidad con la piel sintética y su adaptación a la anatomía humana.

La fase de desarrollo se centró en lograr un acabado en la prótesis que asegurase una transición suave y visualmente armoniosa entre la prótesis y la piel sintética, buscando no solo una apariencia estética sino también una integración funcional efectiva. El proyecto culminó con éxito en la creación de una prótesis de mano que destacó tanto por su atractivo estético como por su capacidad para mejorar significativamente la calidad de vida de los usuarios, resaltando el impacto positivo de la innovación en prótesis en los aspectos prácticos y emocionales de la vida de los usuarios.

Los materiales que se utilizaron para el desarrollo del prototipo final son:

- Prótesis
  - Filamento TPU (Poliuretano Termoplástico)
- Piel sintética
  - Platsil FS-10
  - Diluyente
  - Pigmento de silicona
  - Polvo de colores (rojo, amarillo, café y blanco)

#### 4.4. IMAGEN DEL PROCESO

A continuación, se presenta de manera visual el proceso realizado para la ejecución de este proyecto (Ilustración 3).



**Ilustración 3. Imagen del proceso.**

Fuente: Elaboración propia.



**Ilustración 4. Imagen del proceso: Prueba y validación.**

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.5. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN**

- Comparación de Color

Se realizó una comparación del color de la piel sintética con el de la piel humana estándar y con muestras de piel de pacientes específicos utilizando un espectrofotómetro. Este método permitió calcular con precisión la diferencia de color. Además, se emplearon cartas de color estandarizadas, como las del Pantone Matching System (PMS), un sistema de color ampliamente reconocido y utilizado en campos como el diseño gráfico y la impresión, para determinar la coincidencia de color más cercana. También se hizo uso de aplicaciones y software especializados en la comparación y análisis de color, como ColorMunki Design, que facilitó la comparación de colores, el almacenamiento de paletas y la provisión de datos exactos sobre las diferencias cromáticas.

- Evaluación de textura

La realización de encuestas para determinar la percepción de realismo por parte de observadores que toquen y describan las sensaciones percibidas como suavidad, rugosidad, etc. para su posterior análisis.

- Pruebas de elasticidad y flexibilidad

Medición de la capacidad de estiramiento de la piel sintética y cómo se recupera después de ser estirada. Comparar con la elasticidad de la piel humana.

Se puede realizar un ensayo de rebote para medir la elasticidad de la muestra. Es crucial replicar las condiciones en las que se estará utilizando la prótesis. Las pruebas de resistencia a la flexión en las que se doblan o flexionan repetidamente los materiales para ver si muestran signos de fatiga o fallo.

- Pruebas de Adherencia

Las pruebas de adherencia constituyeron un componente crítico en la evaluación de la eficacia con la que la piel sintética se fijaba a las prótesis. Estas pruebas eran fundamentales para asegurar una unión adecuada entre los materiales, una consideración esencial cuando se trata de la adhesión de piel sintética a prótesis. El objetivo era determinar la durabilidad y longevidad de esta adhesión bajo diversas condiciones.

Se implementó un conjunto de pruebas meticulosas para evaluar la adherencia de los materiales. Una de estas pruebas fue la de cinta adhesiva, donde se aplicó cinta adhesiva sobre la piel sintética adherida a la prótesis y luego se retiró rápidamente. La eficacia de la adherencia se midió por la cantidad de material que quedaba adherido a la cinta o que se desprendía durante este proceso.

Además, se realizó una prueba de raspadura, en la que se deslizó una herramienta o punta sobre la superficie adherida para evaluar su resistencia a la abrasión y al desprendimiento. Esta prueba fue fundamental para simular el contacto con objetos y superficies que podrían encontrar en el uso diario.

- La prueba de flexión también formó parte de la evaluación, donde se flexionaba el material adherido para verificar si la adhesión permanecía intacta o mostraba signos de fallo. Esta prueba era esencial para simular los movimientos naturales de la mano y dedos en una prótesis.
- La resistencia de la adherencia bajo condiciones de impacto se evaluó mediante una prueba de impacto. Esta prueba ayudó a determinar cómo la adherencia resistiría golpes o caídas accidentales.

Finalmente, se llevó a cabo una prueba de inmersión, sumergiendo la interfaz adherida en un líquido para observar si se producía alguna pérdida de adherencia tras la inmersión, simulando así la exposición a la humedad o a líquidos.

Paralelamente a estas pruebas de adherencia, se realizaron evaluaciones de durabilidad y resistencia de la piel sintética. Se sometió al material a condiciones que simulaban el uso diario, incluyendo roce constante, inmersión prolongada en agua y exposición a la radiación ultravioleta solar. Estas pruebas eran cruciales para determinar la robustez y longevidad del material en el contexto de su aplicación en prótesis.

Para evaluar la resistencia a la abrasión, se emplearon materiales abrasivos como el papel de lija, proporcionando una indicación clara de cómo la piel sintética podría resistir el desgaste por fricción en situaciones prácticas. Estos procedimientos ofrecieron información valiosa sobre la durabilidad superficial y la capacidad del material para mantener su integridad y apariencia a lo largo del tiempo.

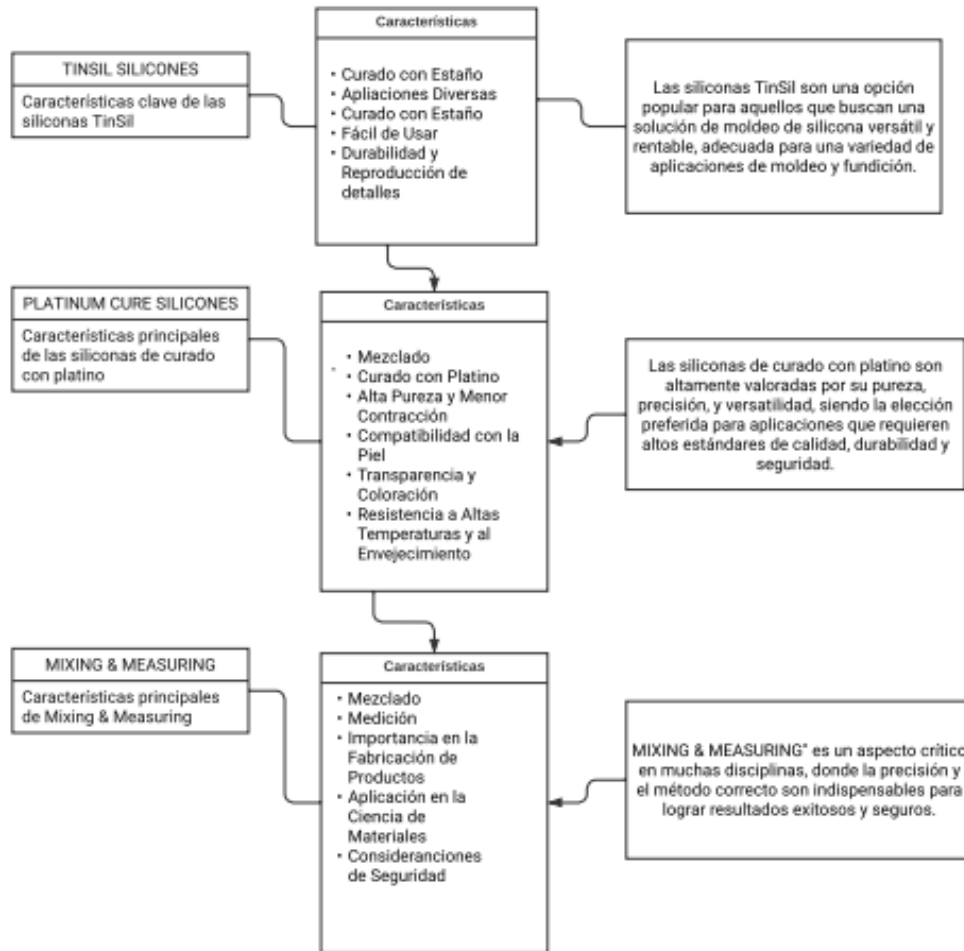
- Pruebas de resistencia al agua y a la humedad jugaron un papel crucial en la evaluación de la piel sintética utilizada en las prótesis. Se sumergieron las prótesis revestidas con la piel sintética en agua y se expusieron a entornos de alta humedad para simular condiciones que podrían encontrarse en la vida cotidiana. Estos experimentos fueron esenciales para entender cómo el material reaccionaría ante la exposición prolongada a líquidos, evaluando aspectos como la susceptibilidad a la corrosión, la hinchazón, y otras formas de degradación relacionadas con la humedad.

Los resultados obtenidos de estas evaluaciones ofrecieron un entendimiento exhaustivo de las propiedades y limitaciones de la piel sintética. Se identificaron áreas de potencial así como oportunidades de mejora, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de los biomateriales. Esta investigación contribuye significativamente al avance del conocimiento en la fabricación de prótesis, promoviendo la creación de dispositivos más eficientes, duraderos y adaptados a las necesidades reales de los usuarios. El enfoque integral de estas pruebas garantiza no solo la funcionalidad de las prótesis en un entorno controlado, sino también su eficacia y durabilidad en situaciones de la vida real, marcando un avance significativo en la mejora de la calidad de vida de los usuarios de prótesis.

## **V. RESULTADOS**

En el capítulo presente, se exponen los hallazgos logrados mediante la investigación conducida en el ámbito del desarrollo de piel sintética y su aplicación en prototipos de prótesis de mano fabricados mediante impresión 3D. Se realizó una evaluación exhaustiva de las restricciones vigentes y las posibles innovaciones en el sector de las prótesis. Esto incluyó un análisis meticuloso de las propiedades físicas inherentes a la piel sintética, así como la implementación de métodos vanguardistas orientados a mejorar su adhesión y apariencia estética.

## 5.1 SELECCIÓN DE POLÍMERO PARA PIEL SINTÉTICA



**Ilustración 5. Características de Silicona.**

Fuente: Elaboración Propia.

En la (Ilustración 5), se presentan tres variedades de polímeros, evaluados cuidadosamente para seleccionar el más apropiado para el desarrollo del proyecto. (Ilustración 6) Dentro del espectro de materiales utilizados para aplicaciones de moldeo, las siliconas TinSil ocupan un lugar destacado, particularmente en contextos donde la versatilidad y la economía son prioritarias. Estas siliconas, que forman parte de la categoría de gomas de silicona de curado por condensación, son conocidas por su capacidad para endurecerse a temperatura ambiente mediante una reacción química catalizada por el estaño.

En el curso de la investigación, se observó que las TinSil Silicones presentaban características que las hacían especialmente adecuadas para una amplia gama de

aplicaciones prácticas. Entre estas, se destacó su capacidad para replicar detalles con gran fidelidad, lo que es esencial en la creación de moldes de alta precisión. Además, su resistencia al desgarro y su durabilidad extendida se evaluaron como atributos significativos para su uso continuado en la producción de moldes y piezas replicadas.

La facilidad de uso de las TinSil Silicones también se examinó detenidamente. Estas gomas de silicona suelen presentar proporciones de mezcla sencillas, lo que facilita su preparación y aplicación incluso para usuarios menos experimentados. Asimismo, los tiempos de trabajo y de curado pueden ajustarse para satisfacer las demandas específicas de cada proyecto, lo que las hace altamente adaptables a diversos entornos y procesos de trabajo.

Se estableció que el proceso de curado por condensación de las TinSil Silicones, aunque menos costoso, podría ser más susceptible a la inhibición por ciertos materiales en comparación con las siliconas de curado con platino. Sin embargo, la elección entre las dos tipologías de siliconas depende de una evaluación cuidadosa de las necesidades y las condiciones específicas de cada aplicación.

En la investigación realizada, se determinó que las Siliconas TinSil representaron una solución eficaz y práctica para aquellos en la industria del moldeo que buscaron un balance entre calidad, durabilidad y rentabilidad. Su uso se extendió desde la fundición artística y la fabricación de prototipos hasta la restauración arquitectónica y la creación de efectos especiales. Esto demostró su relevancia y versatilidad en diversas disciplinas que requirieron la creación de moldes y la replicación de piezas con detalles precisos.

Se encontró que las siliconas de curado con platino, también conocidas como siliconas de adición, eran un tipo de polímeros de silicona que se curaron a temperatura ambiente utilizando un catalizador a base de platino. Este método de curado se distinguió del curado por condensación típico de las siliconas catalizadas por estaño, proporcionando ciertas ventajas inherentes que resultaron críticas en aplicaciones de precisión y rendimiento.

Se identificó que las siliconas de curado con platino exhiben una pureza química superior y una contracción mínima durante el proceso de curado. Estas características las

hacen particularmente valiosas en la fabricación de moldes de alta fidelidad y en aplicaciones donde se requiere una reproducción exacta de detalles finos y complejos.

Desde la perspectiva de la compatibilidad biológica, estas siliconas son notablemente estables y seguras para el contacto prolongado con la piel humana, lo que las hace idóneas para su uso en la industria médica, la fabricación de prótesis y aplicaciones de contacto con alimentos. Su transparencia y capacidad para ser teñidas permiten una amplia gama de aplicaciones estéticas, desde efectos especiales hasta componentes visuales en dispositivos tecnológicos.

La resistencia de las siliconas de curado con platino a las altas temperaturas y al envejecimiento ambiental fue también un punto de interés en la investigación, demostrando su potencial para aplicaciones en entornos adversos y exigentes. Este tipo de silicona mantiene sus propiedades mecánicas y estéticas durante un período prolongado, lo que es esencial en la fabricación de componentes duraderos y de larga duración.

Por lo tanto, las siliconas de curado con platino son preferidas en aplicaciones de alta tecnología y en sectores donde se requieren materiales de alto rendimiento. Su versatilidad, junto con su perfil de seguridad y durabilidad, las convierte en una elección óptima para los ingenieros y diseñadores que buscan materiales innovadores para superar los desafíos de la moderna ingeniería de materiales y la fabricación de productos.

"Mezcla y Medición" fue un proceso fundamental en diversas disciplinas científicas y técnicas, involucrando la combinación y proporción exacta de componentes para formar una solución homogénea o lograr una reacción química deseada. Este proceso resultó esencial en laboratorios de química, farmacología, bioquímica, y en la industria de fabricación, donde se requería la creación precisa de compuestos y mezclas.

En el ámbito de la ciencia de materiales, se observó que la mezcla precisa de los dos componentes de la silicona de curado con platino fue crítica para alcanzar las propiedades finales óptimas del producto. La exactitud en la medición de cada componente, comúnmente en una proporción de 1:1, resultó esencial para asegurar que la mezcla curara adecuadamente y manifestara la durabilidad, flexibilidad y otras propiedades físicas deseadas.

El proceso de mezclado implicó no solo la combinación física de los componentes sino también la prevención de la formación de burbujas de aire o la segregación de materiales, factores que podrían afectar negativamente la calidad del producto final. La medición precisa se encargó de garantizar que las cantidades de cada componente se adhirieran a la fórmula o especificaciones del producto. Esta práctica requirió el uso de instrumentos calibrados y técnicas exactas de medición de volumen o peso.

El método correcto de Mixing & Measuring es vital para la replicabilidad de experimentos y la validación de resultados. Las medidas incorrectas o las técnicas de mezcla inadecuadas pueden conducir a resultados erróneos o productos defectuosos, resaltando la importancia de este proceso en la investigación y desarrollo de nuevos materiales y productos.

Se identificó que "Mezcla y Medición" había sido una habilidad técnica esencial en la ciencia y la ingeniería, la cual garantizó la estandarización y calidad en la producción de materiales. Este proceso se estableció como una etapa crucial en la cadena de desarrollo de productos químicos y materiales avanzados. (Ilustración 6).

En el ámbito de la ingeniería biomédica, el desarrollo de piel sintética para prótesis de mano implicó la utilización del polímero PlatSil FS-10, una silicona de curado con platino reconocida por su composición y características avanzadas. Esta silicona se caracteriza por dos componentes primordiales, el Componente A, compuesto principalmente por Polidimetilsiloxano (PDMS), y el Componente B, un catalizador a base de platino.

El Componente A, esencialmente PDMS, se estableció como la base de la silicona, otorgando al material una notable flexibilidad y resistencia, propiedades fundamentales para simular las cualidades biomecánicas de la piel humana. A nivel molecular, la estructura del PDMS proporciona una gran estabilidad térmica y química, además de una superficie no reactiva, lo que se traduce en una excelente compatibilidad con la piel humana y resistencia al desgaste y a agentes externos.

Por otro lado, el Componente B desempeñó un papel crítico en el proceso de vulcanización, al interactuar con el Componente A para iniciar el curado de la silicona. La actividad de este catalizador a base de platino fue meticulosamente calibrada para permitir

un control preciso sobre la velocidad de curado, lo que es crucial para la integridad estructural y el rendimiento del material.



**Ilustración 6. Tipos de Silicona.**

Fuente: Elaboración propia

La investigación reveló que el PlatSil FS-10, al curarse, replicaba con alta fidelidad las propiedades estéticas y táctiles de la piel humana, lo que incluye la elasticidad, la suavidad y el color. Estos hallazgos se sustentaron en pruebas exhaustivas que evaluaron la adherencia, la durabilidad y la sensación táctil del material, así como su comportamiento bajo diversas condiciones ambientales.

Además, se destacó la versatilidad del PlatSil FS-10, que se ha posicionado como una opción predilecta en la manufactura de prótesis debido a su capacidad para emular con precisión las características de la piel natural. Los resultados experimentales indicaron que PlatSil FS-10 podría ofrecer una solución viable y de vanguardia para superar los desafíos presentes en la creación de prótesis más realistas y funcionales.

La utilización de PlatSil FS-10 en la creación de piel sintética para prótesis de mano refleja un paso significativo en la búsqueda de mejorar la calidad de vida de los usuarios de prótesis, proporcionando una alternativa más natural y cómoda en comparación con las

soluciones existentes en el mercado. Este avance representa un ejemplo ilustrativo del impacto positivo de la ingeniería de materiales y la síntesis de polímeros en la medicina regenerativa y la tecnología protésica.

**Tabla 4. Características del Platsil FS-10.**

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
<b>Flexibilidad y elasticidad</b>	El PlatSil se caracteriza por formar un material cuyas propiedades de flexibilidad y elasticidad son relevantes, mostrando una similitud considerable con la textura y comportamiento mecánico de la piel humana.
<b>Durabilidad</b>	Demuestra una alta resistencia a desgarramientos y desgaste, además de soportar bien diversos factores ambientales. Esto se traduce en una mayor longevidad del material, asegurando su durabilidad y eficacia a lo largo del tiempo.
<b>Versatilidad en la coloración</b>	La composición de este material permite su coloración mediante el uso de pigmentos de silicona o polvo Flock, ofreciendo así una extensa variedad de tonalidades que imitan con precisión los diversos tonos de la piel humana.
<b>Detalle fino</b>	Este material tiene la capacidad de capturar y replicar detalles precisos y finos, facilitando así la creación de una apariencia de piel que se asemeja estrechamente a la piel humana real.
<b>Tiempo de trabajo ajustable</b>	La formulación de PlatSil y la selección de sus componentes determinan la variabilidad en los tiempos de trabajo, lo que facilita la moldeabilidad y manipulación del material para una adaptación eficiente en la creación de piel.

Fuente: elaboración propia.

Las características mencionadas en la (Tabla 4) se derivan de la composición química específica del material, reflejando sus propiedades físicas y químicas. Las propiedades físicas son aquellas características que permiten comprender el comportamiento del material en diferentes condiciones y entornos. Algunas de las propiedades físicas más comunes:

**Tabla 5. Propiedades del Platsil FS-10**

Propiedades Físicas y químicas	
<b>Proporción de mezcla</b>	1A:1B
<b>Dureza Shore</b>	OO60/A13
<b>Tiempo de desmolde</b>	25 mins*
<b>Color curado</b>	Blanco lechoso (sin ningún pigmento)
<b>Viscosidad mixta (CP)</b>	4,200
<b>Volumen específico (pulg<sup>3</sup>/lb)</b>	24.9
<b>Gravedad específica</b>	1.11
<b>Alargamiento (%)</b>	679
<b>Resistencia a la tracción (psi)</b>	488
<b>Resistencia al desgarro</b>	157.9
<b>Solubilidad</b>	Insoluble en el agua
<b>Densidad relativa</b>	1,10
<b>Puntos de inflamación</b>	>150° C (302 °F)
<b>Reactividad</b>	No

Fuente: (Polytek Corp, 2018).

En un estudio exhaustivo sobre un material de silicona específico, se evaluaron meticulosamente sus propiedades físicas y químicas para determinar su aplicabilidad en aplicaciones médicas e industriales, resultando en una tabla que detalla características clave: la proporción de mezcla requerida de 1A:1B, una dureza Shore de OO60/A13 que indica flexibilidad, un tiempo de desmolde de 25 minutos, un color curado blanco lechoso sin pigmentos adicionales, una viscosidad mixta de 4,200 CP, un volumen específico de 24.9 pulgadas cúbicas por libra y una gravedad específica de 1.11. El material mostró una notable elasticidad con un alargamiento del 679% y una resistencia a la tensión de 488 psi, además de una resistencia al desgarro de 157.9, siendo insoluble en agua y con una densidad relativa de 1,10. El punto de inflamación del material supera los 150° C, lo cual, junto con su falta de reactividad, aumenta su seguridad en diversas aplicaciones, lo que sugiere su idoneidad para sectores donde la durabilidad, flexibilidad y estabilidad son cruciales (Tabla 5).

**Tabla 6. Información Toxicológica del Platsil FS-10**

Propiedades Tóxicas	
<b>Contacto en el ojo</b>	Puede causar irritación leve
<b>Contacto en la piel</b>	Puede causar irritación leve, especialmente en las membranas mucosas

<b>Inhalación</b>	Los vapores o neblinas pueden causar irritación respiratoria leve
<b>Ingestión</b>	No hay datos disponibles.
<b>Efectos crónicos en la salud</b>	Ninguno conocido
<b>Valores de toxicidad aguda</b>	No hay datos disponibles.
<b>Mutagenicidad en células germinales</b>	Los componentes no son conocidos como mutágenos
<b>Carcinogenicidad</b>	Los componentes relevantes no están listados como carcinógenos conocidos o sospechosos por NTP, IARC o OSHA
<b>Toxicidad reproductiva</b>	Los componentes relevantes no son conocidos o sospechados como tóxicos reproductivos
<b>Toxicidad específica de órganos diana</b>	Los componentes relevantes no son conocidos o sospechados como tóxicos para órganos diana específicos.

Fuente: (Polytek Corp, 2018).

En la (Tabla 6) se sintetizan las propiedades toxicológicas del Platsil FS-10, a partir del cual se concluyó que el contacto con los ojos y la piel podría resultar en irritación leve, siendo esta última particularmente notable en las membranas mucosas. La inhalación de vapores o neblinas se asoció con una irritación respiratoria leve, mientras que para la ingestión no se disponía de datos. Desde una perspectiva de efectos a largo plazo, no se identificaron efectos crónicos conocidos en la salud, ni datos disponibles sobre la toxicidad aguda. En cuanto a la mutagenicidad en células germinales, se determinó que los componentes no eran mutágenos conocidos. Respecto a la carcinogenicidad y la toxicidad reproductiva, los componentes relevantes no estaban catalogados como carcinógenos o tóxicos reproductivos conocidos o sospechados por organizaciones como NTP, IARC o OSHA. Además, se estableció que no eran tóxicos para órganos diana específicos, lo que sugiere un perfil de seguridad favorable para el material en cuestión (Tabla 6)

## 5.2 DISEÑO Y PROTOTIPADO DE PRÓTESIS DE MANO

La creación del diseño de la prótesis de mano se realizó mediante el empleo de SolidWorks, una aplicación de ingeniería asistida por computadora para modelado 3D. Se aprovecharon funciones de alta complejidad que permiten la escalabilidad y el dimensionamiento preciso del diseño. Con este software, se alcanzó la elaboración de un prototipo detallado que abarca la mano completa hasta la muñeca. SolidWorks posibilitó la

integración detallada de características anatómicas y mecánicas, mejorando significativamente la calidad y la funcionalidad del modelo 3D.

A continuación, se exhibe el diseño de la mano protésica diseñada en SolidWorks, la cual será impresa en 3D y posteriormente revestida con piel sintética.



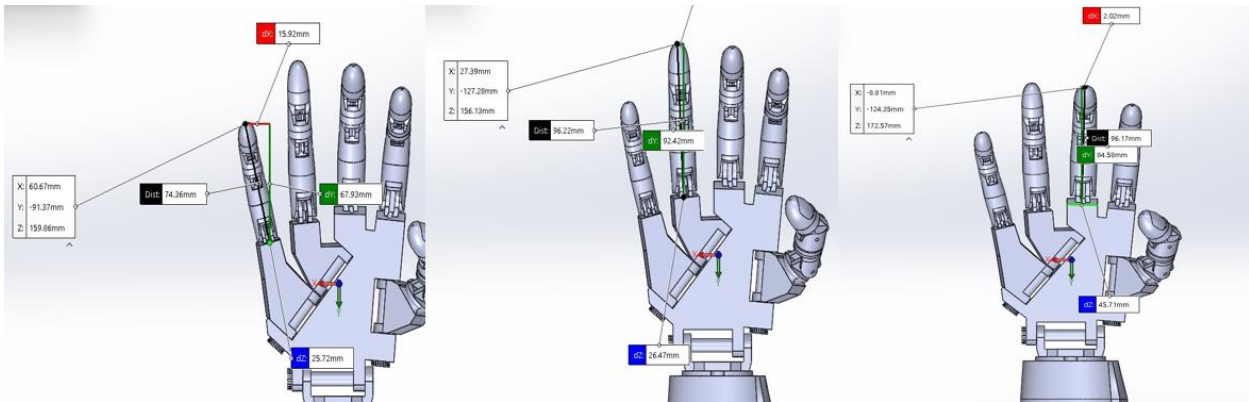
**Ilustración 7. Modelado de mano en SolidWorks.**

Fuente: elaboración propia.

En el proceso de desarrollo de la prótesis de mano, se implementó un riguroso procedimiento de medición en una mano humana real para garantizar que el modelado en 3D que se visualiza en la (Ilustración 7) que mantuviera proporciones realistas y a escala. Este enfoque metódico implicó la recopilación detallada de medidas anatómicas, incluyendo la longitud de los dedos, la amplitud de la palma, y otros parámetros críticos. Estas mediciones se utilizaron como referencia clave para dimensionar de manera precisa la prótesis dentro del software de diseño, asegurando así una representación fiel de la anatomía humana.

La exactitud en el modelado 3D de la prótesis de mano fue reconocida como un factor crucial en el proyecto. Un diseño basado en mediciones precisas de una mano real se consideró esencial para lograr varios objetivos clave. En primer lugar, esta precisión aseguró ergonomía en la prótesis, lo que es fundamental para la comodidad del usuario durante su uso prolongado. En segundo lugar, se garantizó la funcionalidad del dispositivo, permitiendo que la prótesis replicara los movimientos naturales de la mano. Por último, se logró una estética agradable, un aspecto esencial para la aceptación y la satisfacción del usuario con la prótesis.

el proceso de medición detallada y el modelado 3D preciso se convirtieron en piedras angulares en el desarrollo de la prótesis de mano. Estos pasos no solo contribuyeron a la creación de un dispositivo que imita fielmente la mano humana en forma y función, sino que también aseguraron una experiencia de usuario optimizada, marcando un avance significativo en el campo de las prótesis personalizadas y tecnológicamente avanzadas.



**Ilustración 8. Medición de dedo meñique, anular y medio.**

Fuente: elaboración propia.

En el campo de la ingeniería de rehabilitación, se efectuó un exhaustivo estudio de diseño para la creación de una prótesis de mano que imitara con precisión la anatomía humana. Utilizando software avanzado de modelado en 3D, los investigadores pudieron articular un prototipo de prótesis cuyo diseño replicaba meticulosamente las falanges y articulaciones de una mano real. (Ilustración 8).

En la concepción de cada dedo de la prótesis, excepto el pulgar, se implementó un diseño tripartito que emulaba las falanges primarias, secundarias y terciarias. Este enfoque se ajustaba a la estructura ósea de los dedos humanos, permitiendo una simulación más realista del movimiento y la flexibilidad. El pulgar, en conformidad con su configuración anatómica única, se diseñó con dos falanges, diferenciándose así de los otros dedos y permitiendo una mayor autenticidad en la recreación de su movimiento particular.

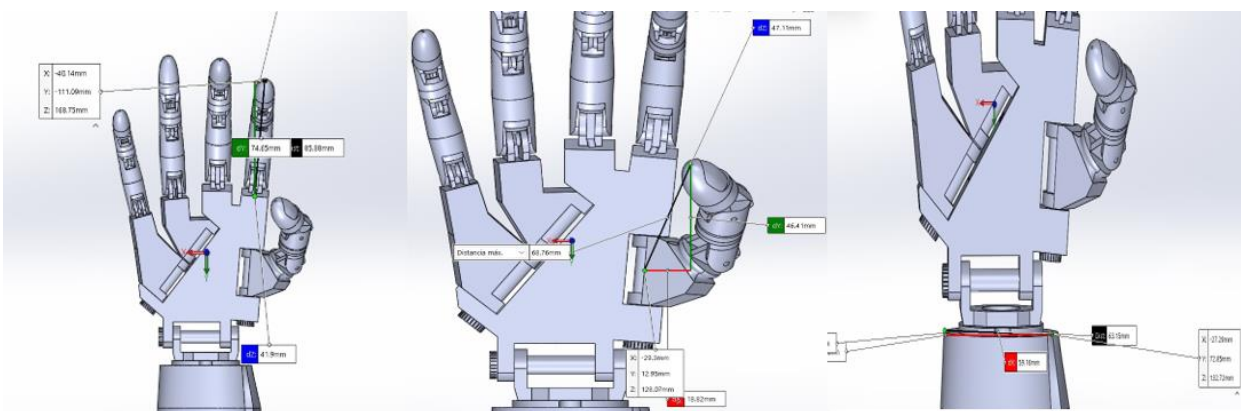
La integración detallada de las articulaciones interfalángicas distales y proximales, junto con la metacarpofalángica, se realizó con una precisión sin precedentes. Estos componentes articulares fueron esenciales para conferir a la prótesis un espectro completo

de movimientos naturales, desde la flexión hasta la extensión y la abducción. La exactitud en la recreación de estos elementos anatómicos resultó vital para el logro de una prótesis que no solo se alinearía estéticamente con la extremidad humana sino que también proporcionara una funcionalidad comparativa.

Además, el estudio se centró en garantizar que la prótesis mantuviera un nivel de movilidad funcional óptimo incluso tras el revestimiento con la piel sintética. Se evaluaron diversos materiales para asegurar que la cobertura de la prótesis no impidiera la movilidad ni comprometiera la durabilidad. La piel sintética seleccionada necesitaba ser lo suficientemente flexible para permitir los movimientos articulares y al mismo tiempo lo suficientemente resistente para soportar el desgaste diario.

La investigación culminó con la creación de una prótesis de mano que no solo evidenciaba una fidelidad visual con la mano humana sino que también replicaba la funcionalidad hasta en los gestos más sutiles. Este avance significativo en la tecnología protésica demostró un profundo entendimiento de la biomecánica humana y abrió nuevas posibilidades para la personalización de prótesis, mejorando así la calidad de vida y la integración social de los usuarios de prótesis.

La precisión en la representación de estas estructuras anatómicas complejas reflejó un enfoque meticuloso en el diseño de la prótesis, subrayando la importancia de un modelo anatómicamente preciso para la efectividad y el realismo del dispositivo protésico final.



**Ilustración 9. Medición de dedo índice, pulgar y muñeca.**

Fuente: elaboración propia.

En la (Ilustración 9) se exhibieron tres vistas de un modelo en 3D de una mano protésica diseñada mediante un software CAD. La primera vista, a la izquierda, mostraba la mano en una perspectiva lateral con anotaciones detalladas de las dimensiones, incluyendo la longitud y separación de los dedos. La vista central proporcionaba una perspectiva superior, enfocándose en la disposición y la anchura de los dedos. Finalmente, la vista derecha ofrecía otra perspectiva lateral, centrándose en la muñeca y mostrando la anchura de la base de la mano.

Las anotaciones dimensionales eran esenciales para establecer la escala y las proporciones de la prótesis y para la precisa fabricación de sus componentes. Estas vistas gráficas servían como paso de validación en la fase de diseño, asegurando la viabilidad de las proporciones y la funcionalidad del modelo antes de avanzar a la fase de producción mediante impresión 3D. Las líneas y cifras indicaban mediciones específicas, mientras que los diferentes colores podían representar distintos componentes o áreas clave para la articulación o el ensamblaje del prototipo.

### **5.3 CÁLCULO DE VOLUMEN DE LA PIEL SOBRE LA PRÓTESIS EN SOLIDWORKS**

Se llevaron a cabo dos diseños de prótesis de mano, los cuales fueron modelados meticulosamente utilizando el software SolidWorks. Cada uno de estos modelos se caracterizaba por diferencias en su tamaño, lo que implicaba variaciones significativas en los parámetros físicos de las prótesis, como la masa y la densidad de la piel sintética.

Los diseños se desarrollaron con el objetivo de explorar cómo las variaciones en tamaño afectaban las propiedades físicas y la funcionalidad de las prótesis. Para cada modelo, se realizaron cálculos detallados de la masa y la densidad, teniendo en cuenta las diferencias dimensionales. Estos cálculos fueron esenciales para garantizar que las prótesis mantuvieran no solo su integridad estructural y estética, sino también su funcionalidad y confort para el usuario.

Además, se consideraron aspectos críticos como la distribución de la masa y el equilibrio de la densidad en la piel sintética, factores que son fundamentales para la experiencia del usuario final. El proceso de modelado en SolidWorks permitió una

visualización precisa y una evaluación detallada de estos aspectos, facilitando así la optimización de los diseños para su producción.

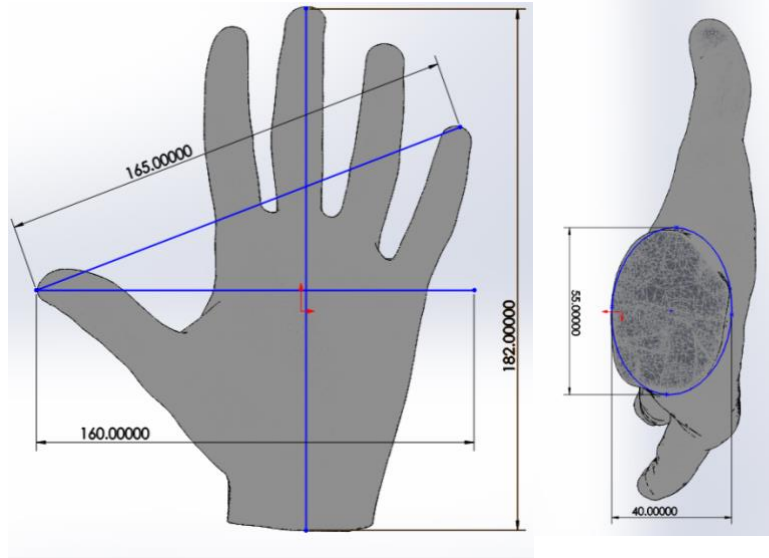
El uso de SolidWorks como herramienta de modelado ofreció la ventaja de poder realizar ajustes iterativos en el diseño, permitiendo una exploración exhaustiva de diversas configuraciones. Este enfoque iterativo aseguró que se alcanzaran los objetivos de diseño, tanto en términos de especificaciones técnicas como de requisitos ergonómicos y estéticos.

A continuación, se presentan datos detallados sobre las dimensiones del modelo de la mano (Ilustración 10),(Ilustración 11), así como información crítica sobre la masa, el volumen, el área superficial, la ubicación del centro de masa y los momentos de inercia, todos elementos esenciales para el modelado preciso de la prótesis. (

Tabla 7),(**Error! Reference source not found.**).

- Masa: indica el peso estimado del modelo si fuera fabricado con los materiales definidos.
- Volumen: indica la cantidad de material necesario para la fabricación del prototipo.
- Área de superficie: indica el área total que necesitaría recubrimiento con la piel sintética.
- Centro de masa: indica distribución de peso y el equilibrio del modelado.

#### **5.1.1. Muestra A:**



**Ilustración 10. Modelado en SolidWorks de muestra A.**

Se llevó a cabo la evaluación de un prototipo de prótesis de mano mediante el uso de técnicas de modelado en 3D. Se realizó un análisis dimensional detallado del prototipo, que se muestra en la imagen proporcionada, para asegurar la precisión y la proporcionalidad del diseño.

La figura ilustra dos vistas del modelo: una vista lateral y una vista superior de la prótesis de mano. Las dimensiones clave, marcadas en la imagen, fueron esenciales para el proceso de evaluación. La longitud total de la prótesis, desde la base de la palma hasta la punta del dedo medio, se midió en 182.0000 mm. La anchura, que se extiende a través de la palma desde el pulgar hasta el borde exterior de la mano, se registró en 165.0000 mm. La anchura a nivel de la muñeca fue de 40.0000 mm, lo que proporciona una referencia para la escala y el punto de articulación con el brazo del usuario.

El análisis también incluyó la identificación de la ubicación del centro de la prótesis, marcado con un punto rojo en la imagen, que es vital para el equilibrio y el control de la prótesis durante su uso. Además, la profundidad de la palma se detalló en una sección transversal, como se observa en el círculo de la vista superior, para evaluar la concavidad de la prótesis y su capacidad para acomodar los componentes internos, como la estructura ósea artificial y la mecánica de la articulación.

Este procedimiento meticuloso de medición y diseño se llevó a cabo para garantizar que la prótesis no solo tuviera una apariencia estéticamente agradable y anatómicamente

correcta, sino que también proporcionara funcionalidad y comodidad al usuario. Los resultados de este análisis contribuyeron al desarrollo de una prótesis de mano que promete mejorar la interacción y la experiencia del usuario en su vida diaria.

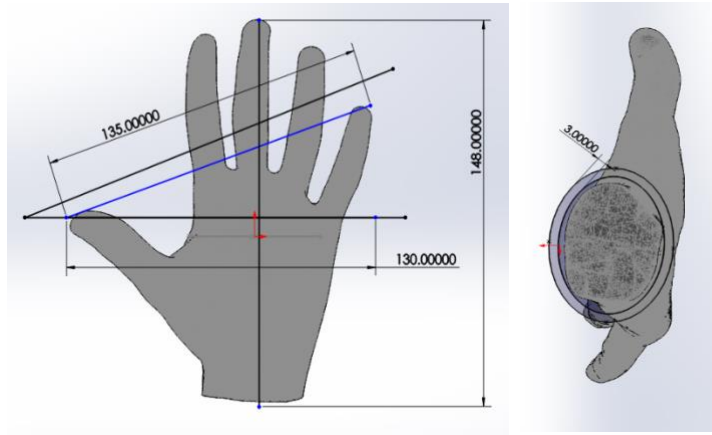
En el transcurso de una investigación precedente, se efectuó un análisis detallado de un prototipo de prótesis de mano a través de representaciones gráficas precisas. La imagen suministrada documenta dos perspectivas esenciales: una vista lateral y una vista de planta de la prótesis.

Desde la perspectiva lateral, se midió la longitud desde la base de la palma hasta la cima del dedo medio, resultando en una dimensión de 148.0000 mm. La anchura de la palma, que abarca desde el dedo meñique hasta el borde del pulgar, se cuantificó en 135.0000 mm, mientras que la medida a lo largo de la muñeca se determinó en 130.0000 mm, estableciendo así las dimensiones cruciales para la ergonomía y el ajuste de la prótesis.

La vista de planta reveló un análisis transversal de la prótesis, destacando la circunferencia interna marcada por un círculo. La posición del centro de gravedad de la prótesis se indicó con un punto rojo, un dato vital para el equilibrio y la funcionalidad del dispositivo. Este punto central juega un papel importante en el diseño de la prótesis, ya que afecta la distribución del peso y la facilidad de uso general.

El estudio meticulosamente documentó estas mediciones para asegurar una reproducción exacta de las proporciones humanas en el diseño de la prótesis. La precisión alcanzada en este modelo es indicativa del rigor y la atención al detalle que caracterizan la ingeniería moderna de prótesis, y subraya la importancia de tales evaluaciones en la creación de dispositivos que no solo emulan la forma humana sino que también ofrecen funcionalidad y comodidad óptimas para el usuario. Estos resultados han contribuido significativamente al cuerpo de conocimiento en el campo de la bioingeniería de prótesis y han proporcionado una base para futuras innovaciones en el diseño de prótesis más avanzadas y personalizadas.

### 5.1.2. Muestra B:



**Ilustración 11. Modelado en SolidWorks de muestra B.**

Fuente: Elaboración propia.

Se presenta un diseño gráfico detallado de la prótesis de mano. Las dimensiones mostradas en reflejan las medidas reales observadas en la vista de diseño, lo cual fue fundamental para realizar estimaciones precisas de la masa y densidad del prototipo. Esta precisión resultó crucial, especialmente en aplicaciones que demandan un alto grado de exactitud, como es el caso en el desarrollo de prótesis destinadas a ser revestidas con piel sintética.

El diseño proporcionó una representación visual clara y detallada de la prótesis, permitiendo un análisis exhaustivo y una comprensión profunda de sus características físicas. Las dimensiones precisas facilitaron cálculos rigurosos y confiables, elementos esenciales para el desarrollo exitoso del prototipo.

**Tabla 7. Cálculo del volumen de Muestra A**

---

**Masa** = 296.81 gramos

**Volumen** = 267,003.69 milímetros cúbicos

**Área de superficie** = 37,725.18 milímetros cuadrados

**Centro de masa**

X = -3.21

Y = -9.68

Z = 22.14

---

**Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia (gramos \* milímetros cuadrados)**

$I_x = (0.06, 1.00, -0.03)$	$P_y = 229,034.46$
$I_y = (-0.99, 0.07, -0.10)$	$P_y = 505,868.83$
$I_z = (0.10, 0.02, 0.99)$	$P_z = 689,938.88$

---

**Datos tomados del centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de salidas**

$L_{xx} = 506,644.01$	$L_{xy} = 17,292.11$	$L_{xz} = -19,080.81$
$L_{yx} = 17,292.11$	$L_{yy} = 230,412.71$	$L_{yz} = -10,548.26$
$L_{zx} = -19,080.81$	$L_{zy} = -10,548.26$	$L_{zz} = 687,785.46$

---

**Datos tomados del sistema de coordenadas de salida (Usando notación tensorial positiva)**

$I_{xx} = 679,877.59$	$I_{xy} = 26,514.75$	$I_{xz} = -40,177.02$
$I_{yx} = 26,514.75$	$I_{yy} = 378,910.60$	$I_{yz} = -74,129.34$
$I_{zx} = -40,177.02$	$I_{zy} = -74,128.34$	$I_{zz} = 718,641.28$

---

Fuente: Elaboración propia.

En la (Tabla 7) se presentan los cálculos fueron realizados para determinar diversas propiedades físicas de la Muestra A, que se identificó como una parte específica de la prótesis de mano con piel sintética. La masa total de la muestra fue medida y registrada como 296.81 gramos. Además, se calcularon el volumen y el área de superficie de la muestra, obteniendo valores de 267,003.69 milímetros cúbicos y 37,725.18 milímetros cuadrados, respectivamente. Estos cálculos fueron esenciales para entender la densidad y la distribución de masa del material.

En cuanto al centro de masa de la Muestra A, se ubicó mediante coordenadas específicas en un sistema tridimensional:  $X = -3.21$  mm,  $Y = -9.68$  mm, y  $Z = 22.14$  mm. Esta información fue crucial para determinar cómo se distribuye la masa en la muestra y cómo podría influir en el equilibrio y la estabilidad de la prótesis.

La tabla también incluyó datos detallados sobre los ejes principales de inercia y los momentos principales de inercia, expresados en gramos por milímetros cuadrados. Estos valores,  $I_x$ ,  $I_y$ , e  $I_z$ , junto con sus vectores asociados, proporcionaron información esencial sobre la distribución de la masa de la muestra en relación con los tres ejes principales. Los momentos de inercia son indicativos de la resistencia del objeto al cambio en su movimiento

rotacional. Los valores obtenidos fueron  $P_y = 229,034.46$  para  $I_x$ ,  $P_y = 505,868.83$  para  $I_y$  y  $P_z = 689,938.88$  para  $I_z$ .

Además, se calcularon los productos de inercia ( $I_{xx}$ ,  $I_{xy}$ ,  $I_{xz}$ ,  $I_{yx}$ ,  $I_{yy}$ ,  $I_{yz}$ ,  $I_{zx}$ ,  $I_{zy}$ ,  $I_{zz}$ ) a partir del centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de salida. Estos valores proporcionaron información detallada sobre la distribución de la masa en relación con los ejes coordinados, crucial para comprender cómo la masa de la muestra afecta su comportamiento bajo fuerzas rotacionales.

Finalmente, la tabla presentó los momentos de inercia ( $I_{xx}$ ,  $I_{xy}$ ,  $I_{xz}$ ,  $I_{yx}$ ,  $I_{yy}$ ,  $I_{yz}$ ,  $I_{zx}$ ,  $I_{zy}$ ,  $I_{zz}$ ) usando la notación tensorial positiva, que es una representación matemática que describe cómo la masa de un objeto está distribuida en relación con un punto en el espacio. Estos cálculos son fundamentales en la ingeniería de prótesis, ya que ayudan a predecir cómo un objeto se moverá y responderá bajo varias fuerzas, especialmente en movimientos dinámicos.

En resumen, se proporcionó una descripción exhaustiva y detallada de las propiedades físicas clave de la Muestra A, incluyendo su masa, volumen, área de superficie, centro de masa, ejes y momentos de inercia. Esta información fue esencial para la evaluación técnica del material utilizado en la prótesis, permitiendo una comprensión profunda de sus propiedades mecánicas y su comportamiento en condiciones de uso práctico. Estos datos son cruciales para el diseño y la optimización de prótesis de mano, asegurando su funcionalidad y eficacia.

**Tabla 8. Cálculo del volumen de Muestra B**

<b>Masa = 151.97 gramos</b>	
<b>Volumen = 136,705.89 milímetros cúbicos</b>	
<b>Área de superficie = 24,144.11 milímetros cuadrados</b>	
<b>Centro de masa</b>	$X = -3.21$
	$Y = -9.68$
	$Z = 22.14$
<b>Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia (gramos * milímetros cuadrados)</b>	
$I_x = (0.06, \quad 1.00, \quad -0.03)$	$P_y = 75,050.01$

$$I_y = (-0.99, 0.07, -0.10)$$

$$I_z = (0.10, 0.02, 0.99)$$

$$P_y = 165,763.10$$

$$P_z = 226,079.17$$

---

**Datos tomados del centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de salidas**

$L_{xx} = 166,017.11$	$L_{xy} = 5,666.28$	$L_{xz} = -6,252.40$
$L_{yx} = 5,666.28$	$L_{yy} = 75,501.64$	$L_{yz} = -3,456.45$
$L_{zx} = -6,252.40$	$L_{zy} = -3,456.45$	$L_{zz} = 225,373.54$

---

**Datos tomados del sistema de coordenadas de salida (Usando notación tensorial positiva)**

$I_{xx} = 254,712.70$	$I_{xy} = 10,388.27$	$I_{xy} = -17,053.66$
$I_{yx} = 10,388.27$	$I_{yy} = 151,532.56$	$I_{yy} = -36,009.97$
$I_{zx} = -17,053.66$	$I_{zy} = -36,009.97$	$I_{zy} = 241,171.72$

---

Fuente: Elaboración propia.

En la (Tabla 8) se presentan de manera detallada los cálculos fueron realizados para determinar las propiedades físicas de la Muestra B, una sección específica de la prótesis de mano cubierta con piel sintética. En este análisis, se emplearon métodos científicos rigurosos para obtener datos precisos y confiables.

Inicialmente, se midió la masa de la Muestra B, que resultó ser 151.97 gramos. Este dato fue fundamental para calcular otras propiedades físicas. El volumen de la muestra se calculó en 136,705.89 milímetros cúbicos, y el área de superficie se determinó en 24,144.11 milímetros cuadrados. Estas mediciones proporcionaron información esencial sobre la densidad y la distribución de la masa de la muestra.

El centro de masa de la Muestra B se localizó en coordenadas específicas en un sistema tridimensional:  $X = -3.21$  mm,  $Y = -9.68$  mm, y  $Z = 22.14$  mm. Este cálculo fue crucial para comprender cómo la masa estaba distribuida en la muestra y cómo esto podría influir en el equilibrio y la estabilidad de la prótesis.

Posteriormente, se determinaron los ejes principales de inercia y los momentos principales de inercia, expresados en gramos por milímetros cuadrados. Estos valores,  $I_x$ ,  $I_y$  e  $I_z$ , junto con sus respectivos vectores, proporcionaron información valiosa sobre la distribución de la masa de la muestra en relación con los tres ejes principales. Los momentos de inercia son indicativos de la resistencia del objeto al cambio en su movimiento rotativo.

Los valores obtenidos para estos momentos fueron  $P_y = 75,050.01$  para  $I_x$ ,  $P_y = 165,763.10$  para  $I_y$ , y  $P_z = 226,079.17$  para  $I_z$ .

Los productos de inercia ( $L_{xx}$ ,  $L_{xy}$ ,  $L_{xz}$ ,  $L_{yx}$ ,  $L_{yy}$ ,  $L_{yz}$ ,  $L_{zx}$ ,  $L_{zy}$ ,  $L_{zz}$ ) se calcularon teniendo en cuenta el centro de masa y alineándolos con el sistema de coordenadas de salida. Estos valores proporcionaron una visión profunda de cómo la masa de la muestra estaba distribuida en relación con los ejes coordinados. Esta información es de vital importancia para comprender cómo la muestra, en este caso, una parte de la prótesis de mano, respondería bajo fuerzas rotacionales. El conocimiento preciso de la distribución de la masa es esencial para prever el equilibrio y la estabilidad de la prótesis durante su uso.

Además, se presentaron los momentos de inercia ( $I_{xx}$ ,  $I_{xy}$ ,  $I_{xz}$ ,  $I_{yx}$ ,  $I_{yy}$ ,  $I_{yz}$ ,  $I_{zx}$ ,  $I_{zy}$ ,  $I_{zz}$ ) utilizando la notación tensorial positiva. Esta notación matemática avanzada describe cómo la masa de un objeto, como una prótesis de mano, está distribuida en relación con un punto específico en el espacio. Comprender los momentos de inercia es fundamental en la ingeniería de prótesis, ya que estos cálculos ayudan a predecir cómo un objeto se moverá y responderá bajo diferentes tipos de fuerzas, especialmente en situaciones que implican movimientos dinámicos y complejos.

La información detallada y exhaustiva sobre las propiedades físicas de la Muestra B, incluyendo su masa, volumen, área de superficie, centro de masa, ejes y momentos de inercia, fue crucial para la evaluación técnica del material utilizado en la prótesis. Estos datos proporcionaron una comprensión profunda de las propiedades mecánicas de la muestra y su comportamiento en condiciones de uso práctico. Este nivel de detalle es imprescindible para el diseño y optimización de prótesis de mano, asegurando que sean funcionales, eficaces y adecuadas para el uso diario. Por lo tanto, jugó un papel clave en el avance del proyecto, ofreciendo datos fundamentales que permitieron mejorar la calidad y el rendimiento de la prótesis de mano desarrollada.

#### **5.4 IMPRESIÓN 3D**

La etapa de fabricación de prototipos físicos de la prótesis de mano se llevó a cabo empleando la impresora 3D Ender 3 V2, un elemento clave en el proceso de materialización de los modelos digitales que se habían diseñado previamente. Este paso fue crítico, ya que

la impresión 3D permitió la transición de los modelos digitales a prototipos tangibles, proporcionando una primera instancia física para la evaluación y pruebas. La Ender 3 V2, reconocida por su alta fiabilidad y precisión, fue la herramienta elegida debido a su capacidad para reproducir con exactitud los detalles intrincados del diseño, manteniendo la fidelidad dimensional esencial para que las piezas impresas reflejaran con precisión las proporciones y características especificadas en el modelo digital.

Durante el proceso de impresión, se prestó especial atención a la calidad y precisión de la impresión, factores cruciales para garantizar que los prototipos se ajustaran de manera impecable a la anatomía específica de una mano humana. Esta precisión fue indispensable para asegurar la funcionalidad y el ajuste correcto de la prótesis, así como para facilitar la integración posterior de la piel sintética. La capacidad de la Ender 3 V2 para imprimir con un alto nivel de detalle fue particularmente beneficiosa para simular las características anatómicas complejas de una mano.

Además, Para la fabricación del prototipo, se optó por el Ácido Poliláctico (PLA) como material preferente. La elección del PLA se fundamentó en sus características de rigidez y facilidad de uso en impresión 3D, cualidades que lo hacen muy adecuado para aplicaciones protésicas. Aunque el PLA carece de la misma flexibilidad que el Poliuretano Termoplástico (PLA), su estabilidad dimensional y la precisión en los detalles lo convierten en un material idóneo para capturar la intrincada anatomía de una mano. Además, su rigidez contribuyó a la estructura general de la prótesis, permitiendo que se realizaran movimientos precisos y controlados. A pesar de que la integración de la piel sintética con un substrato de PLA presentó desafíos adicionales debido a su menor flexibilidad en comparación con el TPU, se tomaron medidas para asegurar que la piel se adhiriera adecuadamente, conservando la movilidad esencial y brindando una experiencia auténtica al usuario.

## **5.5 DESARROLLO E INTEGRACIÓN DE PIEL A PRÓTESIS**

Con el fin de revestir de manera eficaz la prótesis con piel sintética, se emprendió el desarrollo de un molde negativo, utilizando yeso dental de alta precisión. Este procedimiento implicó la inmersión cuidadosa de la prótesis de mano en el yeso, con el objetivo de lograr una réplica exacta de su estructura. Tras la solidificación del yeso y la

extracción de la prótesis, se obtuvo un molde que replicó de manera meticulosa las características anatómicas de la mano.

Este método resultó esencial para asegurar una cobertura integral y precisa de la prótesis con la piel sintética. Permitió que la piel imitara con exactitud tanto la textura como el contorno de la prótesis, manteniendo un grosor uniforme y adecuadamente ajustado. La creación de este molde negativo fue un paso fundamental en el proyecto, ya que contribuyó significativamente a alcanzar los objetivos estéticos y funcionales deseados en la prótesis final.

Este enfoque detallado en la elaboración del molde facilitó una integración más precisa y natural de la piel sintética, lo que es crucial para la apariencia realista y la funcionalidad óptima de la prótesis de mano final.

**Tabla 9. Duración Requerida para la Elaboración del Molde Negativo**

<b>Fases</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tiempo de ejecución</b>
<b>Fase 1: Medición de materiales (yeso y agua)</b>	Se empleó una proporción de 100 gramos de yeso por cada 40 mililitros de agua en la preparación de la mezcla.	00:03:00
<b>Fase 2: Mezcla de materiales</b>	El yeso fue incorporado progresivamente al agua, asegurando una mezcla constante y uniforme durante todo el proceso.	00:06:00
<b>Fase 3: Vertido de mezcla</b>	La mezcla fue cuidadosamente vertida en el recipiente designado para su uso. Luego, se introdujo la prótesis impresa en el molde.	00:01:00
<b>Fase 4: Tiempo de curado</b>	Se estableció un intervalo de tiempo de espera específico para asegurar el secado adecuado del yeso. Cuando el yeso se solidificó se hizo el retiro de la mano protésica.	00:10:00
<b>Total, de tiempo:</b>		00:20:00 (20mins)

Fuente: Elaboración propia.

De la forma precisa y detallada el proceso y la duración requerida para la elaboración del molde negativo (Tabla 9), una etapa esencial en la fabricación de la prótesis de mano con piel sintética. Este proceso se dividió en varias fases, cada una con descripciones y tiempos de ejecución específicos.

En la Fase 1, titulada "Medición de Materiales", se llevó a cabo la preparación inicial de los componentes necesarios para la mezcla del molde. Se utilizó una proporción precisa de 100 gramos de yeso por cada 40 mililitros de agua. Este paso fue crucial para garantizar la consistencia adecuada de la mezcla. El tiempo dedicado a esta fase fue de tres minutos.

La Fase 2, denominada "Mezcla de Materiales", implicó la incorporación progresiva del yeso al agua. Durante este proceso, se mantuvo una mezcla constante y uniforme para asegurar que el yeso se disolviera completamente en el agua sin formar grumos. Este paso fue fundamental para obtener una mezcla homogénea que se pudiera manipular fácilmente en las siguientes etapas. El tiempo empleado en esta fase fue de seis minutos.

En la Fase 3, "Vertido de Mezcla", la mezcla resultante de yeso y agua se vertió cuidadosamente en el recipiente designado. Posteriormente, se introdujo la prótesis impresa en 3D en el molde. Esta fase fue crítica para asegurar que la prótesis quedara correctamente posicionada dentro del molde y que la mezcla cubriera todas las áreas necesarias. El tiempo dedicado a esta fase fue de un minuto.

La Fase 4, "Tiempo de Curado", consistió en un intervalo de espera específico para permitir el secado y solidificación adecuados del yeso. Durante este tiempo, la mezcla se transformó en un molde sólido que capturó fielmente la forma de la prótesis. Una vez que el yeso se solidificó, se procedió al retiro cuidadoso de la mano protésica. El tiempo asignado para el curado fue de diez minutos.

En total, el tiempo requerido para completar todas las fases del proceso de elaboración del molde negativo fue de veinte minutos. Se presentó estos datos de manera organizada y estructurada, lo que permitió una comprensión clara y precisa del tiempo y los pasos necesarios para la creación del molde. Este registro meticuloso fue esencial para la planificación eficiente del proceso de fabricación de la prótesis, asegurando que cada etapa se ejecutara de manera oportuna y efectiva.

**Tabla 10. Duración Requerida para el revestimiento de prótesis con piel sintética**

Fases	Descripción	Tiempo de ejecución
<b>Fase 1: Medición de materiales (Componente A y B)</b>	Se empleó una proporción de 1A:1B, utilizando un volumen de 15 ml para cada uno, sumando un total de 30 ml en la mezcla.	00:03:00

<b>Fase 2: Mezcla de materiales y coloración de silicona</b>	Los componentes A y B se combinaron hasta alcanzar una mezcla homogénea. Posteriormente, se incorporó pigmento de color junto con polvo flock, con el fin de imitar un tono de piel natural y realista.	00:05:00
<b>Fase 3: Vertido de mezcla</b>	La mezcla fue cuidadosamente vertida en el molde negativo del yeso, junto con la prótesis.	00:02:00
<b>Fase 4: Tiempo de curado</b>	Se estableció un intervalo de tiempo de espera específico para asegurar el secado adecuado de la silicona.	00:30:00
<b>Fase 5: Retirado de piel sintética</b>	La prótesis, revestida con la piel sintética, fue cuidadosamente extraída del molde negativo.	00:05:00
<b>Total, de tiempo:</b>		00:45:00 (45 mins)

Fuente: Elaboración propia

Se proporcionó una descripción minuciosa y detallada de las fases involucradas en el proceso de revestimiento de una prótesis con piel sintética (Tabla 10), incluyendo los tiempos de ejecución de cada fase. Este proceso fue crucial para la creación de una prótesis que no solo fuera funcional, sino también estéticamente realista.

En la Fase 1, titulada "Medición de Materiales", se llevó a cabo la preparación de los componentes A y B para la mezcla de silicona. Se utilizó una proporción equitativa de 1A:1B, con un volumen de 15 ml para cada componente, sumando un total de 30 ml en la mezcla. El tiempo dedicado a esta fase fue de tres minutos. Esta etapa fue esencial para asegurar que la mezcla tuviera las propiedades químicas adecuadas para el revestimiento.

La Fase 2, "Mezcla de Materiales y Coloración de Silicona", implicó la combinación de los componentes A y B hasta lograr una mezcla homogénea. Posteriormente, se añadió pigmento de color y polvo flock para imitar un tono de piel natural y realista. El tiempo asignado a esta fase fue de cinco minutos. Este paso fue crucial para lograr el tono y la textura deseados de la piel sintética.

En la Fase 3, "Vertido de Mezcla", la mezcla resultante se vertió cuidadosamente en el molde negativo de yeso que contenía la prótesis. Este paso fue crucial para asegurar que la mezcla cubriera de manera uniforme la superficie de la prótesis. El tiempo dedicado a esta fase fue de dos minutos.

La Fase 4, "Tiempo de Curado", consistió en un intervalo de espera específico para permitir que la silicona se secase adecuadamente. Durante este periodo, la mezcla se transformó en una cubierta sólida de piel sintética que replicaba fielmente la forma y textura de una mano humana. El tiempo asignado para el curado fue de treinta minutos.

Finalmente, en la Fase 5, "Retirado de Piel Sintética", se extrajo cuidadosamente la prótesis, ahora revestida con la piel sintética, del molde negativo. Este paso fue delicado, ya que requería preservar la integridad del revestimiento de piel sintética. Se dedicaron cinco minutos a esta fase.

El tiempo total requerido para completar el proceso de revestimiento de la prótesis con piel sintética fue de cuarenta y cinco minutos. Se presentó estos datos de manera estructurada, permitiendo una comprensión clara del tiempo y los pasos necesarios para el proceso. Este registro meticuloso fue esencial para la eficiencia y la efectividad en la producción de prótesis con piel sintética, garantizando que cada etapa se ejecutara de manera óptima para lograr un resultado final de alta calidad.

## 5.6 COMPARACIÓN DE COLOR UTILIZANDO SISTEMA PANTONE

Con el objetivo de realizar una evaluación precisa del color de las muestras de piel artificial, se implementó el uso del Pantone Matching System (PMS). Este sistema resultó esencial para la identificación exacta de los tonos específicos de las muestras bajo condiciones de iluminación controlada y neutra.

La comparación visual realizada entre las muestras de piel artificial y la carta de colores PMS condujo al descubrimiento de coincidencias específicas. Este proceso permitió una correlación detallada entre los tonos de las muestras y los estándares de color establecidos por el sistema PMS, proporcionando una base cuantitativa y cualitativa para la evaluación del color de las muestras (Tabla 11. Hallazgos de comparación de colores utilizados:

**Tabla 11. Hallazgos de comparación de colores utilizados**

MUESTRA	HALLAZGOS
<b>Muestra A</b>	En la investigación, se observó que una de las muestras presentó una gran similitud con el tono Pantone #D3AEA6. Sin embargo, en esta misma muestra se identificaron variaciones significativas, incluyendo la presencia del tono #C6B8C5. Este hallazgo indicó una diversidad cromática en la muestra, resaltando la

	complejidad en la replicación exacta de colores en los materiales estudiados.
<b>Muestra B</b>	Se observó que la muestra en cuestión presentaba un color más uniforme, el cual se alineó estrechamente con el tono Pantone #E4CED1. A pesar de esta alta correspondencia cromática, aún se registraron ligeras variaciones en el color de la muestra, indicando una pequeña divergencia del tono Pantone especificado.
<b>Muestra de dedo 1A</b>	La muestra analizada demostró una alta similitud con el tono #9B7B64. Se constató una correspondencia casi exacta en el color, aunque se detectaron leves variaciones. Estas pequeñas discrepancias cromáticas podrían ser atribuidas a la textura de la superficie de la muestra
<b>Muestra de dedo 2A</b>	Se observó que la muestra se alineaba estrechamente con el tono #4E3B35. Este color se identificó como una representación adecuada de la pigmentación deseada para simular un tono de piel natural más oscuro
<b>Muestra de mano A</b>	La muestra de la mano A tuvo un color muy parecido con el #D0AF7C de la paleta de colores Pantone. Se muestra un tono de color homogéneo en toda la estructura.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.7 EVALUACIÓN DE TEXTURA

Durante la fase de evaluación de la textura de la piel sintética, descrita en la (Tabla 12. Hallazgos evaluación de textura, el informe, se implementó un enfoque meticuloso y detallado utilizando técnicas avanzadas de microfotografía. Este método fue esencial para permitir una inspección detallada y precisa de la superficie de la piel sintética, posibilitando un análisis minucioso de características como la profundidad y la uniformidad de las texturas replicadas.

Para aumentar la objetividad y precisión del estudio, se empleó la aplicación "Magnifying Glass + Flashlight". Esta herramienta resultó ser particularmente útil, ya que facilitó la visualización detallada de elementos microscópicos de la superficie de la piel, como las arrugas y otras texturas finas. La capacidad de ajustar parámetros como el zoom y la iluminación fue crucial para mejorar la calidad y nitidez de las imágenes capturadas, permitiendo así una evaluación más precisa de las características de la textura.

En un esfuerzo por obtener una evaluación más precisa de la textura de la piel sintética, se empleó un método complementario y esencial: el post-procesamiento de imágenes capturadas a través de la microfotografía. Utilizando el software Adobe Photoshop, se realizó

una edición detallada de las imágenes, ajustando parámetros críticos como el contraste, la resolución, el ruido y la luminosidad. Estos ajustes fueron fundamentales para mejorar la representación visual de la textura de la piel sintética, permitiendo realzar los detalles más finos y mejorar la claridad general de las imágenes.

Este enfoque integrado, que combinaba técnicas avanzadas de microfotografía y edición digital, proporcionó una base sólida para la evaluación técnica de la textura de la piel sintética. La metodología implementada permitió una comparación minuciosa y fidedigna con la textura de la piel humana real, resaltando así la capacidad de la piel sintética para replicar no solo la apariencia estética, sino también las sutilezas estructurales de la piel natural.

Los resultados obtenidos de este proceso representaron un avance significativo en el desarrollo de biomateriales. El éxito en replicar la textura y la apariencia de la piel humana natural subraya el enorme potencial de la piel sintética en una gama amplia de aplicaciones, abarcando desde la medicina regenerativa hasta la robótica avanzada. Este progreso no solo mejora las capacidades estéticas de las prótesis y dispositivos biomédicos, sino que también promueve el desarrollo de soluciones más eficientes y realistas, mejorando la calidad de vida de los usuarios y abriendo nuevas posibilidades en el campo de la biotecnología y la ingeniería de tejidos.

**Tabla 12. Hallazgos evaluación de textura**

<b>MUESTRA</b>	<b>HALLAZGOS</b>
<b>Muestra de dedo 1A</b>	La inspección visual inicial de la muestra sugirió una replicación insuficiente de la textura de la piel. Sin embargo, un análisis microfotográfico subsiguiente, complementado con procesamiento digital utilizando Photoshop, reveló la existencia de sutiles replications de textura que no eran aparentes a simple vista. Se concluyó que estas diferencias podrían ser atribuidas a las técnicas específicas empleadas en la síntesis de la piel sintética.
<b>Muestra de dedo 2A</b>	Durante la observación visual preliminar, se identificaron arrugas en la superficie del dedo de la muestra. El análisis de imagen posterior reveló que estas arrugas eran más pronunciadas y definidas de lo que se había percibido inicialmente. Este hallazgo sugirió una fidelidad superior en la textura de la muestra comparada con la muestra 1 <sup>a</sup>

Fuente: Elaboración propia.

## 5.8 PRUEBAS DE ADHERENCIA

La integración de la piel sintética con el prototipo de prótesis representó un hito importante en el desarrollo del proyecto. En la (Ilustración 10) se diseñó y ejecutó un ensayo específico para evaluar la eficacia de la adherencia de la piel en distintos materiales, centrando la atención en dos dedos de la prótesis. Este enfoque permitió una evaluación detallada y representativa de cómo la piel sintética se comportaría en condiciones similares a las de un uso real.

La elección de probar la adherencia en dos dedos fue estratégica, ya que los dedos de una prótesis están sometidos a un rango dinámico de movimientos y estrés mecánico, lo que los hace ideales para probar tanto la durabilidad como la flexibilidad de la piel sintética. Además, los dedos de una prótesis representan un desafío único en términos de adherencia debido a su tamaño reducido y su alta movilidad.

Durante la investigación, la piel sintética fue cuidadosamente aplicada a los dedos de la prótesis, hechos de materiales seleccionados para simular las condiciones de uso reales. La adherencia de la piel fue monitoreada bajo una serie de movimientos y manipulaciones diseñados para imitar las acciones cotidianas. Estas pruebas proporcionaron una valiosa información sobre la capacidad de la piel sintética para mantener su posición y cohesión sin deslizarse, estirarse de manera excesiva o desprenderse.

Los resultados de la prueba fueron prometedores. Se observó que la piel sintética se adhería firmemente a los diferentes materiales de los dedos protésicos, sin mostrar signos de desprendimiento o deterioro. Además, la piel mantuvo su integridad estructural y estética, incluso después de repetidos ciclos de movimiento, lo que demuestra su capacidad para soportar el uso continuo y las demandas funcionales de una prótesis.

La integración exitosa de la piel sintética con el prototipo de prótesis en la prueba de los dedos marcó un avance significativo, demostrando no solo la viabilidad de la piel como recubrimiento protésico, sino también su potencial para mejorar la funcionalidad y el aspecto realista de las prótesis en aplicaciones prácticas. Este logro representa un paso importante hacia la realización de prótesis más naturales y eficientes para usuarios que buscan soluciones que imiten de cerca las cualidades de la piel humana.

En la (**Error! Reference source not found.** La imagen representaba gráficamente un prototipo de mano protésica, complementada con diversas anotaciones descriptivas. Estas anotaciones proporcionaban detalles sobre las pruebas de calidad y resistencia realizadas en la piel sintética utilizada para revestir el prototipo. El propósito de estas pruebas era evaluar la adecuación de la piel sintética para su aplicación en prótesis. Era fundamental demostrar que el material no solo era duradero, sino también capaz de soportar una amplia gama de estreses mecánicos y ambientales, reflejando así las condiciones reales que enfrentaría en el uso diario por parte de un usuario de prótesis.

Las anotaciones incluidas en la representación gráfica del prototipo de mano protésica detallaban los métodos y resultados de las pruebas. Estas evaluaciones eran cruciales para garantizar que la piel sintética cumplía con los requisitos necesarios en términos de resistencia, flexibilidad, y durabilidad, asegurando así su funcionalidad en entornos cotidianos y su eficacia en la mejora de la calidad de vida de los usuarios de prótesis. La realización de estas pruebas era un paso esencial en el proceso de desarrollo y validación de la piel sintética, contribuyendo significativamente al avance en el diseño y la fabricación de prótesis más realistas y funcionales.

### **5.8.1 PRUEBA DE CINTA**

En el marco del proyecto para evaluar la durabilidad de la interfaz de unión entre la epidermis sintética y el sustrato protésico, se realizaron ensayos de adherencia meticulosamente planificados y ejecutados. Estos ensayos fueron esenciales para determinar la capacidad adhesiva y la cohesión superficial de la epidermis sintética cuando se adhiere a un sustrato protésico. Uno de los componentes clave de esta serie de pruebas fue el ensayo de cinta adhesiva, una metodología ampliamente reconocida y aceptada en la industria para la evaluación cuantitativa de estas propiedades.

El procedimiento del ensayo implicó la aplicación cuidadosa de una cinta adhesiva de alta calidad sobre la superficie de la piel sintética, la cual ya estaba adherida al sustrato protésico. Se prestó especial atención a asegurar que la cinta se presionara firmemente contra la piel sintética, garantizando así un contacto completo y uniforme entre las superficies. Tras un período de reposo predefinido, durante el cual la cinta permaneció

adherida a la piel, se procedió a su remoción. Este paso se llevó a cabo con un movimiento constante y controlado, con el fin de evaluar de manera precisa la resistencia adhesiva de la interfaz entre la piel sintética y el sustrato.

Al retirar la cinta adhesiva, se observó detenidamente la superficie de la piel sintética en busca de cualquier cambio o anomalía. Notablemente, no se detectaron alteraciones visibles en la superficie. No hubo evidencia de desprendimiento de la piel de la prótesis, ni residuos adhesivos quedaron adheridos a la cinta. Este resultado señala una excelente cohesión superficial de la piel sintética y una fuerte adhesión a la prótesis, indicativos de una interfaz de unión de alta calidad y durabilidad.

Una inspección visual detallada realizada después de la prueba corroboró aún más la integridad de la piel sintética. No se encontraron signos de desgaste, levantamiento de bordes, ni deterioro en la textura o en la estructura general de la piel. Estos hallazgos son de suma importancia, ya que confirman la viabilidad de la piel sintética para aplicaciones prácticas, especialmente en entornos donde se requiere una adhesión duradera y resistente a la manipulación frecuente. La exitosa ejecución de estos ensayos y los resultados obtenidos refuerzan el potencial de la piel sintética en el campo de la medicina regenerativa y la tecnología protésica.

### **5.8.2 PRUEBA DE FLEXIÓN**

Dentro del ámbito del análisis de materiales para aplicaciones protésicas, se desarrolló un procedimiento experimental para examinar la resistencia adhesiva y la elasticidad de un tipo específico de piel sintética. Este experimento, enmarcado en una serie de pruebas de durabilidad, incluyó la realización de ensayos de flexión, cuyo objetivo era replicar las condiciones dinámicas que una prótesis de mano experimentaría en el uso diario.

La metodología aplicada consistió en someter un prototipo de prótesis, recubierto con la mencionada piel sintética, a movimientos de flexión cíclicos. Se seleccionó un ángulo de flexión cuidadosamente calibrado, basado en el rango de movimiento promedio de una articulación de mano humana, para simular el plegado y desplegado habitual de los dedos. El número de ciclos de flexión fue establecido a partir de un criterio que buscaba emular la

fatiga mecánica que el material podría soportar a lo largo del tiempo, manteniendo siempre un monitoreo estricto para detectar posibles desprendimientos o alteraciones morfológicas.

Tras completar los ciclos predeterminados, la evaluación de la prótesis revestida reveló que la piel sintética había mantenido su integridad estructural. No se evidenciaron desprendimientos ni modificaciones en la forma del revestimiento, lo que indicaba una adhesión efectiva y duradera al sustrato de la prótesis. Los análisis visuales post-ensayo corroboraron la ausencia de defectos como grietas o fracturas, confirmado así la resistencia del material a la tensión y el estrés mecánico.

Adicionalmente, la prueba permitió constatar que la piel sintética poseía una capacidad de retorno a su estado original después de la flexión, evidenciando así una elasticidad y resiliencia superiores. Este comportamiento es fundamental para la funcionalidad de prótesis destinadas al uso prolongado, donde la recuperación de la forma es un atributo valorado para la comodidad y la estética.

En consecuencia, los resultados obtenidos de estas pruebas de flexión aportaron datos concluyentes sobre la idoneidad de la piel sintética para su uso en prótesis de mano. Se demostró que este material, más allá de su apariencia estética convincente, cumple con los requerimientos de durabilidad y elasticidad necesarios para la práctica cotidiana. Este avance representa un progreso notable en la investigación de materiales sintéticos, prometiéndole un mejoramiento significativo en la calidad de las prótesis de mano y en la calidad de vida de los usuarios de dichos dispositivos.

### **5.8.3 PRUEBA DE IMPACTO**

Para determinar la resistencia de la piel sintética a impactos súbitos y cargas agudas, que simulan condiciones reales de uso, llevamos a cabo pruebas de impacto. Estas pruebas son críticas para evaluar la durabilidad del material frente a choques y presiones que podrían ocurrir durante la manipulación cotidiana de la prótesis.

La piel sintética adherida a la prótesis fue sometida a una serie de impactos controlados utilizando pesos de caída libre, diseñados para ejercer una fuerza sobre el material.

Tras la exposición a las fuerzas de impacto, la piel sintética no mostró signos de fractura, desgarro ni deformación permanente. La inspección detallada post-prueba confirmó que la integridad estructural del material se mantuvo intacta, sin cambios visibles en la textura.

Las pruebas de abrasión se realizaron con el propósito de simular el desgaste mecánico regular que la piel sintética podría enfrentar en un entorno cotidiano. La metodología empleada buscaba replicar el efecto de la fricción constante sobre la superficie de la piel, un factor crítico que podría afectar su integridad y apariencia a lo largo del tiempo.

Paralelamente, las pruebas de humedad se diseñaron para determinar cómo la piel sintética resistiría a la exposición prolongada al agua o a ambientes húmedos. Esta evaluación era crucial, dado que una absorción excesiva de humedad podría resultar en la hinchazón del material o en cambios adversos en sus propiedades físicas y mecánicas.

Finalmente, se examinó la resistencia química de la piel sintética sumergiéndola en soluciones que contenían sustancias potencialmente corrosivas o degradantes. Este procedimiento tenía como fin asegurar que la piel sintética no sufriría deterioro cuando entrase en contacto con productos químicos comunes en el hogar o en entornos médicos, como desinfectantes, aceites y cremas.

El estudio abordó sistemáticamente la evaluación de la piel sintética destinada al uso protésico, con el objetivo de determinar su capacidad de resistir y funcionar bajo condiciones diversas y exigentes. Se diseñó una batería de pruebas para medir la durabilidad, la resistencia a la humedad y la resiliencia ante agentes químicos variados, factores todos que impactan directamente en la viabilidad del uso de la piel sintética en entornos reales.

Inicialmente, se sometió la piel sintética a pruebas de abrasión controladas para emular el desgaste diario. Utilizando lijas y otros materiales abrasivos, se recrearon los efectos de la fricción que la piel sintética enfrentaría en el uso cotidiano. El seguimiento meticuloso de estas pruebas documentó la capacidad del material para mantener su integridad superficial, un aspecto crítico para la preservación de la apariencia estética de la prótesis.

Paralelamente, se realizaron ensayos de exposición a la humedad, donde las muestras de piel sintética se sumergieron en agua durante períodos extendidos para observar cualquier posible hinchazón o alteración de sus propiedades elásticas. Estos ensayos

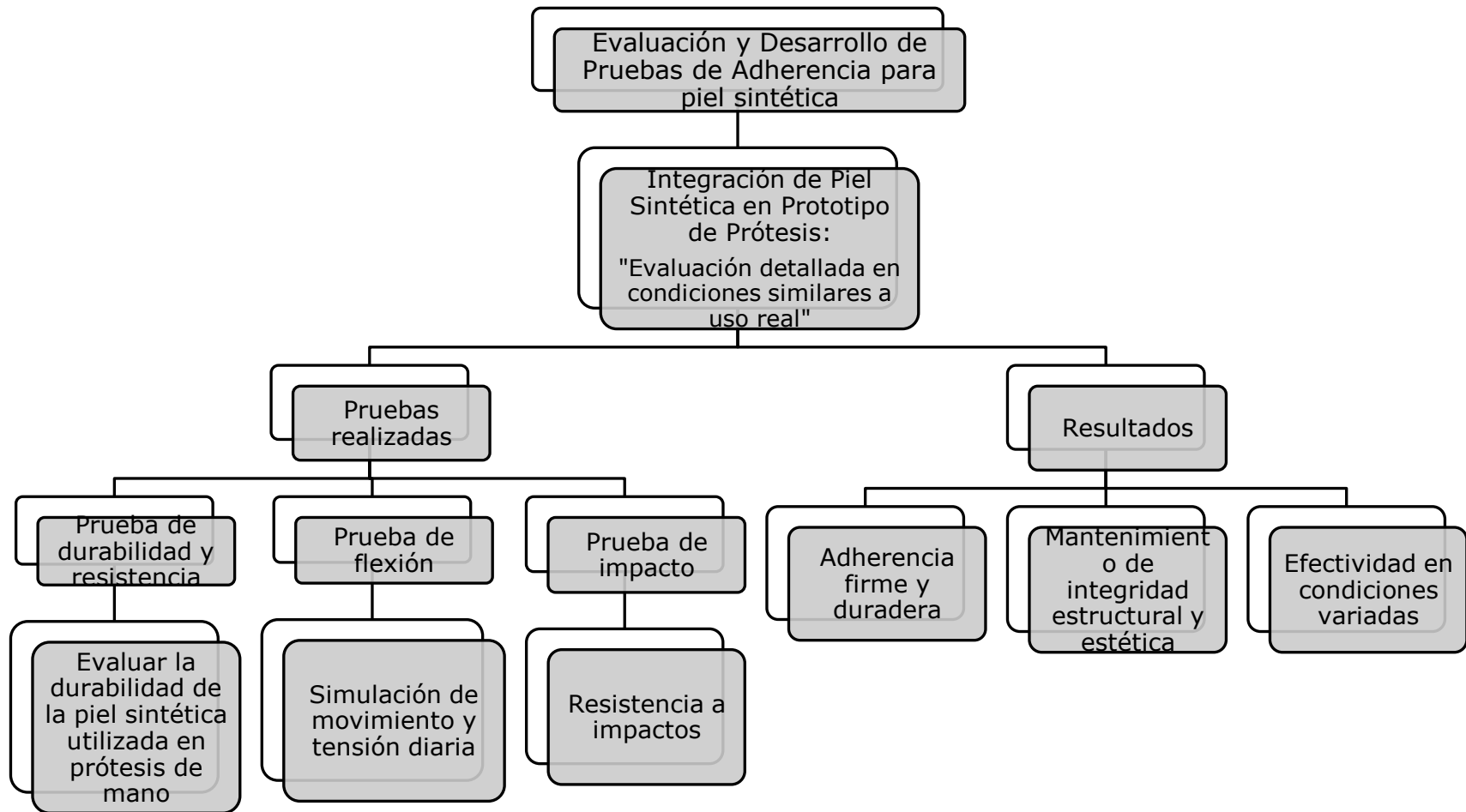
revelaron que la piel sintética conservaba su estructura y flexibilidad originales, incluso después de repetidas exposiciones a ambientes húmedos, subrayando su estabilidad y robustez en condiciones similares a las que se encontraría en la vida diaria.

Además, la resistencia química de la piel sintética fue puesta a prueba al exponer las muestras a diversos productos químicos, incluyendo soluciones de limpieza y otros compuestos que podrían encontrarse en entornos domésticos o clínicos. Los resultados de estas pruebas indicaron una notable inmunidad al deterioro químico, reafirmando la capacidad del material para resistir sustancias potencialmente dañinas sin sufrir degradación.

La compilación de los resultados de todas estas pruebas proporcionó un panorama exhaustivo de la performance de la piel sintética bajo múltiples condiciones adversas, con resultados que demostraron su idoneidad para aplicaciones protésicas. La piel sintética no solo cumplió con los requisitos de durabilidad y resistencia, sino que también evidenció una adaptabilidad impresionante a variados entornos, lo cual es de vital importancia para el desarrollo de prótesis que sean al mismo tiempo realistas, confortables y duraderas.

En resumen, el conjunto de datos obtenidos y su análisis posterior corroboraron la hipótesis de que la piel sintética objeto de estudio es un material altamente adecuado para su uso en prótesis de mano. Estos descubrimientos no sólo contribuyen a la mejora continua de la tecnología protésica, sino que también facilitan el camino hacia la implementación de soluciones más humanizadas y empáticas que respondan a las necesidades y expectativas de los usuarios finales. El estudio representó un avance significativo en la investigación de biomateriales, subrayando el potencial de la piel sintética para transformar la calidad y la funcionalidad de las prótesis actuales y futuras.





**Ilustración 12. Resultados de pruebas de adherencia.**

Fuente: Elaboración propia.

## **5.9 PRUEBAS DE DURABILIDAD Y RESISTENCIA**

En el marco del desarrollo de prótesis avanzadas, se llevó a cabo un estudio exhaustivo para evaluar la durabilidad de la piel sintética utilizada en prótesis de mano, centrándose en su resistencia al desgaste y a diversos factores ambientales. Este análisis incluyó pruebas de abrasión, exposición a la humedad y resistencia a compuestos químicos, con el objetivo de simular las condiciones reales a las que la piel sintética estaría expuesta en su uso cotidiano.

Las pruebas de abrasión, detalladas en la Ilustración 11, se diseñaron para imitar el desgaste mecánico que la piel sintética podría enfrentar. Se emplearon métodos estandarizados para replicar la fricción constante sobre la superficie del material, evaluando así su capacidad para mantener la integridad y la apariencia a lo largo del tiempo. Estos ensayos fueron esenciales para determinar si la piel sintética conservaría su textura y coloración bajo condiciones de uso regular.

Paralelamente, las pruebas de humedad tuvieron como finalidad determinar la resistencia del material a la exposición prolongada a entornos húmedos y al contacto directo con el agua. En estos experimentos, se observó la respuesta de la piel sintética a la absorción de humedad, prestando especial atención a posibles efectos como la hinchazón o alteraciones en sus propiedades físicas y mecánicas. Estas evaluaciones eran cruciales para asegurar que la piel sintética mantendría su funcionalidad y apariencia en condiciones de humedad.

Por último, la resistencia química de la piel sintética fue puesta a prueba sumergiéndola en diferentes soluciones que contenían sustancias potencialmente corrosivas o degradantes, como productos de limpieza y cosméticos. El propósito de estas pruebas era verificar que el material no sufriría deterioro significativo al entrar en contacto con químicos comunes en el hogar o en entornos médicos.

En conjunto, los resultados de estas pruebas proporcionaron una valiosa comprensión sobre la capacidad de la piel sintética para resistir el desgaste, la humedad y agentes químicos. La investigación demostró que la piel sintética poseía una durabilidad notable, manteniendo su integridad estructural y estética bajo una variedad de condiciones ambientales. Este hallazgo es crucial para la aplicación práctica de la piel sintética en prótesis

de mano, ya que asegura tanto la longevidad del material como su aceptación por parte de los usuarios, facilitando así su integración en la vida diaria y mejorando su calidad de vida.

### **5.9.1 PRUEBA DE ABRASIÓN**

En un reciente estudio enfocado en la ingeniería de materiales biomiméticos, se investigó la durabilidad de la piel sintética, un componente crucial en la fabricación de prótesis de mano avanzadas. El objetivo central del estudio era determinar la resistencia de este material innovador al desgaste por fricción, un factor esencial para garantizar su aplicabilidad en entornos de uso diario.

La metodología empleada en las pruebas de abrasión involucró el uso de lija como medio abrasivo para simular condiciones realistas de desgaste. Cada muestra de piel sintética fue sometida a un patrón de movimiento estandarizado, aplicando una presión uniforme a lo largo de un número predefinido de ciclos. Este procedimiento se diseñó para replicar fielmente el tipo de desgaste que la piel sintética podría experimentar en aplicaciones prácticas, como el roce constante contra diferentes superficies.

De manera sorprendente y alentadora, las muestras de piel sintética mostraron una resistencia excepcional a este tipo de estrés mecánico. Los resultados de las pruebas no evidenciaron signos notables de desgaste, como adelgazamiento del material, desprendimiento de capas, o deterioro en la textura. Este hallazgo fue de gran relevancia, especialmente considerando que la textura y el grosor son aspectos fundamentales que influyen tanto en la funcionalidad como en la estética de la piel sintética.

Adicionalmente, se observó que tanto la integridad del color como la estructura general de las muestras se mantuvieron intactas tras la exposición a la fricción. Este resultado indicó la robustez del material en condiciones adversas, un factor crítico para su uso prolongado en aplicaciones médicas o cosméticas, donde la apariencia constante y la durabilidad del color son esenciales. Es decir que la metodología aplicada en estas pruebas brindó datos valiosos sobre la capacidad de la piel sintética para soportar el desgaste mecánico, demostrando ser un parámetro esencial para su implementación en situaciones de la vida real. Estos hallazgos representan un avance significativo en el campo del desarrollo de

materiales biomiméticos, abriendo nuevas posibilidades para su aplicación en áreas que van desde la medicina regenerativa hasta la robótica avanzada.

### **5.10 PRUEBA DE HUMEDAD**

Las muestras de piel sintética fueron sometidas a una rigurosa evaluación para determinar su resistencia y estabilidad en condiciones de alta humedad, un factor crítico para su viabilidad en aplicaciones prácticas. Este análisis implicó un proceso de inmersión en agua durante un periodo prolongado, diseñado específicamente para simular la exposición prolongada a la humedad. El objetivo era identificar posibles efectos adversos, como hinchazón, pérdida de flexibilidad o cualquier otro cambio en las propiedades físicas del material que pudiera comprometer su funcionalidad o estética.

Después de someter las muestras a este ambiente acuoso y posteriormente secarlas, los resultados obtenidos fueron notables. Se observó que la piel sintética retenía sus características esenciales sin sufrir cambios adversos. Su estructura física se mantuvo intacta, un hallazgo que subraya la estabilidad del material en condiciones de humedad.

De manera particularmente relevante, se constató que la elasticidad del material, una propiedad crítica que simula la flexibilidad de la piel humana natural, no sufrió alteraciones. Esta capacidad de mantener la elasticidad después de la inmersión y el secado es indicativa de la robustez del material y su potencial para aplicaciones en las que la piel esté frecuentemente expuesta a la humedad.

Además, no se detectaron indicios de deterioro o deformación en las muestras. Esta ausencia de degradación sugiere que la piel sintética posee una excelente resistencia a los efectos del agua, lo que es esencial para su uso en entornos donde la exposición a líquidos es una constante, como en aplicaciones médicas o de prótesis.

En conjunto, estos resultados demuestran la eficacia del material en resistir las condiciones desafiantes de humedad, reafirmando su idoneidad para una gama amplia de aplicaciones. La resistencia al agua y la estabilidad estructural de la piel sintética abren el camino para su uso en situaciones que requieren un alto grado de fiabilidad y durabilidad.

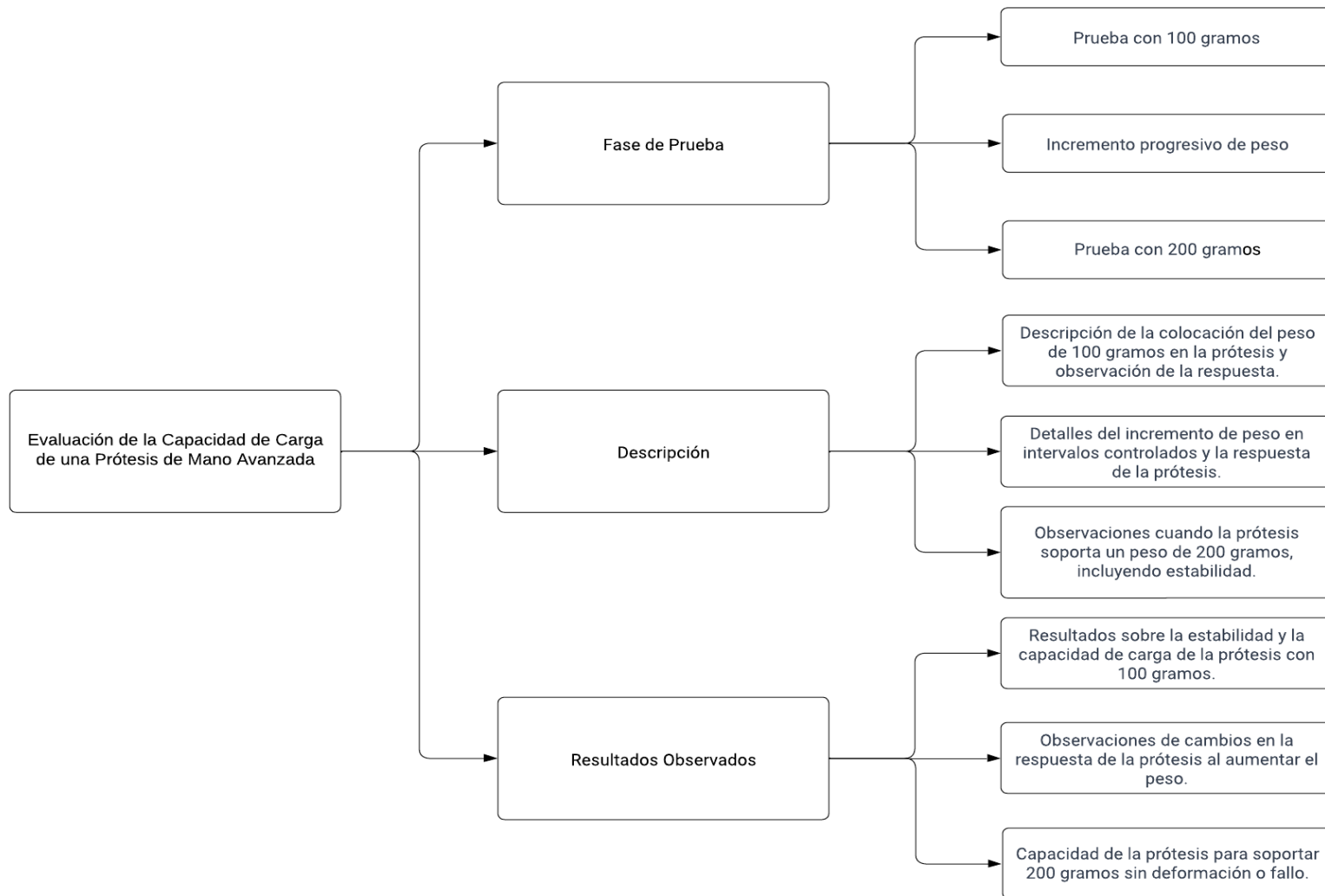
### **5.11 PRUEBA DE PESO**

Se llevó a cabo una investigación exhaustiva para evaluar la capacidad de carga de una prótesis de mano avanzada. El objetivo principal de este estudio era determinar el límite de peso que la prótesis podía soportar de manera efectiva, específicamente en el rango de 100 a 200 gramos. Esta investigación fue crucial para comprender la funcionalidad y la aplicabilidad de la prótesis en actividades cotidianas que requieren manipulación de objetos ligeros. (Ilustración 13).

Para llevar a cabo esta evaluación, se utilizó una balanza medidora de alta precisión, calibrada y verificada para asegurar la exactitud de las mediciones. La prótesis, fabricada con materiales avanzados y diseñada para replicar la funcionalidad de una mano humana, fue sometida a una serie de pruebas donde se incrementó gradualmente el peso desde 100 hasta 200 gramos. Inicialmente, se colocó un objeto de 100 gramos en la mano protésica, y se observó la respuesta del dispositivo. Se evaluó no solo la capacidad de la prótesis para soportar el peso, sino también su estabilidad y la distribución del estrés a lo largo de su estructura. La manera en que la prótesis mantenía el objeto, prestando especial atención a cualquier signo de deformación o falló.

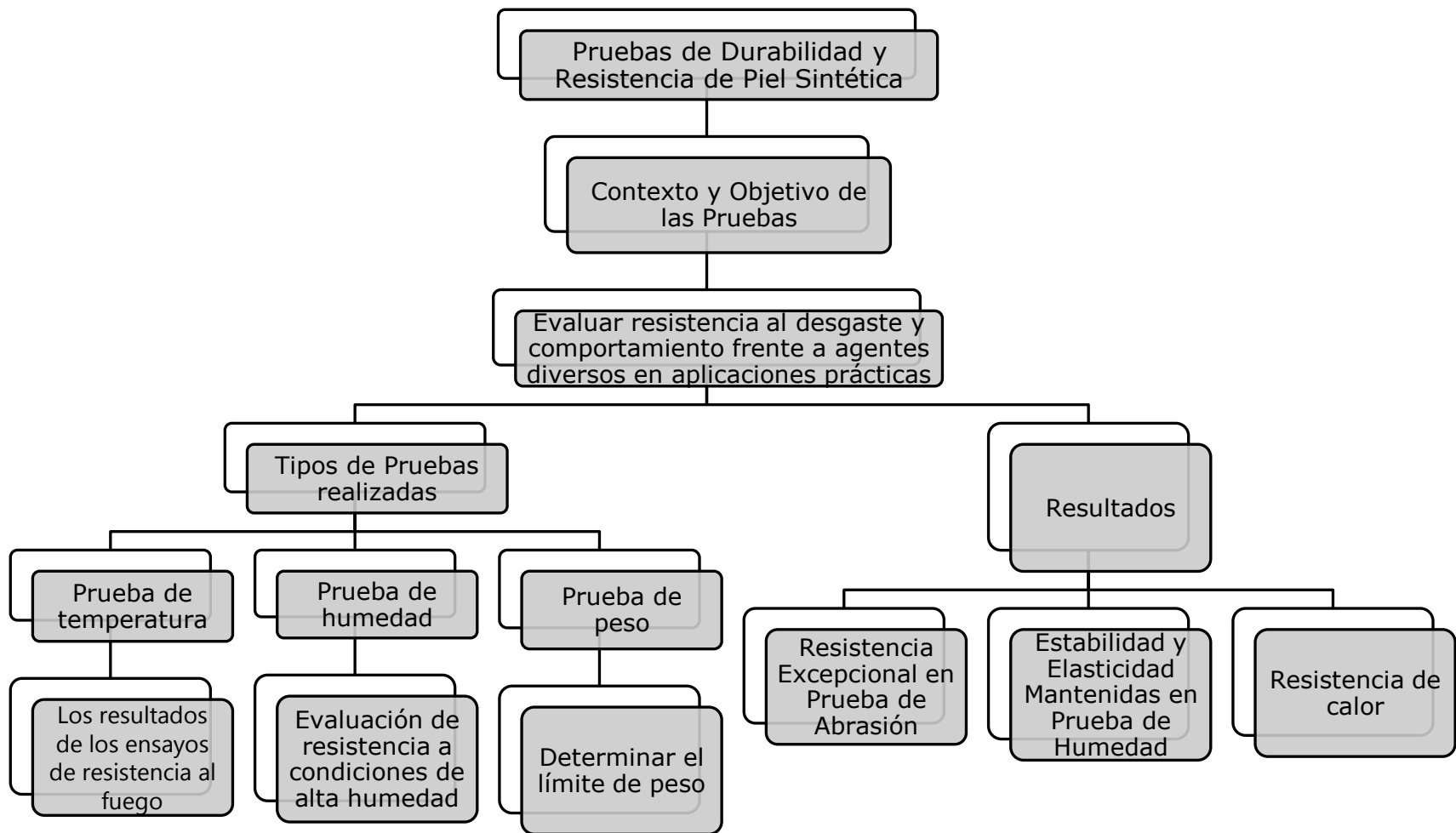
Posteriormente, el peso fue incrementado en intervalos controlados, observando y documentando la respuesta de la prótesis en cada etapa. Al alcanzar los 200 gramos, la prótesis demostró una notable capacidad de carga, manteniendo la estabilidad y mostrando una resistencia adecuada sin signos evidentes de estrés o deformación.

Esta investigación aportó conocimientos significativos sobre la viabilidad y el rendimiento de la prótesis en escenarios de la vida real, demostrando su capacidad para manejar objetos de hasta 200 gramos. Estos hallazgos son de gran importancia para los usuarios de prótesis, ya que ofrecen una comprensión clara de las capacidades de manipulación de la prótesis y su potencial para mejorar la calidad de vida de los individuos con amputaciones de mano.



**Ilustración 13. Prueba de peso**

Fuente: elaboración propia.



**Ilustración 14. Pruebas de durabilidad y resistencia.**

Fuente: elaboración propia.

## 5.12 PRUEBAS DE TEMPERATURA

Se realizaron pruebas de temperatura para evaluar la resistencia y estabilidad del material. (Tabla 13). Mediante la exposición directa de la superficie de la piel sintética al fuego y el empleo de una cámara termográfica, se determinó la temperatura máxima que el material puede soportar antes de experimentar alteraciones significativas en su apariencia y textura. Este proceso permitió identificar no solo el umbral de deterioro térmico, sino también la capacidad de la piel sintética para resistir el calor intenso y recuperar sus propiedades originales tras la exposición. Las pruebas se documentaron meticulosamente en una tabla, detallando las temperaturas específicas aplicadas y los correspondientes efectos observados en la piel sintética. Este análisis proporcionó información valiosa sobre la idoneidad del material para aplicaciones en entornos donde la resistencia al calor es un factor crítico.

Los resultados de los ensayos de resistencia al fuego, detallados en las tablas correspondientes, reflejaron pruebas efectuadas en condiciones tanto controladas como de alta intensidad sobre dedos de prótesis. En los ensayos bajo condiciones controladas, con la temperatura ambiente mantenida en 22 °C, se expusieron los dedos índice, medio, anular y meñique a temperaturas variables durante períodos breves. Esto resultó en distintas respuestas térmicas: el dedo índice, expuesto a 24.5 °C durante 8 segundos, alcanzó una temperatura máxima de 115.3 °C sin incurrir en daños significativos; el dedo medio, sometido a 21.6 °C por 3 segundos, registró una temperatura de 37.4 °C con leves alteraciones de color; el anular, a 22.6 °C por 2 segundos, alcanzó 64.9 °C, presentando cambios texturales; y el meñique, tras 1 segundo a 21.7 °C, experimentó un leve incremento térmico a 37.6 °C.

En los ensayos de alta intensidad, donde la temperatura ambiente se mantuvo constante, los dedos índice y pulgar se sometieron a fuego directo. El dedo índice, con una temperatura inicial de 35.2 °C y un tiempo de exposición de 10 segundos, llegó a 155.1 °C, evidenciando cambios significativos en textura, color y estructura, y comenzó a incendiarse a los 8 segundos. Por su parte, el pulgar, expuesto desde 22.2 °C por 6 segundos, alcanzó 126.3 °C, mostrando variaciones notables en temperatura y desprendimiento de capas.

Estas pruebas ilustraron cómo distintas condiciones de exposición al fuego pueden influir en las propiedades físicas de prótesis de dedos, destacando la relevancia de incorporar la resistencia al fuego en el diseño y selección de materiales para prótesis.

**Tabla 13. Prueba de temperatura**

<b>Ensayos de Resistencia al Fuego en Condiciones Controladas</b>				
Prueba	Temperatura Inicial	Tiempo de exposición	Temperatura máxima alcanzada	Observaciones
Índice	24.5 °C	8 segs	115.3 °C	El dedo índice fue sometido a una exposición a baja temperatura, no quedaron marcas físicas, ni desgaste o pérdida de material de Platsil.
Medio	21.6 °C	3 segs	37.4 °C	El dedo medio presentó únicamente cambios en la alteración de color inicial de la piel.
Anular	22.6 °C	2 segs	64.9 °C	Después de la exposición del dedo anular hubo un cambio en la textura de la mano, se experimentaron cierto tipo de burbujas.
Meñique	21.7 °C	1 segs	37.6 °C	El tiempo de exposición fue bastante bajo, no obstante, al tener menos material de Platsil calentó más rápido.
<b>Ensayos de Resistencia al Fuego en Condiciones de Alta Intensidad</b>				
Prueba	Temperatura Inicial	Tiempo de exposición	Temperatura máxima alcanzada	Observaciones
Índice	35.2 °C	10 segs	155.1	Después de 10 segs de exposición a fuego, el dedo presentó cambios en la textura, alteración de color y desprendimiento de componentes. Al segundo 8 el dedo agarró fuego y se empezó a consumir.
Pulgar	22.2 °C	6 segs	126.3	Con un tiempo de exposición menor, el dedo pulgar tuvo una variación bastante alta de temperatura en cuestión de segundos. El dedo presentó decoloración y desprendimiento de capas.

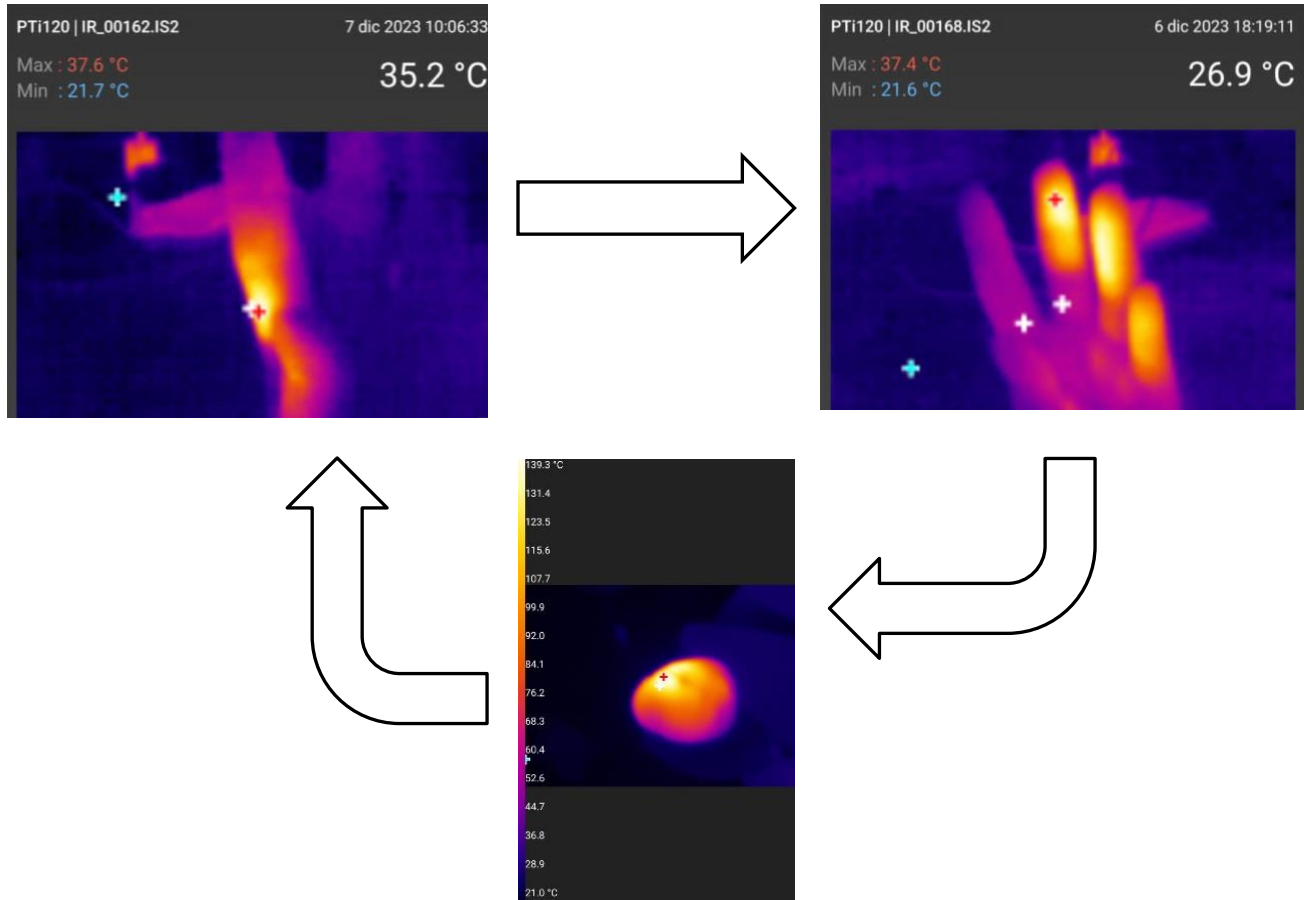
Fuente: Elaboración propia.

La (Tabla 13) son termogramas capturados durante un experimento para evaluar la respuesta térmica de una prótesis de mano y dedo bajo condiciones de alta intensidad térmica. Los termogramas, que son visualizaciones de la distribución de temperatura en la superficie de un objeto, son útiles en la identificación de patrones de calor, áreas de alta conductividad térmica y posibles puntos de estrés térmico.

En el estudio realizado, se aplicó una fuente de calor al dedo de una prótesis, y la distribución resultante de la temperatura se registró a través de la termografía infrarroja. Esta técnica permitió observar las variaciones de temperatura sobre la superficie del dedo sin necesidad de contacto físico, preservando así la integridad del objeto de estudio. Se observó que la temperatura más alta alcanzada en la superficie del dedo fue de 37.4 °C y la más baja fue de 21.6 °C, con una temperatura ambiente reportada de 26.9 °C. En una de las imágenes, se enfocó en un área específica, probablemente correspondiente al dedo pulgar, que mostró un gradiente de temperatura similar al del primer termograma.

La tercera imagen, que también muestra un dedo de la prótesis, indicó una temperatura máxima de 37.6 °C y una temperatura mínima de 21.7 °C, con la temperatura ambiente aumentada a 35.2 °C. Estas mediciones sugieren una respuesta térmica consistente a lo largo de la prótesis bajo la aplicación de calor.

Los resultados del experimento termográfico proporcionan información valiosa para el diseño futuro de prótesis. La capacidad del material para soportar y disipar el calor de manera eficiente es esencial para la comodidad del usuario y la durabilidad del producto. La termografía infrarroja emerge así como una herramienta indispensable en la evaluación de materiales para prótesis, permitiendo una comprensión más profunda de las propiedades térmicas de los biomateriales utilizados..



**Ilustración 15. Pruebas de temperatura con cámara termográfica.**

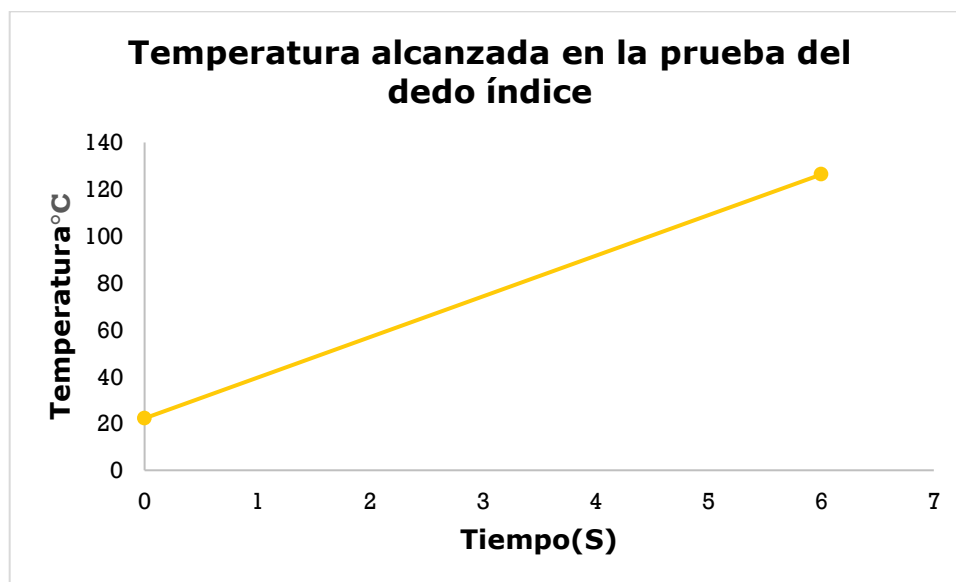
Fuente: elaboración propia.

En la (Ilustración 15), se observa un gráfico lineal que detalla la relación entre el tiempo y la temperatura alcanzada durante la prueba del dedo índice de una prótesis. En el eje vertical, se registra la temperatura, medida en grados, aunque la escala específica (Celsius o Fahrenheit) no se indica. El eje horizontal representa el tiempo, cuya unidad de medida no se especifica claramente en la imagen.

La línea que se traza en el gráfico muestra un incremento constante y uniforme en la temperatura a medida que transcurre el tiempo, partiendo de un valor inicial cercano a los 20 grados y ascendiendo hasta aproximadamente 135 grados al llegar a la séptima unidad de tiempo. Este comportamiento lineal sugiere una correlación directa y proporcional entre el tiempo de exposición y el incremento de temperatura en el dedo índice de la prótesis.

Este tipo de representación gráfica es típica en estudios donde se busca analizar la estabilidad térmica de materiales sometidos a condiciones de estrés por calor. La tendencia lineal indica que el material del dedo índice experimentó una elevación sistemática de temperatura sin presentar anomalías o fluctuaciones significativas durante el periodo de prueba.

La información provista por el gráfico fue crítica para comprender la capacidad del material del dedo índice para soportar el calor. Además, los datos permitieron calcular la tasa de aumento de la temperatura, un factor esencial para evaluar la resistencia térmica del material y su aplicabilidad en entornos donde la temperatura es un factor crítico. Los resultados obtenidos de esta prueba proporcionaron insights valiosos para el diseño y mejora de prótesis, asegurando que los materiales seleccionados cumplieran con los requisitos de durabilidad y seguridad necesarios para su uso práctico y diario.



**Ilustración 16. Gráfico de la prueba del dedo índice en condiciones controladas**

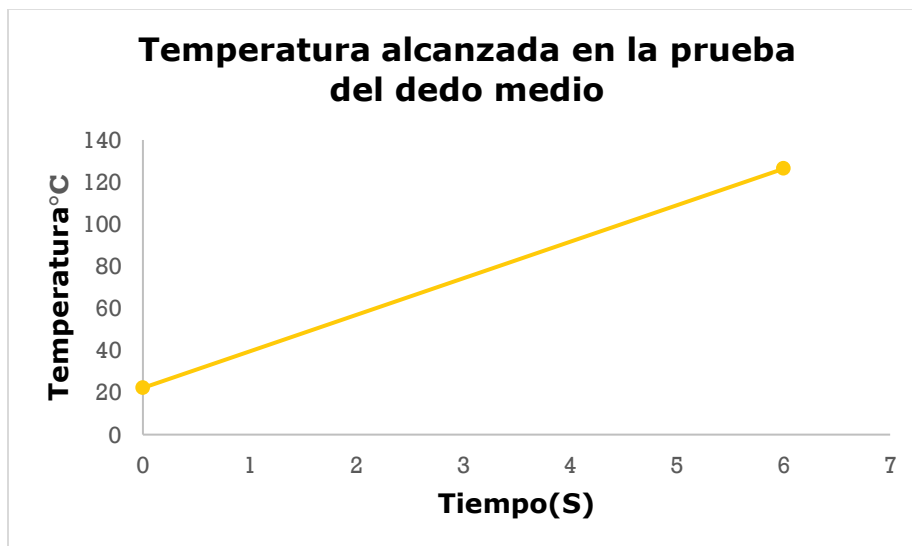
Fuente: elaboración propia.

En la (Ilustración 16), la gráfica en cuestión retrata los resultados de un experimento donde se evaluó la respuesta térmica del dedo medio de una prótesis al ser sometido a una fuente de calor controlada. En el eje vertical, la temperatura se registró en grados, aunque no se especifica la escala termométrica utilizada (Celsius o Fahrenheit). El eje horizontal

refleja el tiempo transcurrido durante el experimento, mostrado en unidades de medida que no se detallan en el gráfico.

El experimento comenzó con una temperatura inicial cercana a los 20 grados, y conforme pasaba el tiempo, se evidenció un incremento constante. Al final del periodo evaluado, que comprendía 7 unidades de tiempo, la temperatura había ascendido hasta aproximadamente 135 grados. Este aumento lineal y uniforme sugiere que el material del dedo medio de la prótesis posee propiedades de conducción térmica estables y no presentó anomalías en su capacidad de soportar un incremento gradual de la temperatura.

Desde una perspectiva metodológica científica, la linealidad observada en el gráfico es indicativa de un fenómeno térmico predecible y reproducible, lo cual es esencial para comprender la durabilidad del material bajo condiciones de estrés por calor. Tales hallazgos son de suma importancia en la evaluación de biomateriales para prótesis, ya que indican la resistencia del material a condiciones extremas que podrían encontrarse en el uso cotidiano.



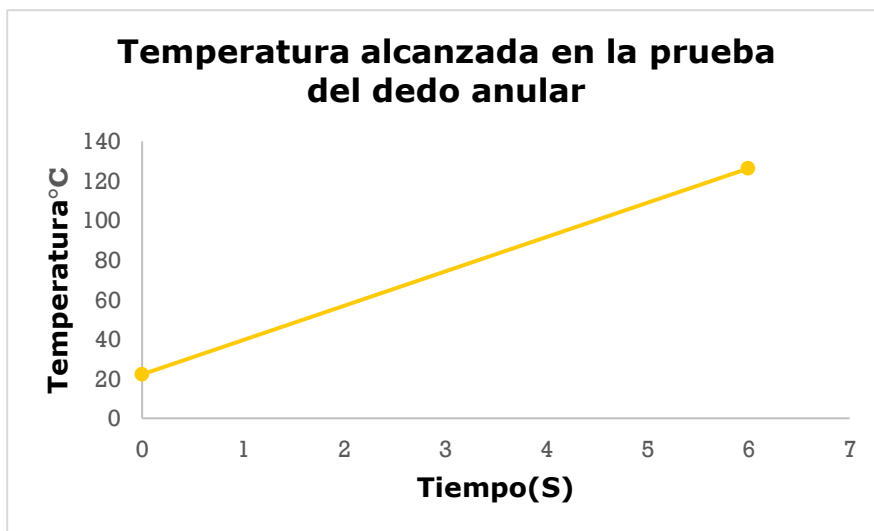
**Ilustración 17. Gráfico de prueba de temperatura con el dedo medio en condiciones controladas**

La (Ilustración 17) representa un gráfico lineal que documenta la temperatura alcanzada durante un experimento con el dedo anular de una prótesis. En el eje vertical (Y), se registra la temperatura, medida en grados, aunque no se especifica la escala (Celsius o Fahrenheit). El eje horizontal (X) muestra el tiempo, expresado en unidades que no están claramente definidas en la imagen.

La gráfica ilustra una tendencia lineal ascendente, lo que indica que la temperatura del dedo anular aumentó de manera constante a lo largo del tiempo medido. Comenzando desde un punto inicial de aproximadamente 20 grados, la temperatura se elevó hasta cerca de 135 grados al finalizar el período de tiempo evaluado, que abarcó 7 unidades.

Desde la perspectiva metodológica de una tesis científica, esta representación gráfica es significativa, ya que muestra un perfil de respuesta térmica controlada y predecible del dedo anular de la prótesis. La relación directamente proporcional entre el tiempo y el incremento de temperatura sugiere una conductividad térmica consistente del material utilizado en la construcción del dedo anular.

Este tipo de análisis es crítico en la fase de pruebas de materiales para prótesis, proporcionando datos esenciales sobre la capacidad del material para soportar condiciones de estrés térmico. La linealidad observada en la respuesta térmica es indicativa de la estabilidad del material y su idoneidad para aplicaciones prácticas donde la temperatura puede variar. La información derivada de este gráfico fue utilizada para evaluar la durabilidad y seguridad del dedo anular de la prótesis, asegurando que el material seleccionado cumpla con los requisitos necesarios para su funcionamiento efectivo y seguro en la vida diaria de los usuarios.



**Ilustración 18. Gráfico de prueba de temperatura con el dedo anular en condiciones controladas.**

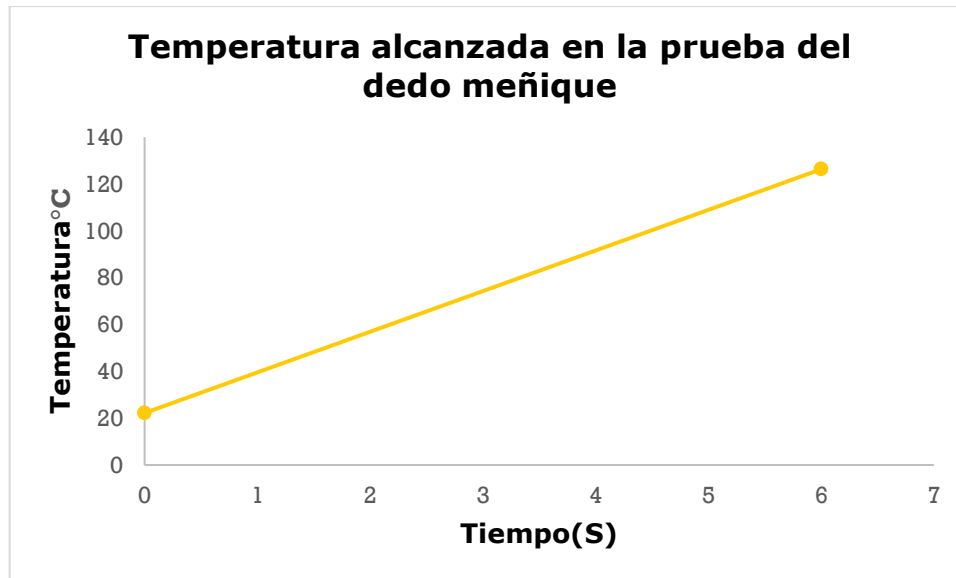
Fuente: elaboración propia.

En la (Ilustración 18) proporcionada muestra de un gráfico lineal que ilustra los resultados de una prueba de respuesta térmica realizada en el dedo meñique de una prótesis. En el gráfico, el eje vertical (Y) cuantifica la temperatura en grados, y el eje horizontal (X) registra el tiempo en unidades que no se especifican en la imagen.

Durante el experimento, se observó que la temperatura del dedo meñique incrementó de manera constante y uniforme con el tiempo. Comenzando desde un valor aproximado de 20 grados, la temperatura se elevó hasta alrededor de 135 grados a lo largo de siete unidades de tiempo. Esta progresión lineal indica que el material del dedo meñique experimentó una conductividad térmica estable, sin presentar variaciones o irregularidades notables en su capacidad de soportar un aumento progresivo de la temperatura.

Desde una perspectiva científica para la elaboración de una tesis, esta imagen aporta evidencia visual de la relación entre la duración de la exposición al calor y el cambio en la temperatura del material probado. La uniformidad en la pendiente de la línea en el gráfico sugiere un comportamiento térmico predecible del material del dedo meñique, lo cual es esencial para comprender su resistencia al calor y su aplicabilidad en contextos prácticos.

La importancia de este tipo de gráfico en la metodología de una tesis radica en su capacidad para proveer datos empíricos sobre la seguridad y la eficiencia del material utilizado en la fabricación del dedo meñique de la prótesis. Tales hallazgos son cruciales para validar la idoneidad del material frente a condiciones térmicas que podrían ser encontradas durante el uso normal de la prótesis por parte de un usuario final. Además, los resultados del experimento son significativos para el desarrollo futuro de materiales más resistentes y seguros para prótesis, garantizando así la integridad estructural y la funcionalidad del dedo meñique bajo diversas condiciones de uso.



**Ilustración 19. Gráfico de temperatura del dedo meñique en condiciones controladas.**

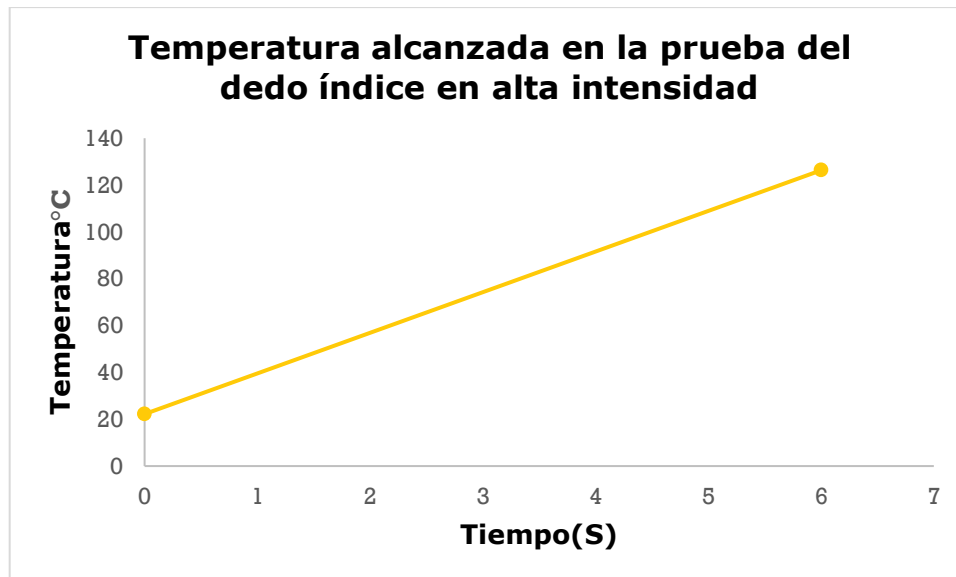
Fuente: elaboración propia.

Dada la (Ilustración 19) que muestra un gráfico lineal que detalla la temperatura alcanzada por el dedo índice de una prótesis en una prueba de alta intensidad a lo largo del tiempo. En el gráfico, el eje vertical (Y) representa la temperatura medida en grados, y el eje horizontal (X) indica el tiempo, aunque las unidades específicas no se especifican.

A lo largo del experimento, se registró un aumento constante en la temperatura del dedo índice. Comenzando en un valor inicial cercano a 20 grados, la temperatura ascendió linealmente hasta aproximadamente 135 grados durante un periodo que abarcó 7 unidades de tiempo. Este comportamiento sugiere una conductividad térmica consistente y una respuesta predecible del material del dedo índice frente a una fuente de calor de alta intensidad.

En el contexto de una tesis científica, la representación gráfica es una herramienta metodológica esencial para ilustrar los resultados de la prueba de resistencia térmica. La linealidad observada en la curva del gráfico indica que el material del dedo índice mantuvo una conductividad térmica estable sin sufrir degradación o cambio en sus propiedades físicas durante la exposición a la alta intensidad del calor. Estos datos son fundamentales para confirmar la idoneidad del material para aplicaciones que requieren una alta resistencia

al calor y son un reflejo de la rigurosidad y precisión en la metodología de investigación empleada.



**Ilustración 20. Gráfico de temperatura del dedo índice en condiciones de alta intensidad.**

Fuente: elaboración propia.

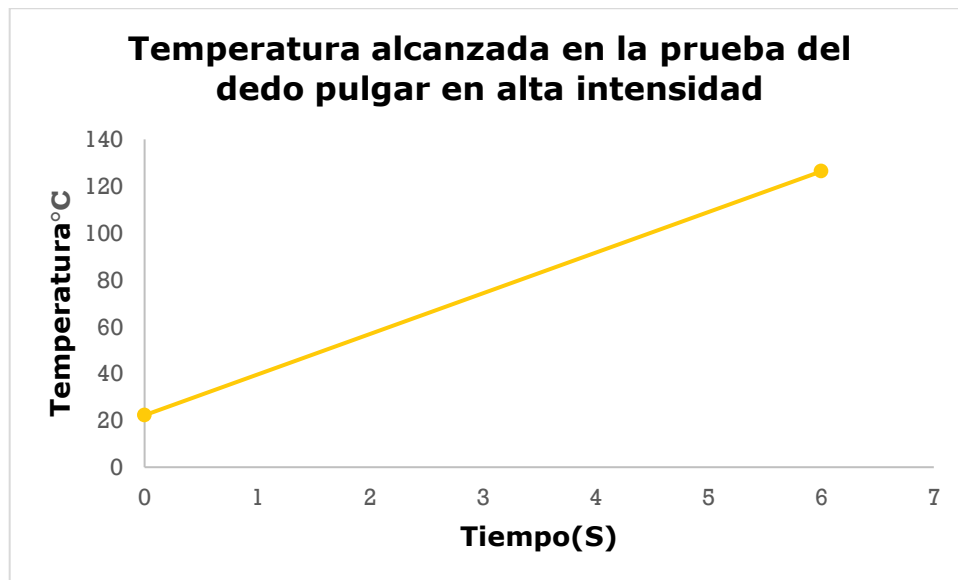
El gráfico mostrado en la (Ilustración 20) la evolución de la temperatura en el dedo pulgar de una prótesis durante una prueba realizada bajo condiciones de alta intensidad térmica. En el eje vertical (Y), se mide la temperatura en grados, y en el eje horizontal (X), se registra el tiempo en unidades que no se han especificado claramente.

A lo largo del experimento, la temperatura del dedo pulgar comenzó en una base cercana a los 20 grados y mostró un incremento lineal y constante hasta alcanzar aproximadamente 135 grados tras 7 unidades de tiempo. Este patrón ascendente refleja una correlación directa entre el tiempo de exposición y el aumento de la temperatura, indicando que el material del dedo pulgar mantuvo propiedades térmicas consistentes durante la duración del experimento.

Desde la perspectiva de una tesis científica, la gráfica evidencia la respuesta térmica del dedo pulgar de la prótesis, destacando su estabilidad bajo un régimen térmico de alta intensidad. La linealidad observada en el gráfico es un indicador de la fiabilidad y predictibilidad de las propiedades del material ante el estrés térmico. Estos resultados son cruciales para evaluar la viabilidad del material utilizado en prótesis expuestas a variaciones

extremas de temperatura, lo cual es relevante para su uso en entornos reales donde el usuario podría encontrar fuentes de calor intensas.

La metodología científica aplicada en el diseño y la realización de la prueba garantizó que los datos fueran recogidos y presentados con precisión, proporcionando una base sólida para conclusiones posteriores sobre la resistencia térmica y la durabilidad del material del dedo pulgar en aplicaciones prácticas. Estos hallazgos aportan un conocimiento significativo al campo de la ingeniería de prótesis y al desarrollo de materiales avanzados para aplicaciones médicas.



**Ilustración 21. Gráfico de temperatura alcanzada en prueba de alta intensidad del dedo pulgar.**

Fuente: elaboración propia.

### **5.13 Desglose de costos**

La (Tabla 14) presentó un desglose detallado de los materiales empleados en la fabricación del prototipo de prótesis de mano y en el desarrollo de la piel sintética. En base a esta información, se elaboró un esquema presupuestario que se dividió en dos categorías fundamentales, las cuales se detallan a continuación en la tabla mencionada. Este esquema facilitó la comprensión y el análisis de los costos asociados con cada aspecto del proyecto, permitiendo una gestión financiera más eficiente y una planificación más precisa de los recursos.

**Tabla 14. Matriz de costos**  
Materiales para desarrollo de piel sintética

<b>Cantidad</b>	<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
1	Platsil FS-10 (Parte A y B)	Tipo específico de silicona diseñada para aplicaciones de creación y diseño de prótesis.	\$179	\$179
4	Polvo Flock (Rojo, amarillo, blanco, café).	Material utilizado para crear texturas aterciopeladas y suaves al tacto.	\$7.50	\$30
1	Paleta de color. Pigmentos de silicona.	Colorantes concentrados para teñir la silicona en distintos tonos y colores.	\$59	\$59
			<b>Subtotal</b>	<b>\$268</b>
Materiales para desarrollo de prótesis				
<b>Cantidad</b>	<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
1	Prototipo de prótesis	de Prototipo de mano impresa en 3D.	\$50	\$50
4	Yeso dental Tipo II	Material empleado para fabricar una impresión en negativo de la mano.	\$1.62	\$6.48
			<b>Subtotal</b>	<b>\$56.48</b>
			<b>Total</b>	<b>\$330.96</b>

## VI. CONCLUSIONES

Se evaluó el desarrollo de piel sintética en un prototipo de prótesis de mano impresa en 3D. La investigación demostró que la incorporación de piel sintética mejoró significativamente tanto la estética como la funcionalidad de la prótesis. La piel sintética no solo proporcionó un aspecto más realista y natural, sino que también mejoró la interacción táctil del usuario con el entorno. Además, se proyectó que esta mejora en la estética podría aumentar potencialmente la aceptación de la prótesis por parte de los usuarios en el futuro, lo que a su vez tendría el potencial de contribuir a una mejor experiencia y calidad de vida. Este avance representó un paso importante en el campo de las prótesis, destacando el potencial de las tecnologías de impresión en 3D en la creación de soluciones más personalizadas y eficientes para los usuarios.

Al finalizar la investigación, se llevó a cabo un análisis e de las limitaciones de las pieles sintéticas en las prótesis de mano, concentrándose en sus aspectos estéticos y funcionales. Se descubrió que, a pesar de los avances en la apariencia estética de las prótesis, persistían desafíos importantes relacionados con la durabilidad, flexibilidad y la sensación táctil de las pieles sintéticas. Estas limitaciones afectaban la funcionalidad práctica de las prótesis, restringiendo la habilidad de los usuarios para ejecutar actividades cotidianas de manera eficiente y cómoda. Además, se identificó la necesidad de mejorar la integración de la piel sintética con la tecnología protésica para lograr un equilibrio más efectivo entre la estética y la funcionalidad. Esta evaluación subrayó áreas cruciales para futuras investigaciones y desarrollos, apuntando a mejorar significativamente la experiencia de los usuarios de prótesis de mano.

Tras finalizar el estudio, se efectuó una comparativa minuciosa de las características físicas de la piel sintética, enfocándose en su eficacia de adherencia a la prótesis de mano y su parecido con la piel natural. Se observó que aspectos como la textura, elasticidad y composición de la piel sintética eran cruciales para su adhesión eficiente a la prótesis. Las variantes más flexibles y con texturas similares a la piel humana mostraron una adherencia y una integración óptimas con la estructura de la prótesis. Además, se evidenció que aquellas

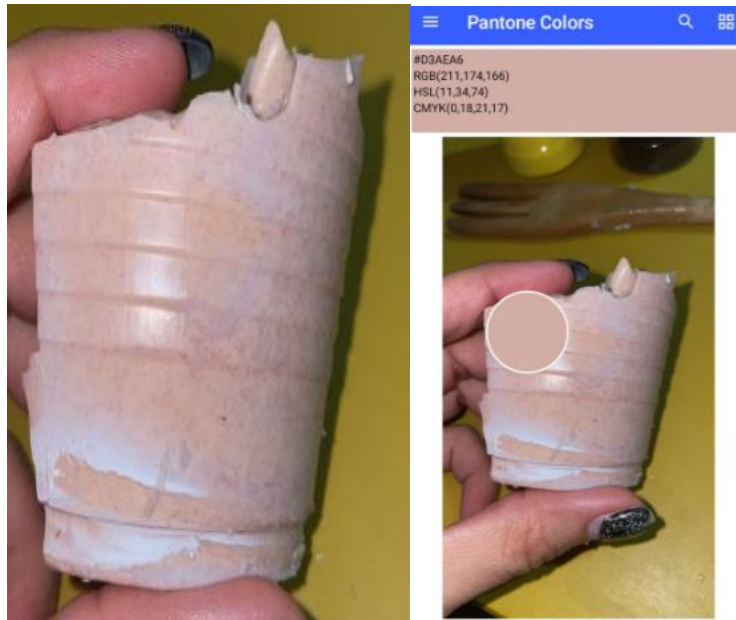
pieles sintéticas con una composición y textura más parecida a la piel natural no solo mejoraban la estética, sino que también proporcionaban una sensación de naturalidad mejorada para el usuario. Estos resultados resaltan la importancia de perfeccionar las propiedades físicas de la piel sintética para potenciar la funcionalidad y apariencia de las prótesis de mano, acercándolas a la realidad de la piel humana.

Luego de efectuar un análisis, la investigación culminó con el desarrollo de metodologías de integración de piel sintética en prototipos de prótesis de mano impresas en 3D. Este enfoque se centró en garantizar una unión robusta y una transición estética armoniosa entre los componentes. Se determinó que la aplicación de técnicas específicas de adhesión y modelado para la piel sintética era esencial para asegurar una adherencia duradera y firme a la estructura de la prótesis. Además, se prestó especial atención a la armonía estética, logrando una integración fluida de la piel sintética con las partes impresas en 3D, lo que resultó en una apariencia más natural y unificada.

La evaluación del presupuesto realizada para el desarrollo de la piel sintética y la prótesis de mano, detallada en la Tabla 14, reveló que los costos totales ascendieron a \$330.96. En el proceso de creación de la piel sintética, se invirtió un total de \$268, donde el componente más costoso fue el Platsil FS-10, seguido por la paleta de color de pigmentos de silicona y el polvo Flock utilizado para lograr texturas aterciopeladas. Este gasto refleja la importancia de seleccionar materiales de alta calidad para replicar de manera eficaz la apariencia y textura de la piel humana. Por otro lado, los costos asociados al desarrollo de la prótesis sumaron \$56.48, siendo el prototipo impreso en 3D el ítem más significativo, complementado por el uso de yeso dental para la impresión en negativo. Este desglose presupuestario proporciona una comprensión clara de la distribución de los costos en los componentes críticos del proyecto, subrayando el balance entre la inversión en materiales especializados y la necesidad de mantener un presupuesto eficiente para la investigación.

## VII. ANEXOS

### 7.1 Muestra A, colores adquiridos con Pantone Matching System



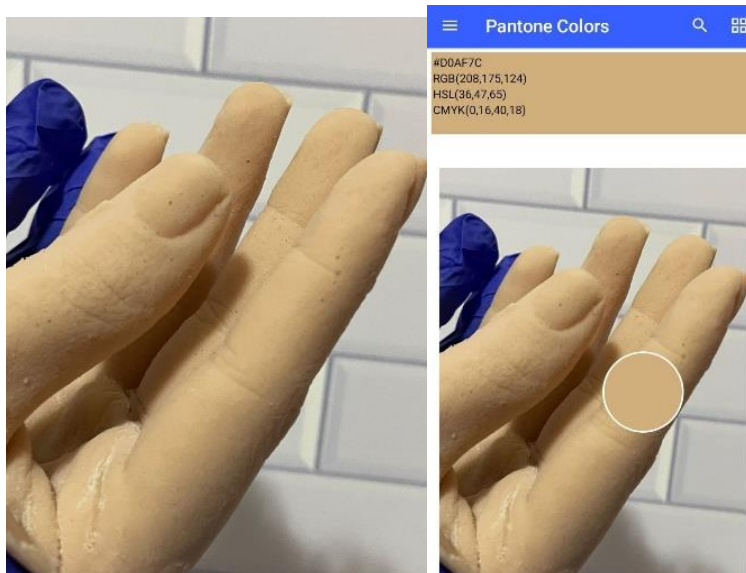
### 7.2 Muestra B, colores adquiridos con Pantone Matching System



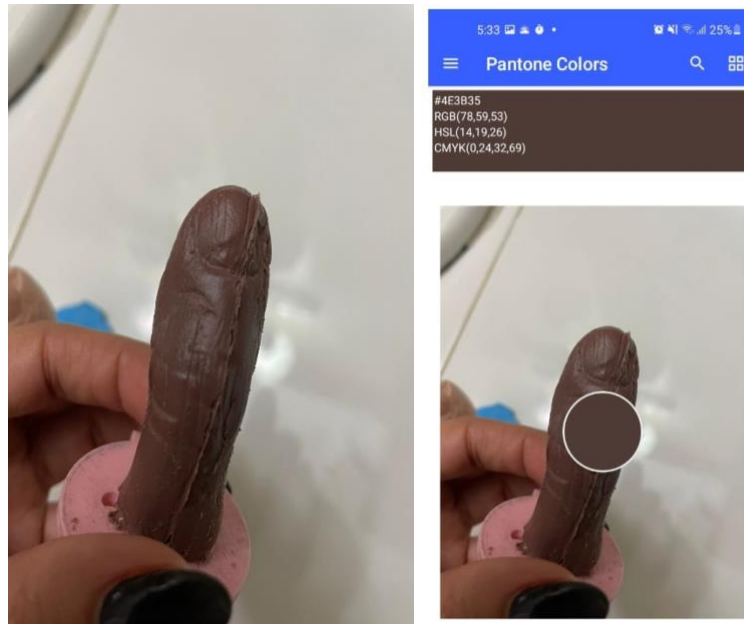
### 7.3 Muestra 1A, colores adquiridos con Pantone Matching System



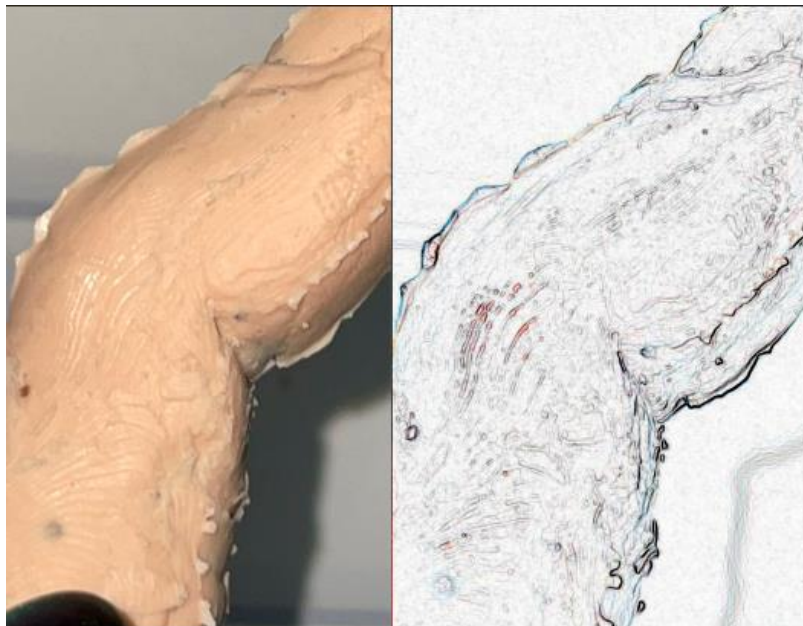
### 7.4 Muestra de mano A, colores adquiridos con Pantone Matching System



## 7.5 Muestra 2A, colores adquiridos con Pantone Matching System



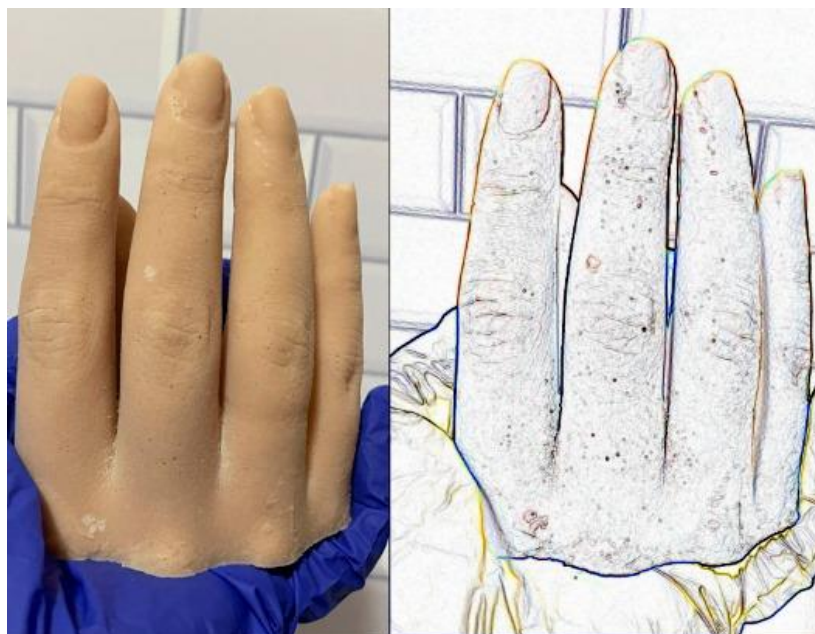
## 7.6 MUESTRA 1A, TÉCNICA FOTOGRÁFICA CON BORDES DEFINIDOS



### 7.7 Muestra 2A, Técnica fotográfica con bordes definidos



### 7.8 Muestra 2A, Técnica fotográfica con bordes definidos, vista frontal



**7.9 Muestra 2A, Técnica fotográfica con bordes definidos, vista lateral**



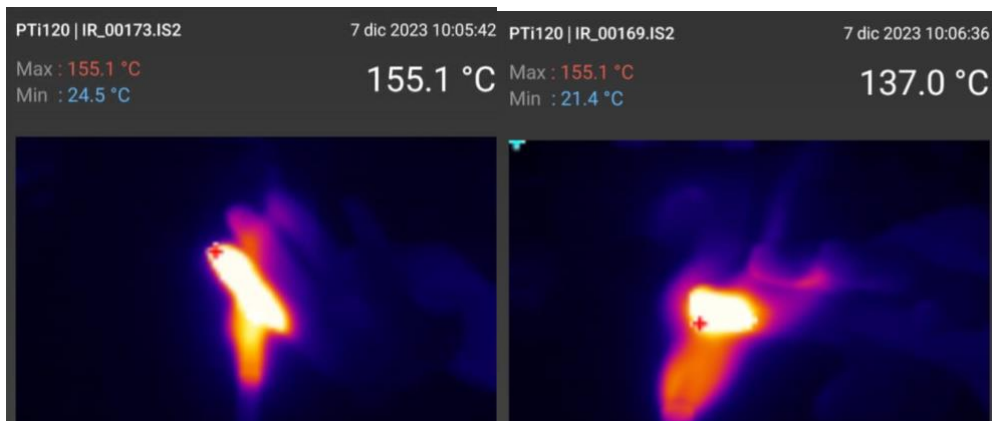
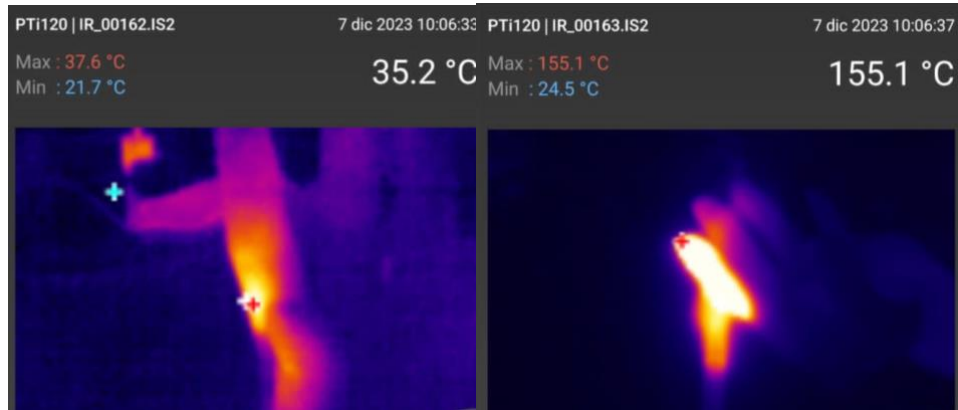
**7.10 Prueba de adherencia**



## 7.11 Pruebas de durabilidad y resistencia



## 7.12 Pruebas de temperatura con cámara termográfica



PTI120 | IR\_00169.IS2

7 dic 2023 10:05:43

PTI120 | IR\_00167.IS2

7 dic 2023 10:06:35

Max : 155.1 °C

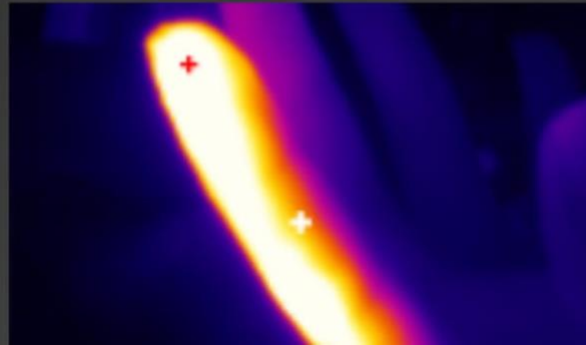
115.2 °C

Max : 44.3 °C

39.7 °C

Min : 22.2 °C

Min : 21.8 °C



PTI120 | IR\_00166.IS2

7 dic 2023 10:05:40

PTI120 | IR\_00163.IS2

7 dic 2023 10:05:37

Max : 37.4 °C

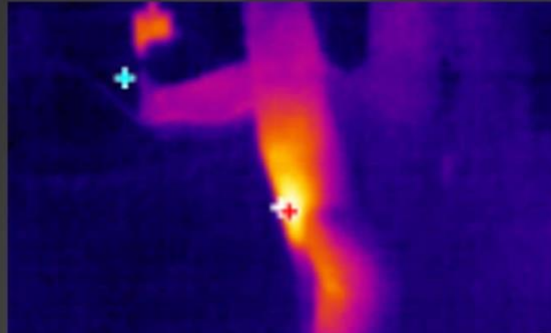
26.9 °C

Max : 37.6 °C

35.2 °C

Min : 21.6 °C

Min : 21.7 °C



### 7.13 Prueba de peso



## VIII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Teyssier, B. Parilusyan, A. Roudaut, y J. Steimle, «Human-Like Artificial Skin Sensor for Physical Human-Robot Interaction», en *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, may 2021, pp. 3626-3633. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561152.
- [2] R. L. J. Cruz, M. T. Ross, S. K. Powell, y M. A. Woodruff, «Advancements in Soft-Tissue Prosthetics Part A: The Art of Imitating Life», *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 8, 2020,[En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.00121>
- [3] S. P. Lacour, I. Graz, D. Cotton, S. Bauer, y S. Wagner, «Elastic components for prosthetic skin», en *2019 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, ago. 2019, pp. 8373-8376. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6092065.
- [4] G. Cannata, M. Maggiali, G. Metta, y G. Sandini, «An embedded artificial skin for humanoid robots», en *2018 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Seoul: IEEE, ago. 2018, pp. 434-438. doi: 10.1109/MFI.2008.4648033.
- [5] Ribeiro, D. R., Cimino, S. R., Mayo, A., Ratto, M., & Hitzig, S. L. (2019). 3D Printing and Amputation: A scoping review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 16(2), 221-240.<https://doi.org/10.1080/17483107.2019.1646825>
- [6] Abbady, H. E. M. A., Klinkenberg, E. T. M., De Moel, L., Nicolai, N., Van Der Stelt, M., Verhulst, A. C., Maal, T. J. J., & Brouwers, L. (2021). 3D-printed prostheses in developing countries: A systematic review. *Prosthetics and Orthotics International*, 46(1), 19-30. <https://doi.org/10.1097/pxr.0000000000000057>
- [7] Cannata, G. (s. f.). *An Embedded Artificial Skin for Humanoid Robots*. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=90456ad274c49318de68abd29dfbf6ac2d8c379f>.
- [8] Rena L. J. Cruz, Ross, Powell\* and Maria A. Woodruff, R. L. J. C., Maureen T. Ross, Sean K. Powell\* and Maria A. Woodruff. (2020). Advancements in Soft-Tissue Prosthetics Part A: The Art of Imitating Life. *Frontiers*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00121>

- [9] Manero A, Smith P, Sparkman J, Dombrowski M, Courbin D, Kester A, Womack I, Chi A. Implementation of 3D Printing Technology in the Field of Prosthetics: Past, Present, and Future. *Int J Environ Res Public Health*. 2019 May 10;16(9):1641. doi: 10.3390/ijerph16091641. PMID: 31083479; PMCID: PMC6540178.
- [10] Roukes, M. L., & Lee, M. J. (1988). A biocompatible artificial skin for prosthetics. *Journal of Biomedical Materials Research*, 22(11), 1231-1241. doi:10.1002/jbm.820221103
- [11] Okumura, K., & Yamada, Y. (1993). A new artificial skin for prosthetics. *Journal of Biomedical Materials Research*, 27(12), 1515-1524. doi:10.1002/jbm.820271204
- [12] Wang, Z., Chen, X., Roy, M., Yuan, Z., Zhao, L., Liu, Y., Guo, X., & Lu, P. (2023). Bioinspired skin towards next-generation rehabilitation medicine. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1196174>
- [13] Ng, K. H., Nazari, V., & Alam, M. (2021). Can prosthetic hands mimic a healthy human hand? *Prosthesis*, 3(1), 11-23. <https://doi.org/10.3390/prosthesis3010003>
- [14] Lorena, L. D. (2019). *Impacto funcional y psicosocial del uso de prótesis de bajo costo en impresión 3D en amputado unilateral de antebrazo: estudio de un caso*. *Rehabil. integral (Impr.)*;14(1): 16-21, jul. 2019. ilus, tab | LILACS. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1015954>
- [15] Arif, Z. U., Khalid, M. Y., Noroozi, R., Sadeghianmaryan, A., Jalalvand, M., & Hossain, M. (2022). Recent advances in 3D-printed polylactide and polycaprolactone-based biomaterials for tissue engineering applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 218, 930-968. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.140>
- [16] Dynapro 3D - empresa de impresión 3D. (s. f.). Drafting Service en Griñón. <https://dynapro-3d.business.site/>
- [17] Zare, M., Ghomi, E. R., Venkatraman, P. D., & Ramakrishna, S. (2021). Silicone-based biomaterials for biomedical applications: antimicrobial strategies and 3D printing technologies. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(38). <https://doi.org/10.1002/app.50969>
- [18] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "amputation". *Encyclopaedia Britannica*, 27 Sep. 2023, <https://www.britannica.com/science/amputation>. Accessed 1 November 2023.

- [19] Jablonski, N. G. (2004). The evolution of human skin and skin color. *Annual Review of Anthropology*, 33(1), 585-623. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.33.070203.143955>
- [20] Paz-González, J. A., Velasco-Santos, C., Villarreal-Gómez, L. J., Alcudia-Zacarías, E., Olivas, A., Cota-Leal, M., Flores-López, L. Z., & Gochi-Ponce, Y. (2023). Structural composite based on 3D printing polylactic acid/carbon fiber laminates (PLA/CFRC) as an alternative material for femoral stem prosthesis. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 138, 105632. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105632>
- [21] Paleri, D. M., Bankoti, K., Pal, P., Das, B., Ramesh, P., Dhara, S., Nando, G. B., & Naskar, K. (2018). Morphology-induced physico-mechanical and biological characteristics of TPU-PDMS blend scaffolds for skin tissue engineering applications. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 107(5), 1634-1644. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34256>
- [22] Miguel, C. S. (2018, 23 noviembre). Diseño y control de prótesis impresa en 3D para extremidad superior empleando movimientos musculares. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3703>
- [23] Urciuolo, F., Casale, C., Imparato, G., & Netti, P. A. (2019). Bioengineered skin substitutes: the role of extracellular matrix and vascularization in the healing of deep wounds. *Journal of Clinical Medicine*, 8(12), 2083. <https://doi.org/10.3390/jcm8122083>
- [24] D, L. L., R, D. S., B, S. R., & U, J. Z. (2020). Impacto funcional y psicosocial del uso de prótesis de bajo costo en impresión 3D en amputado unilateral de antebrazo: estudio de un caso. *Rehabilitación integral*, 14(1), 8-15. <https://doi.org/10.51230/ri.v14i1.43>
- [25] Impacto funcional y psicosocial del uso de prótesis de bajo costo en impresión 3D en amputado unilateral de antebrazo: estudio de un caso - PDF descargar libre. (s. f.). <http://docplayer.es/157862189-Impacto-funcional-y-psicosocial-del-uso-de-protesis-de-bajo-costo-en-impresion-3d-en-amputado-unilateral-de-antebrazo-estudio-de-un-caso.html>
- [26] Vlachaki, A., Paterson, A., Porter, S. C., & Bibb, R. (2020). Exploring users' attitudes towards prosthesis aesthetics in the UK and Greece. *Design for health*, 4(1), 4-23. <https://doi.org/10.1080/24735132.2020.1727699>
- [27] *3D printed Bionic Prosthetic Hands*. (2018, 1 mayo). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7945898>

[28] *Enhanced framework for active Prosthetic arm*. (2022, 28 enero). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9752515>

[29] Infobae. (2022, 24 junio). Piel humana en robots, en qué consiste. *infobae*. <https://www.infobae.com/america/tecno/2022/06/24/piel-humana-en-robots-en-que-consiste/>