

Diseño de un protocolo para asegurar la integración de atributos tácitos en la digitalización de procesos artesanales de diseño y fabricación, orientados por tecnologías CAD/CAM.

Jesús Alexis Machuca Gelvez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Magíster en Innovación y Diseño

Director

PhD Clara Isabel López Guadrón

Codirector

PhD Luis Eduardo Bautista Rojas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías físico-mecánicas

Escuela de diseño industrial

Maestría en Innovación y Diseño

Bucaramanga

2025

## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	7
2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	8
3	ANTECEDENTES.....	11
4	JUSTIFICACIÓN .....	13
5	MARCO TEORICO .....	15
5.1	El Conocimiento como base conceptual para la definición de procesos de desarrollo de nuevo producto.....	15
5.2	Conocimiento explicito y tácito.....	16
5.3	Modelo relacional del conocimiento de Vincenti (1990) .....	16
5.4	El Conocimiento Tácito en la Manufactura Artesanal.....	17
5.5	Gestión del conocimiento.....	18
5.5.1	Adquisición del conocimiento.....	19
5.5.2	Almacenamiento del Conocimiento.....	20
5.5.3	Transferencia de conocimientos.....	20
5.6	Aplicación del conocimiento .....	20
6	Técnicas de desarrollo de prótesis.....	21
6.1	Proceso de base manual.....	21
6.2	Técnica basada en manufactura digital.....	24
6.3	Ingeniería inversa .....	25
6.4	Modelado CAD.....	25
6.5	Manufactura digital .....	27
7	Objetivos .....	28
7.1	OBJETIVO GENERAL.....	29
7.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	29
8	METODOLOGIA .....	29
9	RESULTADOS .....	31
9.1	-FASE 1 REVISIÓN DE LITERATURA PARA IDENTIFICAR ATRIBUTOS TÁCITOS NECESARIOS EN LA DIGITALIZACIÓN DE PROCESOS MANUALES DE MANUFACTURA.....	31
9.2	Materiales y métodos.....	32

9.3	Definición del alcance y el contexto .....	32
9.4	Identificación de las Keywords y búsqueda de literatura.....	32
9.5	Análisis de contenido y resultados .....	34
9.5.1	Categorización de los casos de estudio.....	34
9.6	OPR1: ¿Qué características del conocimiento tácito se tienen en cuenta para intervenir digitalmente un proceso de fabricación de base artesanal? .....	35
9.6.1	Atributos Clave del conocimiento tácito.....	35
9.6.2	Identificación de atributos tácitos procesos basados en Adaptación digital.....	38
9.6.3	Tecnologías convergentes aplicadas en Dispositivos médicos .....	38
9.6.4	Tecnologías convergentes aplicadas en Arquitectura.....	43
9.6.5	Técnicas para creación digital: Tallado .....	44
9.6.6	Automatización .....	45
9.6.7	Automatización en técnicas de cantería y trabajo de metales .....	45
9.6.8	Otras técnicas para la automatización .....	47
9.7	PR2: ¿Cómo se emulan los atributos tácitos clave en una intervención digital a la técnica convencional? .....	48
9.7.1	Adaptación digital .....	48
9.7.2	Automatización .....	51
9.8	Marco de Referencia .....	52
10	FASE 2 ESTUDIO DE CAMPO ENTREVISTAS Y OBSERVACIONES DE CAMPO PARA EL CASO DE ESTUDIO PROCESO TRADICIONAL DE FABRICACIÓN DE SOCKETS.....	55
10.1	Entrevistas semiestructuradas .....	55
10.2	Análisis de datos .....	56
10.2.1	Codificación.....	56
10.2.2	Nivel cognitivo según el marco SRK .....	56
10.2.3	Consideraciones previas .....	58
10.2.4	Molde negativo .....	59
10.2.5	Molde positivo .....	60
10.2.6	Región proximal .....	62
10.2.7	Región distal.....	63
10.3	Temas y categorización .....	64
10.4	Interpretación.....	64
10.5	Análisis jerárquico de tareas .....	66
10.5.1	Consideraciones previas y Molde negativo .....	67
10.5.2	Molde positivo, Región distal y proximal.....	68

10.6	Observaciones de campo .....	70
10.6.1	Observación Laboratorio A .....	70
10.6.2	Observación Laboratorio B .....	74
10.6.3	Observación laboratorio C .....	79
10.7	Diagrama del conocimiento tácito de la técnica .....	86
11	FASE 3 DIGITALIZACIÓN DEL METODO CONVENCIONAL DE FABRICACIÓN DE SOCKETS .....	90
11.1	Digitalización a la técnica .....	91
11.2	Integración del conocimiento tácito en la digitalización.....	93
11.3	Esfuerzo cognitivo del proceso digital.....	94
11.4	Algoritmo de emulación de la técnica .....	96
11.5	Verificaciones al algoritmo .....	97
11.6	Diagnóstico del algoritmo.....	99
11.7	Guías de rectificaco para las modificaciones al modelo digital .....	100
11.7.1	Diseño de las guías.....	101
11.8	Diagrama de flujo del proceso digital.....	103
11.9	Aplicación del algoritmo .....	105
12	FASE 4 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DIGITAL PARA EL METODO DE FABRICACIÓN DE SOCKETS .....	107
12.1	Diseño de la prueba.....	107
12.2	Pasos del modelado CAD.....	107
12.3	Mecánica de herramienta de esculpido digital .....	108
12.4	Participantes.....	109
12.5	Análisis de datos .....	110
12.6	Resultados .....	110
12.6.1	Calidad de la reconstrucción.....	110
12.6.2	Esfuerzo cognitivo.....	116
13	CONCLUSIONES.....	118
14	RECOMENDACIONES.....	120
15	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Relación conocimiento explícito y tácito (Vicenti , 1990).	17
Figura 2 Tipos de conocimiento desde el artefacto.	18
Figura 3 fases de la gestión del conocimiento.	18
Figura 4 Componentes estandarizados y a medida de la prótesis, tomado de (Paternò et al., 2018).	22
Figura 5 Izquierda regiones anatómicas del socket y Derecha tipos de socket según nivel de amputación.	23
Figura 6 Ilustraciones del proceso artesanal. a toma del molde negativo b molde positivo c modificación del molde de laminado del molde tomado de (Amrutsagar et al., 2020).	23
Figura 7, identificación de atributos tácitos y explícitos del método. Fuente del autor.	24
Figura 8 Izquierda modelado CAD por superficies, derecha modelado CAD por malla. Fuente autor	26
Figura 9 IA  lado izquierdo dispositivo háptico para el diseño del socket, presión sobre la superficie del modelo con la herramienta de esculpido tomado de (Facoetti et al., 2014); Centro modelado con hand tracking, selección y modificación de puntos de control en región proximal tomado de (Colombo et al., 2015). Derecha Socket paramétrico base transfemoral tipo cuadrilateral tomado de (Amrutsagar et al., 2020).	27
Figura 10 Metodología de la revisión.	32
Figura 11 Selección de resultados.	34
Figura 12 Categorías de los casos de estudio.	35
Figura 13 Características para el análisis de los documentos seleccionados.	36
Figura 14 Marco de referencia para la categoría adaptación digital.	53
Figura 15 Marco de referencia para la categoría automatización.	54
Figura 16 Temas y categorías según atributos tácitos.	66
Figura 17 Reconstrucción muñón digital. Izquierda mediciones análogas realizadas	72
Figura 18 obtención de datos de la geometría del paciente. Izquierda caso de estudio 1. Derecha caso de estudio 2.	75
Figura 19 Regiones anatómicas marcadas por el técnico. Izquierda caso <b>P2</b> , derecha caso <b>P3</b> .	75
Figura 20 obtención de geometría digital del muñón. Izquierda caso <b>P3</b> y derecha caso <b>P2</b> .	76
Figura 21 interfaz blanda.	78
Figura 22 Pasos de la captura de la geometría del muñón (molde negativo), Observación de campo C.	80
Figura 23 Regiones críticas marcadas por el técnico. Izquierda marcaciones; Derecha regiones marcadas en el modelo digital.	81
Figura 24 construcción de interfaz blanda	86
Figura 25 Atributos tácitos clave en la fabricación de sockets.	87
Figura 26 Diagrama general de la técnica con detalle de conocimiento tácito parte molde negativo.	87
Figura 27 Diagrama general de la técnica con detalle de conocimiento tácito parte molde positivo.	88
Figura 28 Diagrama general de la técnica con detalle de conocimiento tácito parte liberaciones en el molde positivo y Región distal.	89
Figura 29 Diagrama general de la técnica con detalle de conocimiento tácito parte región proximal.	89

Figura 30 Intervención a la técnica convencional con tecnologías digitales _____	92
Figura 31 Cambio digital en la fase de obtención de geometría del muñón. Las tareas en gris permanecen sin cambios. _____	94
Figura 32 Aplicación del algoritmo digital, al paciente de observación de campo A. _____	97
Figura 33 Comparación de mallas sockets modelados con algoritmo de la digitalización a la técnica. 1 caso <b>P1</b> . 2 caso <b>P3</b> . 3 caso <b>P2</b> . _____	98
Figura 34 la impresión del socket y la apreciación de técnico. _____	99
Figura 35 Guía de rectificado fosa poplítea. Derecha construcción convencional de la rectificación. Centro parámetros de la guía y algoritmo en Grasshopper. Derecha Volumen de la guía con curva base. _____	102
Figura 36 Posicionamiento de la guía fosa poplítea. 1 marcador de la fosa en el modelo digital del muñón. 2 marcador esférico en la curva base de la guía. 3 detalle vista posterior ubicación del a guía con el gumball marcador al nivel de la fosa. 4 detalle vista lateral marcador entrando a mitad del modelo digital. 5 diferencia booleana del volumen de la guía en el modelo digital. _____	103
Figura 37 Diagrama de flujo algoritmo digital. Izquierda Obtención de la geometría. Derecha Alineación modelo digital. _____	104
Figura 38 Diagrama de flujo 3 Rectificaciones de presión y liberación. Y zona proximal. _____	105
Figura 39 Desarrollo del socket aplicado al cado de estudio del a observación de campo C. _____	106
Figura 40 Muñón y molde positivo para la prueba de diseño de socket. Izquierda muñón. Derecha molde. _____	107
Figura 41 Mecánica de herramienta subdivisiones para esculpido digital. _____	109
Figura 42 Comparación de superficies de la prueba de modelado. Izquierdas vistas principales en franja de colores. Derecha diagrama de distancias aproximadas con la descripción en barras de tonalidades. _____	111
Figura 43 Diferencias significativas entre las secciones de la superficie control y socket modelado del participante 1. Azul sección del socket, amarillo sección de la superficie control. Medidas en milímetros. _____	112
Figura 44 Vista frontal de la comparación de superficies en los modelados de participantes. En tonalidades las regiones con mayor y menor coincidencia respecto a la superficie control. _____	113
Figura 45 Vista posterior de la comparación de superficies en los modelados de participantes. En tonalidades las regiones con mayor y menor coincidencia respecto a la superficie control. _____	114
Figura 46 Diferencias máximas y mínimas entre secciones de las regiones criticas identificadas ____	115
Figura 47 Resultados del esfuerzo cognitivo. Izquierda diagrama de barras del tiempo la dificultad promedio de la tarea. Derecha cantidad promedio de iteraciones de la tarea en las zonas específicas del modelo. _____	117

## 1 INTRODUCCIÓN

Los procesos de fabricación y diseño manual son fundamentales en la sociedad, por su uso diario. Por ejemplo, el calzado ortopédico hecho a mano por un experto técnico se adapta a las necesidades específicas del usuario, lo que le permite caminar con comodidad y recuperar la movilidad perdida debido a alguna enfermedad o condición en los pies. En este sentido, un aspecto crucial de estos procesos es el conocimiento adquirido por expertos a través de la experiencia y la práctica para dominar su oficio. Este conocimiento es tácito, es decir, no se puede explicar con palabras (Herschel R. N., 2001), y su codificación es compleja (Balconi, 2002) debido a que gran parte del proceso no puede ser expresado. Sin embargo, el conocimiento tácito se puede transmitir a través de la práctica. Por lo tanto, los métodos de estos procesos manuales están cargados de atributos tácitos que se ven reflejados en las interacciones entre el experto y el material, lo que permite crear un artefacto tangible y relevante. Siendo los hitos y atributos tácitos esenciales para el correcto diseño del artefacto (Siu & Dilnot, 2001).

Los procesos manuales son susceptibles a mejoras y modificaciones en sus métodos, con el objetivo de hacerlos más rápidos, eficientes y reducir los errores humanos (Alexandre, Salguero, Peralta, & Ares, 2017). De hecho, con la llegada de las industrias 3.0 y 4.0, se ha fomentado la transformación de las disciplinas y sus prácticas, con una marcada tendencia hacia la automatización y digitalización de los procesos de diseño y fabricación de productos (Hermann, Pentek, & Otto, 2015). En el campo del diseño, es cada vez más común el uso de tecnologías digitales en los procesos de fabricación y conceptualización de artefactos, como la impresión 3D y el software CAD (Diseño Asistido por Computadora). Se ha identificado una tendencia a digitalizar o realizar adaptaciones computacionales de procesos manuales

por medio de tecnologías CAD/CAM (diseño asistido por computadora/manufactura asistida por computadora) (Bonfanti, Del Giudice, & Papa, 2018).

Según lo expuesto, esta investigación se enfoca en integrar los conocimientos y atributos tácitos de los procesos artesanales de diseño según adaptaciones computacionales mediante tecnologías CAD/CAM, para garantizar la fiabilidad de la técnica mediante un caso de estudio. En este sentido, es esencial investigar cómo estos conocimientos y atributos tácitos permiten la creación de artefactos y cómo una adaptación digital responsable de su método podría mantener ese conocimiento implícito del experto, con el fin de lograr una replicabilidad, trazabilidad y confiabilidad en la generación de artefactos.

## **2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Actualmente, se observa una tendencia al uso de tecnologías digitales en diferentes áreas, incluyendo la configuración de procesos manuales de manufactura y diseño. Estos procesos están siendo modificados mediante tecnologías de fabricación digital con dos objetivos principales: explorar nuevas formas y geometrías (Bernabei & Power, 2018; Zoran, 2013) y mejorar la eficiencia en los procesos de diseño y fabricación (Alexandre, Gomez, & Valente, 2015; Jayawickrama, 2016). Esto plantea que las digitalizaciones a procesos manuales deben tener en cuenta el conocimiento tácito de la técnica para asegurar su fiabilidad, el cual se encuentra interiorizado en la mente del experto y se manifiesta de forma automática en sus acciones (Polanyi, 1966) y en el contexto de los procesos manuales su dimensión tácita se refiere a la habilidad manual para construir artefactos adquirida a través de la práctica (Risatti, 2007). En las prácticas de base manual se han identificado atributos tácitos relacionados con la interacción de los materiales y el ambiente en el que se realiza el proceso (Bofylatos & Spyrou, 2017). Ya que el experto

(artesano o técnico) al palpar, ver, o sentir el material desarrolla las actividades del método, y encuentra la manera correcta de diseñar el artefacto (Loh, Burry, & Wagenfeld, 2016; Siu & Dilnot, 2001).

Sin embargo, la intervención de estos procesos con tecnologías digitales, como las CAD/CAM o la manufactura digital, plantea dos desafíos, por un lado, el conocimiento tácito es difícil de transferir de forma escrita, verbal (Herschel, 2001), o codificada para su sistematización (Balconi, 2002). Y por el otro en cuanto a la conservación de los atributos tácitos que son fundamentales en la construcción de artefactos. El desarrollo de las actividades en un entorno virtual, donde las experiencias sensoriales con el material y el ambiente se transmutan a una virtualidad intangible, no permite la interacción directa con el material y su entorno necesaria para el correcto diseño del artefacto (Coons & Ratto, 2015), la tabla 1 ilustra el árbol del problema descrito.

La problemática mencionada se identificó en el área de dispositivos médicos, específicamente en el diseño de prótesis para miembro inferior. Si bien las prótesis son producidas con elementos estandarizados como la articulación de rodilla, el pie mecánico y piezas de unión entre otros. Adicionalmente, se encuentra el componente *socket*, este elemento, que sirve como interfaz entre el muñón del paciente y la prótesis (Ballit, Mougharbel, Ghaziri, & Dao, 2020), debe ser diseñado y fabricado a medida para cada usuario, teniendo en cuenta su anatomía (Herbert, Simpson, William, & Ion, 2005; Regazzoni D., 20019). El proceso de diseño del *socket* es tradicionalmente realizado de forma manual, basado en la obtención de moldes negativo/positivo (Colombo, Filippi, Rizzi, & Rotini, 2010) (Amrutsagar, Parit, Ghyar, & Bhallamudi, 2020). Sin embargo, esta metodología depende en gran medida del conocimiento, experiencia y habilidades del técnico encargado de la fabricación, y los atributos tácitos del método son fundamentales, como la interacción con el paciente y el material para obtener el mejor ajuste posible. Por ejemplo, en la fabricación del molde negativo, el técnico cubre con vendas de yeso el

muñón, y lo modifica haciendo presión con sus manos sobre la superficie del yeso y el tejido del muñón en regiones específicas.

En consecuencia, existen varias limitaciones en el proceso tradicional de fabricación de sockets utilizado en la ortopedia, tales como la invasividad para los pacientes (Colombo, Filippi, Rizzi, & Rotini, 2010), la imprecisión en la toma de medidas (Herbert, Simpson, William, & Ion, 2005) y la necesidad de realizar ajustes en el socket terminado o volver a fabricarlo para obtener el ajuste correcto con el paciente (Ballit, Mougharbel, Ghaziri, & Dao, 2020). Dados estos inconvenientes, se han desarrollado nuevas técnicas en los últimos años para mejorar el proceso de diseño y fabricación de sockets, utilizando herramientas de digitalización como la ingeniería inversa para obtener modelos virtuales del muñón, el diseño CAD y la impresión 3D (Regazzoni, Vitali, Rizzi, & Colombo, 2019; Joan E. Sanders, 2016). Sin embargo, estas soluciones informáticas solo reproducen algunos pasos del proceso tradicional, ignorando los aspectos tácitos del proceso (Colombo, Rizzi, Caterina, Daniele, & Vitali, 2018; Gabbiadini., 2012). Al digitalizar el proceso, las interacciones con el material y el paciente se realizan a través de comandos informáticos, lo que dificulta la integración de estos aspectos tácitos, esenciales para lograr un ajuste correcto del dispositivo protésico con el cuerpo del paciente. Si se obvia esta integración, se pueden presentar dos problemas importantes: sockets de baja calidad y rechazo por parte de los técnicos ortoprotésistas de implementar estas herramientas tecnológicas en sus procesos de prototización (Coons & Ratto, 2015).

Por tanto, en los procesos de base manual, el conocimiento experto es crucial para el diseño correcto del artefacto, especialmente en lo que respecta a su dimensión tácita, representada en la interacción entre el experto y el material. En las adaptaciones computacionales, estas interacciones se ven limitadas porque se dan en un ambiente virtual. A pesar de esto, hay que asegurar que mediante el uso de tecnologías CAD/CAM se puedan generar modelos adecuados a la anatomía del paciente. En consecuencia, surge la pregunta de investigación: ***¿Cómo integrar los aspectos tácitos de los procesos***

**artesanales de diseño a medida en adaptaciones computacionales mediadas por tecnologías CAD/CAM**

**para garantizar la confiabilidad de la técnica?**

<b>Efecto</b>	Las propuestas de digitalización en los procesos de diseño de base artesanal tienen una baja aceptación de los expertos (artesanos, técnicos). (Coons & Ratto, 2015)		
	Es necesario capturar y apropiar el conocimiento tácito para hacerlo explícito  (Aytekin & Rizvanoğlu, 2019) (Wood, Rust, & Horne, 2009)	Dificultad para replicar las actividades que requieren del conociendo tácito (atributos tácitos del proceso) en un medio digital (Siu & Dilnot, 2001)	Dificultad para estandarizar y sistematizar el proceso de diseño a través de medios digitales.  (Siu & Dilnot, 2001)
<b>Problema</b>	<b>En los procesos de diseño de base artesanal, hay actividades que dependen del conocimiento tácito del artesano (técnico), y estas son difíciles de aplicar en un medio digital.</b> (Coons & Ratto, 2015) (Siu & Dilnot, 2001)		
<b>Causa</b>	El conocimiento tácito se encuentra en la mente de los expertos (artesanos, técnicos) y no puede expresarse de forma explícita por medios verbales o escritos. (Polanyi M., 1966)	Los atributos tácitos en procesos de diseño de base artesanal se relacionan con la interacción directa entre el experto, el material, ambiente y contexto donde se desarrolla el proceso (Loh, Burry, & Wagenfeld, 2016) (Bofylatos & Spyrou, 2017)	El diseño a medida requiere que cada producto diseñado sea único. (Coons & Ratto, 2015)

Tabla 1 Árbol del problema.

### 3 ANTECEDENTES

Se ha identificado en la literatura que las intervenciones digitales en los procesos manuales de manufactura se clasifican en dos grupos: 1. Adaptación digital CAD/CAM, que corresponde a intervenciones donde la técnica manual se modifica con software de modelado CAD, obteniendo modelos de referencia mediante ingeniería inversa, y el uso de manufactura digital, aditiva o sustractiva. 2. Robots para automatización, este grupo se refiere a estudios que intentan intervenir en el proceso artesanal de manera que exista una automatización total, sin intervención humana, realizada por brazos robóticos que imitan las operaciones manuales.

En el primer grupo de intervenciones digitales se encontraron casos de estudio en la joyería, calzado y ortopedia. Un ejemplo es la investigación realizada por Bonfanti et al en 2018, donde se muestra cómo

en la industria italiana de la joyería, calzado y moda, se vio la necesidad de innovar mediante la digitalización de los procesos de diseño y fabricación para sobrevivir a los cambios económicos del mercado, especialmente a la crisis económica de 2008 (Bonfanti, Del Giudice, & Papa, 2018). Se descubrió que, en la joyería, el proceso comienza con un boceto a mano, que luego es modelado en un software CAD y se imprime en cera o resina en impresoras 3D de alta resolución (Bonfanti, Del Giudice, & Papa, 2018). Esta intervención digital permite obtener piezas personalizadas de gran complejidad y calidad superior, que no podrían ser igualadas con facilidad mediante métodos tradicionales (Laguado & Olivella, 2015).

Por otro lado, en el área del calzado, la digitalización de la técnica está orientada al diseño de producto personalizado. Como se muestra en la investigación llevada a cabo por Di Roma, donde se expone la digitalización en el proceso de fabricación y diseño artesanal. Este proceso comienza con la obtención de un modelo virtual del pie, utilizando un escáner 3D y un trabajo de modelado paramétrico CAD con los datos adquiridos. Esto permite obtener un calzado a medida y la parametrización de estos datos posibilita modificaciones en la geometría del modelo virtual del zapato, para adaptarlo a cualquier usuario. Además, en la fabricación se experimentó con manufactura digital, en la que se realizaron prototipos con impresión 3D y corte láser de láminas de cuero. También se utilizaron algoritmos paramétricos que definieron el estilo del calzado en cuanto a texturas y formas (Di Roma, 2017).

Y en el área de la ortopedia, en el caso de sockets para prótesis de miembro inferior, existen varias investigaciones sobre la transición de técnicas manuales a tecnologías CAD/CAM. Destacan los trabajos de Colombo et al, en los que propone desarrollar un software CAD para el diseño del socket a partir de datos de referencia del muñón, tomados por escaneo 3D, y la manufactura digital para su fabricación. Esta estrategia se basó en la recopilación de las mejores prácticas de técnicos a través de entrevistas y estudios de campo. Otro enfoque se presentó en la investigación de Amrutsagar et al, en 2020, en la que se construyeron modelos virtuales CAD parametrizados de sockets, que permiten ajustarse a las medidas

de cada paciente al cambiar parámetros como dimensiones y volumen. Esta estrategia de sockets virtuales parametrizables se utilizó para responder a una gran demanda de amputados de miembro inferior, mejorando los tiempos de fabricación en comparación con el método convencional (Amrutsagar, Parit, Ghya, & Bhallamudi, 2020). En cuanto al conocimiento tácito en la digitalización de la técnica, la investigación de Coons y Ratto, en 2015, se centró en que la intervención digital debe permitir que las actividades manuales se lleven a cabo de una forma digital, ya que es precisamente en ellas donde se presenta el conocimiento tácito para la efectividad del objeto construido. Es decir, la intervención digital debe permitir emular la técnica tradicional de la manera más natural posible para asegurar una transición adecuada a la intervención digital (Coons & Ratto, 2015).

En el grupo de robots para automatización, se encontró en la revisión de literatura de Bowen et al 2021, que ilustra el estudio de la herrería tradicional, la automatización de tareas específicas que se realizan a mano capturando habilidades manuales y tomando decisiones en las técnicas tradicionales de los herreros expertos. Estos datos capturados sirven como entrada para el entrenamiento o guías de trayectoria de brazos robóticos que imitan la tarea manual (Bowen, Music, Erdinc, & Shokrani, 2021). De manera similar, la revisión realizada por Ravichandar et al 2019, estudia el aprendizaje por demostración para el entrenamiento de robots en habilidades manuales al imitar a una persona experta. El trabajo se enfocó en 3 métodos: enseñanza cinestésica, teleoperación y observación pasiva, en los cuales se capturan datos de los movimientos corporales como entrada para las trayectorias que deben seguir los robots al imitar las tareas manuales (Ravichandar, Polydoros, Chernova, & Billard, 2019).

#### **4 JUSTIFICACIÓN**

La presente propuesta de investigación tiene el potencial de mejorar significativamente los procesos de base manual en su fabricación y diseño. Con las crecientes demandas del mercado de productos

personalizados y fabricados en menor tiempo (Alexandre, Salguero, Peralta, & Ares , 2017), la integración de tecnologías como la manufactura digital y los sistemas CAD/CAM en los procesos de diseño y fabricación se ha vuelto esencial para garantizar una sistematización de estas prácticas y una mayor competitividad. Esto permitiría a los procesos manuales de manufactura adaptarse mejor a las demandas del mercado, ya que, debido a su naturaleza, estos procesos se han visto amenazados por la industrialización y la producción en masa (Chan, 2015;Reubens, 20010).

En ese sentido, la propuesta se enfoca en la digitalización de los métodos tradicionales de fabricación mediante tecnologías CAD/CAM, para sistematizar las tareas de los procesos convencionales y permitir que el experto emular las actividades tácitas necesarias para el diseño del artefacto. La intención de la intervención con nuevas tecnologías no es la estandarización o automatización total del proceso, sino la implementación de herramientas que permitan al técnico mantener la misma capacidad de creación del método convencional, basado en el conocimiento y el trabajo manual. Se espera que esta investigación proporcione un protocolo guía para futuros proyectos que requieran la transformación de los procesos artesanales, en los cuales se incluya de manera responsable el conocimiento de expertos que han dominado un método, es decir, que mediante el análisis de su proceso convencional se puedan capturar y representar sus mejores prácticas en una adaptación digital.

Y finalmente la aplicación directa de la propuesta de investigación en el diseño de sockets para prótesis de miembro inferior representa un avance importante en la digitalización de este proceso. Esto permitiría una implementación efectiva del método digital a nivel local, ya que se espera que los aspectos tácitos sean una parte integral de la propuesta computacional y aceptados por los técnicos ortoprotesistas. Además, el cambio hacia un proceso digital también reduciría la invasividad para el paciente, ya que el método tradicional implica la necesidad de palpar y cubrir con yeso el muñón del paciente (Colombo, Filippi, Rizzi, & Rotini, 2010). Esto sería beneficioso para la población de personas amputadas de las

extremidades inferiores, ya que este grupo es amplio y vulnerable en Colombia, con aproximadamente entre 200 a 300 personas por cada cien mil habitantes (Asociación Colombiana de medicina física y rehabilitación, 2018) y a nivel global, solo entre el 5% y el 15% de las personas que de las personas que requieren una prótesis de miembro inferior tienen acceso a ella (Health Organisation World, 2017).

## **5 MARCO TEORICO**

En esta fase se describirán los conceptos principales asociados al tópico del conocimiento desde una perspectiva de la gestión y transferencia de conocimiento y los procesos de aprendizaje. Posteriormente se presenta lo referente a las técnicas de manufactura asociadas al caso de estudio.

### **5.1 El Conocimiento como base conceptual para la definición de procesos de desarrollo de nuevo producto.**

El conocimiento, en su definición más general, implica la familiaridad y certeza de comprender algo. Este se construye a partir de las relaciones entre individuos, donde las creencias, experiencias y reflexiones juegan un rol fundamental (Nonaka & Konno, 1998). El desarrollo del conocimiento ocurre en dos tipos de espacios:

- Espacio mental: Donde residen las ideas, pensamientos y reflexiones individuales.
- Espacio físico y virtual: Ambientes tangibles como oficinas, talleres o entornos digitales (Zoom, Skype, redes sociales) que permiten la interacción grupal y facilitan la construcción colaborativa del conocimiento.

En este sentido, el conocimiento está embebido en un espacio que permite tanto experiencias individuales como colectivas. Cuando el conocimiento se separa de su contexto, se transforma en información.

## **5.2 Conocimiento explícito y tácito**

El conocimiento puede clasificarse en explícito y tácito (Sikombe, Shem & Phiri, 2019). El explícito es formal, estructurado y puede transmitirse con facilidad a través de textos, gráficos, códigos o lenguajes. En contraste el tácito surge de la experiencia y la percepción sensorial. Según Polanyi (1966), este tipo de conocimiento está interiorizado en las personas y es difícil de verbalizar o documentar. Se manifiesta en: intuiciones y percepciones subjetivas; habilidades prácticas y gestos corporales; acciones, emociones y experiencias acumuladas. Ambos tipos de conocimiento actúan como un continuum, siendo inseparables en la práctica. Sin embargo, en procesos de manufactura manual es crucial distinguir entre estas dimensiones para comprender cómo se integran y transfieren.

## **5.3 Modelo relacional del conocimiento de Vincenti (1990)**

Vincenti analiza el conocimiento en contextos de diseño y manufactura en la industria aeronáutica, dividiéndolo en tres tipos:

- Descriptivo (Know what): Comprende métodos, fórmulas y conceptos necesarios para ejecutar una tarea (Venselaar et al., 1987).
- Prescriptivo: Relacionado con los procedimientos y pasos específicos.
- Tácito: Asociado al know how (saber hacer), donde la experiencia guía de manera intuitiva la ejecución de una actividad (Cruise O'Brien, 1996).

En este modelo, lo prescriptivo actúa como puente entre las dimensiones explícita y tácita del conocimiento. La figura 1 ilustra esta relación.

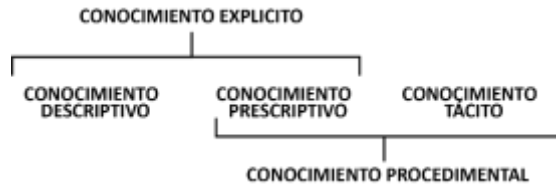


Figura 1 Relación conocimiento explícito y tácito (Vicenti , 1990).

#### 5.4 El Conocimiento Tácito en la Manufactura Artesanal

En el ámbito de las artes y oficios, el conocimiento tácito se manifiesta a través de la destreza manual del artesano para transformar materiales y crear artefactos (Latilla et al., 2019). Este tipo de conocimiento se evidencia en:

- La interacción con el material: El artesano, mediante la experiencia, aprende a manipular y dar forma al material con precisión (Bofylatos & Spyrou, 2017; Loh et al., 2016).
- Los gestos y habilidades manuales: Que reflejan el know how adquirido con la práctica constante.

Según Cross (1999), los artefactos construidos también contienen conocimiento inherente en sus características formales. Bofylatos et al. (2017) clasifican este conocimiento en tres tipos:

- Empírico: Contexto social y funcional del artefacto.
- Científico: Aspectos técnicos y prácticos.
- Tácito: Relacionado con la habilidad del artesano para interactuar con el material y darle forma.

La figura 2 ilustra los tres tipos de conocimiento en el artefacto.

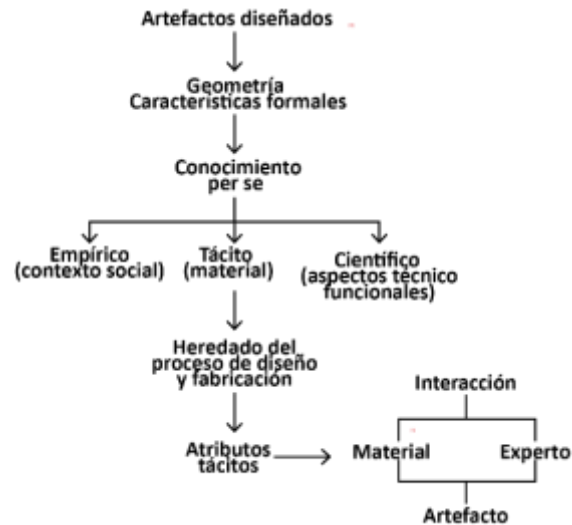


Figura 2 Tipos de conocimiento desde el artefacto.

### 5.5 Gestión del conocimiento

La gestión del conocimiento se define como acciones para adquirir, organizar y aplicar el saber en una organización para alcanzar objetivos y optimizar su rendimiento (Wiig, 1997). Este proceso implica la transformación del conocimiento tácito (no formalizado) en conocimiento explícito, facilitando su captura, transferencia y almacenamiento (Allee, 1997). La figura 3 describe las cuatro fases clave del proceso de gestión del conocimiento, basado en el modelo de Magnier-Watanabe y Senoo (2008): adquisición, almacenamiento, transferencia y aplicación.



Figura 3 fases de la gestión del conocimiento.

### 5.5.1 Adquisición del conocimiento

La adquisición del conocimiento es especialmente desafiante cuando se trata de conocimiento tácito, ya que este no se verbaliza fácilmente. Para su captura, se han implementado herramientas etnográficas como:

- **Entrevistas y estudios de campo:** Métodos que permiten registrar experiencias directas de expertos.
- **Workshops de aprendizaje:** Talleres en los que un maestro experto transmite su conocimiento práctico a aprendices interesados en dominar la técnica (O'Connor, 2017; Wood, Rust & Horne, 2009).
- **Análisis Jerárquico de Tareas (AHT):** Esta herramienta descompone una actividad en sus objetivos principales y secundarios, facilitando la identificación de pasos dentro del flujo de trabajo (Everitt et al., 2015).

#### 5.5.1.1 Marco SRK (Skills, Rules, Knowledge)

Propuesto por Rasmussen (1983, 1986), este marco complementa el AHT al clasificar tareas según su nivel cognitivo:

**Skills:** Comportamientos automáticos basados en el desempeño sensoriomotor, como manipular herramientas manuales o materiales con precisión.

**Rules:** Comportamientos guiados por procedimientos establecidos, manuales o experiencias previas, que sirven de referencia para tomar decisiones.

**Knowledge:** Comportamientos que requieren análisis profundo y control consciente para resolver tareas inesperadas o complejas.

Por ejemplo, en la fabricación de sockets para prótesis de miembro inferior, los niveles se distribuyen de la siguiente manera:

**Skills:** Medición precisa y manejo de herramientas.

**Rules:** Procedimientos establecidos en manuales o por expertos.

**Knowledge:** Comprensión de técnicas de medida, materiales y principios biomecánicos.

### **5.5.2 Almacenamiento del Conocimiento**

El almacenamiento implica guardar y organizar el conocimiento de manera formal y sistemática, en formatos tanto físicos como digitales (Alavi & Leidner, 2001).

- Herramientas digitales: Los sistemas PDM (Product Data Management) derivados de estrategias PLM permiten estructurar el conocimiento explícito (Lin, 2007).
- Sistemas CAD: Facilitan la codificación de atributos tácitos mediante modelos virtuales, como las geometrías de piedras preciosas para diseño de joyería descritas por Siu y Dilnot (2001).
- Recursos multimedia: Documentación visual y videos que capturan el conocimiento tácito presente en técnicas artesanales.

### **5.5.3 Transferencia de conocimientos**

La transferencia de conocimiento implica compartir valores, propósitos y creencias, así como conocimiento explícito o tácito entre distintos actores dentro de una organización (Cowan & Foray, 1996). Esta transferencia no es una simple copia, sino que incluye modificaciones que permiten resolver problemas específicos en contextos distintos (Kumar & Ganesh, 2009).

### **5.6 Aplicación del conocimiento**

Finalmente, el uso del conocimiento se relaciona con las capacidades de los miembros de una organización para localizar, acceder y utilizar la información y el conocimiento almacenados, ya sea

formal o informalmente (Zack, 1999). Y de igual forma su aplicación está orientada a el desarrollo de nuevo conocimiento a través de la integración, la innovación, la creación y la extensión de la base de conocimiento existente (Ganzaroli, De Noni, Orsi, & Belussi, 2016). En ese sentido, la gestión del conocimiento ha ido cambiando los procesos artesanales, ya que ha sido posible su transformación a medios digitales, como se ha ilustrado en apartados anteriores, con la inclusión de tecnologías CAD/CAM en sus métodos de diseño y fabricación.

## **6 Técnicas de desarrollo de prótesis**

### **6.1 Proceso de base manual**

Tomando la definición de artesanía de David Pye, que la describe como "la mano de obra que utiliza cualquier tipo de técnica o aparato, en el que la calidad del resultado no está predeterminada, sino que depende del juicio, la destreza y el cuidado que el fabricante ejerce mientras trabaja" (Pye, 2010), podemos establecer una comparación entre la labor de un técnico ortoprotesista y la de un artesano. Ambos comparten similitudes en el sentido de que la elaboración del socket implica un proceso donde las habilidades y la destreza del técnico son fundamentales. Aunque el resultado del socket esté predeterminado y siga un proceso específico, la labor del técnico puede equipararse al nivel de un maestro artesano. En ese sentido, para este proyecto de investigación, los procesos de base manual se definen como aquellos en los cuales la destreza y habilidad manual del experto son fundamentales para lograr la forma adecuada del artefacto.

Situándonos en una tipología de caso de estudio, se centró en el análisis del proceso de diseño y fabricación de sockets para prótesis de miembro inferior. Estas prótesis buscan mitigar el impacto negativo derivado de la pérdida de una extremidad y, en la medida de lo posible, restablecer la funcionalidad y autonomía de la persona amputada (Paternò, Ibrahimi, Gruppioni, Menciacsi, & Ricotti, 2018). Las amputaciones tienen diversas causas, siendo las principales la diabetes, enfermedades

cardiovasculares y el cáncer, así como eventos traumáticos como accidentes automovilísticos (FEINGLASS, Joe, et al, 1999; Graham, 2008). Se destaca la relevancia de este tema, ya que, según la Organización Mundial de la Salud, se estima que hay alrededor de 40 millones de personas amputadas en todo el mundo (Marino, et al, 2015).

Las prótesis se componen de dos tipos de elementos: estandarizados y piezas a medida. Los componentes estandarizados, como pie mecánico, calla o eje, rodilla mecánica y elementos de unión son fabricados de manera estándar y constituyen la mayoría de los elementos protésicos. En contraste, las piezas personalizadas incluyen el socket, que sirve como interfaz entre el cuerpo del paciente y la prótesis. El socket debe ser fabricado a medida para cada paciente, garantizando un ajuste adecuado, la transmisión de cargas correctas y proporcionando estabilidad y control para permitir al paciente caminar y realizar sus actividades con total libertad (Herbert, Simpson, William, & Ion, 2005; Mak et al, 2001). Como se muestra en la figura 4.



*Figura 4 Componentes estandarizados y a medida de la prótesis, tomado de (Paternò et al., 2018).*

En relación con el objeto central de esta propuesta, el socket, se describen sus posiciones anatómicas generales, que incluyen la pared medial, lateral, anterior y posterior, así como las regiones proximal y distal (Paternò, Ibrahimi, Gruppioni, Menciassi, & Ricotti, 2018). Para el caso de miembros inferiores, existen dos tipos principales de prótesis: las transfemorales, para amputaciones realizadas arriba de la rodilla, y las transtibiales, para amputaciones por debajo de la rodilla. La figura 5 ilustra las posiciones y tipos de socket según el nivel de amputación.

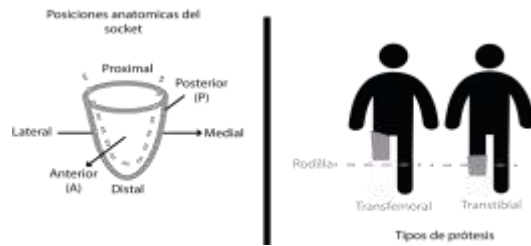


Figura 5 Izquierda regiones anatómicas del socket y Derecha tipos de socket según nivel de amputación.

Por otro lado, el proceso actual de diseño y fabricación de sockets es de naturaleza artesanal y se guía mediante la obtención de moldes positivo-negativo del muñón del paciente. Este método depende del conocimiento y experiencia del técnico, comenzando con la toma de datos que incluye mediciones en la pierna sana y el muñón, así como información general sobre el paciente. Luego, se construye el molde negativo aplicando vendas de yeso en el muñón, seguido por la fusión de yeso para crear el molde positivo (Fatone & Caldwell, 2017). Este último se modifica según las particularidades del paciente, como cicatrices y protuberancias óseas, y el estilo de vida, con el objetivo de lograr una distribución de presión óptima en la interfaz socket/muñón durante el uso de la prótesis (Ballit, Mougharbel, Ghaziri, & Dao, 2020). Posteriormente, se lamina el molde positivo con un polímero que se calienta para obtener el socket mediante succión de vacío, seguido de un proceso final de pulido y acabado (Colombo, Filippi, Rizzi, & Rotini, 2010; Laing, Lee, & Go, 2011). La figura 6 ilustra el desarrollo artesanal de este proceso.



Figura 6 Ilustraciones del proceso artesanal. a toma del molde negativo b molde positivo c modificación del molde de laminado del molde tomado de (Amrutsagar et al., 2020).

El proceso artesanal de fabricación de sockets implica conocimiento tácito, reflejado en las interacciones del técnico ortoprotésista con el muñón del paciente y los moldes de yeso. Sin embargo, según Nonaka et al., el conocimiento no se clasifica como totalmente explícito o tácito, sino que actúa en un continuum con ambos componentes presentes en mayor o menor medida (Nonaka & Konno, 1998). En este sentido, se presenta una separación preliminar de las partes tácita y explícita del método, realizada en trabajos previos en el grupo de investigación de interfaz de la Escuela de Diseño Industrial de Santander UIS. La figura 7 muestra la etapa de obtención de molde negativo y positivo donde se discriminan las partes del conocimiento.

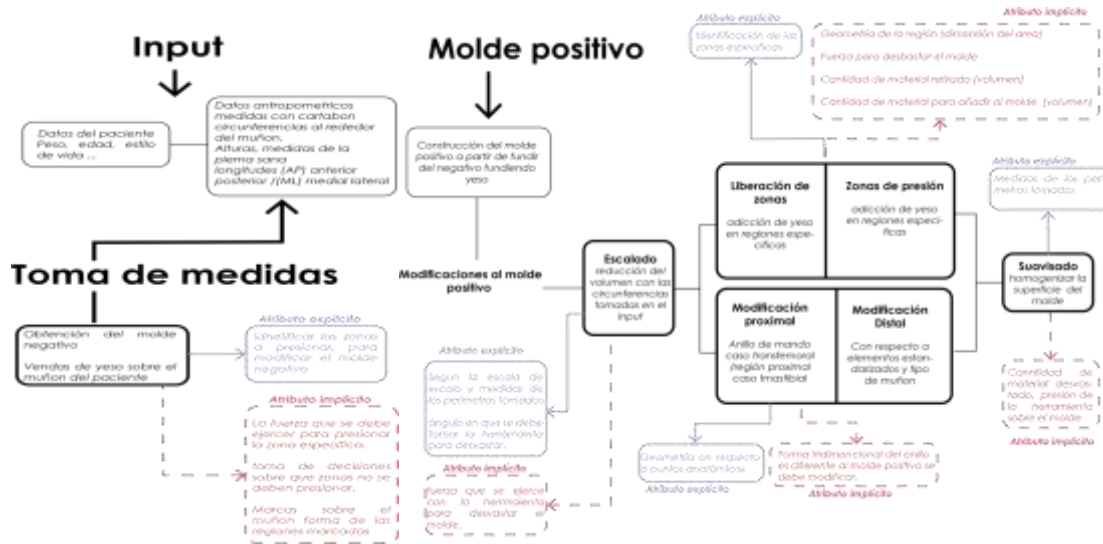


Figura 7, identificación de atributos tácitos y explícitos del método. Fuente del autor.

## 6.2 Técnica basada en manufactura digital

Las adaptaciones computacionales o digitalizaciones buscan mejorar el método tradicional de fabricación de sockets para prótesis, haciéndolo más preciso y eficiente (Colombo, Rizzi, Caterina, Daniele, & Vitali, 2018). El método tradicional presenta problemas relacionados con la experiencia del profesional, baja precisión en la toma de medidas por yeso y dificultades para los pacientes que viven lejos de los centros de salud (Amrutsagar, Parit, Ghyar, & Bhallamudi, 2020). Estos problemas pueden generar reprocesos y

la necesidad de volver a iniciar el proceso de construcción desde cero. En respuesta a estos desafíos, las adaptaciones computacionales utilizan la integración de sistemas CAD/CAM con el objetivo de mejorar la precisión del proceso de fabricación (Colombo, Rizzi, Caterina, Daniele, & Vitali, 2018). Estas adaptaciones se basan en tecnologías como la ingeniería inversa para obtener modelos de referencia virtual del muñón, herramientas CAD para el diseño del socket, y manufactura aditiva para la construcción física del socket (Regazzoni, Vitali, Rizzi, & Colombo, 2019; Joan E. Sanders, 2016).

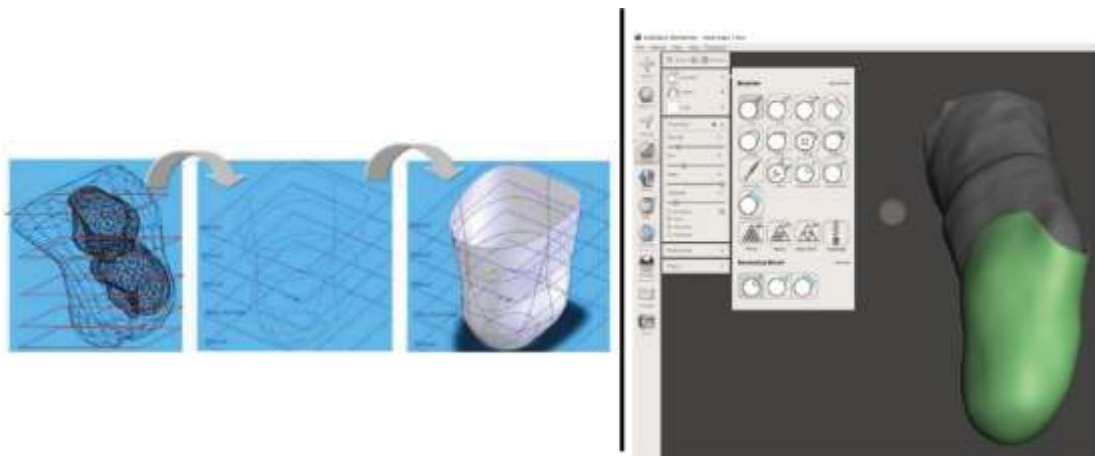
### **6.3 Ingeniería inversa**

La ingeniería inversa en el diseño de sockets implica obtener modelos de referencia virtual del muñón utilizando escáneres 3D o dispositivos de imágenes médicas como tomografías computarizadas y resonancias magnéticas (SHUXIAN, Zheng, et al., 2005). Los escáneres 3D identifican puntos en el espacio para formar una nube de puntos que representa la geometría del miembro residual (VINESH. Raja, et al., 2008). Existen diversos tipos de escáneres en el mercado, clasificados por precio, portabilidad, precisión y resolución (Braganca, Arezes, & Carvalho, 2015). Se dividen en soluciones industriales, como Vorum Spectra Scanner y Rodin scanners, que garantizan alta precisión, y soluciones low-cost, como Kinect y iPad, que, aunque menos precisas, son adecuadas para obtener modelos en el ámbito médico (Colombo, Rizzi, Caterina, Daniele, & Vitali, 2018).

### **6.4 Modelado CAD**

En esta etapa, se inicia el diseño del socket en un software CAD, utilizando el modelo referencia obtenido por ingeniería inversa mediante escáner 3D. A nivel comercial, aplicaciones especializadas como Vorum, Rodin4D, Ohio Willow Wood y Nia Technologies Inc utilizan sus propios software CAD para el diseño del socket (Colombo, Rizzi, Caterina, Daniele, & Vitali, 2018). Algunas de estas soluciones emplean modelos paramétricos virtuales que pueden personalizarse cambiando dimensiones para adaptarse a cada paciente. En investigación, es común utilizar el modelo de referencia obtenido por ingeniería inversa para

el modelado CAD del socket de dos maneras: mediante superficies o mallas poligonales. Las superficies son representaciones digitales de características tridimensionales, generadas a partir de curvas bidimensionales, la figura 8 ilustra la construcción de la superficie de un socket a partir de curvas 2D tomadas de secciones transversales del muñón virtual (Colombo, Filippi, Rizzi, & Rotini, 2010). Por otro lado, las mallas poligonales se definen como la colección de vértices, aristas y caras que definen la forma de un objeto. El modelo de referencia virtual del muñón se construye como una malla poligonal a partir de la nube de puntos, y al trabajar con esta, se utilizan herramientas de esculpido digital que permiten modificar la superficie según sea necesario (Colombo, Rizzi, Caterina, Daniele, & Vitali, 2018), como se observa en la figura 8.

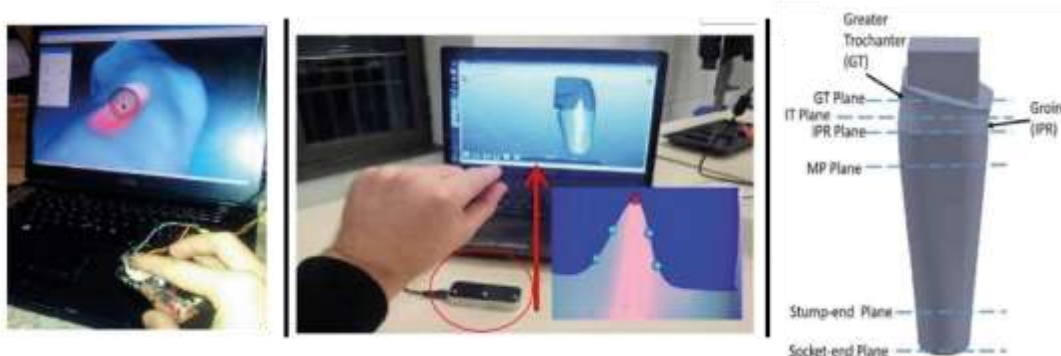


*Figura 8 Izquierda modelado CAD por superficies, derecha modelado CAD por malla. Fuente autor*

Por otra parte, en el proceso tradicional, el técnico utiliza sus manos para dar forma al dispositivo protésico, evaluando aspectos táctiles como protuberancias óseas y tonicidad del muñón. Se han llevado a cabo investigaciones para mantener estos atributos en la etapa de modelado CAD. Facchetti et al. desarrollaron un dispositivo háptico para emular operaciones de esculpir el molde, proporcionando retroalimentación táctil. Este enfoque resulta prometedor para el modelado CAD más natural, especialmente para usuarios sin experiencia previa en diseño asistido por computadora (Facchetti, Vitali,

Colombo, & Rizzi Caterina, 2014). Y en una línea similar, Colombo et al. incorporaron dispositivos de hand tracking (seguimiento de manos) a un entorno de modelado CAD para sockets de miembro inferior. Utilizando Leap Motion, un dispositivo de hand tracking, buscaron crear una interfaz de usuario natural que emulara tareas del método tradicional, como las modificaciones al molde positivo. Aunque la interfaz demostró ser relativamente fácil de usar, la precisión y la necesidad de repetir tareas fueron áreas de mejora identificadas en las pruebas con usuarios (Colombo, Facoetti, Rizzi, & Vitali, 2015).

Otro aspecto explorado es el diseño de sockets sin el uso de ingeniería inversa, apoyándose en software CAD paramétrico para construir un socket base adaptable a las medidas de cada paciente, modificando parámetros de dimensiones y volúmenes. Sin embargo, esta estrategia puede no ser aplicable a todos los tipos de sockets debido a la complejidad geométrica en algunos casos, la siguiente figura 9 ilustra los conceptos mencionados



*Figura 9 |A| lado izquierdo dispositivo háptico para el diseño del socket, presión sobre la superficie del modelo con la herramienta de esculpido tomado de (Facoetti et al., 2014); Centro modelado con hand tracking, selección y modificación de puntos de control en región proximal tomado de (Colombo et al., 2015). Derecha Socket paramétrico base transfemoral tipo cuadrilateral tomado de (Amrutsagar et al., 2020).*

## 6.5 Manufactura digital

En el ámbito de la manufactura digital para la materialización de sockets protésicos, se presentan dos enfoques principales: la fabricación sustractiva y la aditiva. En la fabricación sustractiva, una vez se tiene el modelo virtual del socket, se recurre a una máquina de control numérico (CNC). Este proceso varía según el número de ejes de la máquina, y se genera un archivo G-code que instruye los movimientos para

desbastar el material (Shaukat & Bhiva, 2018). Se desbasta un bloque de material con herramientas de maquinado, seguido del proceso tradicional de termoformado con una lámina polimérica (Amrutsagar, Parit, Ghya, & Bhallamudi, 2020). A pesar de su eficacia, esta técnica enfrenta desafíos relacionados con costos, mantenimiento continuo y desperdicio de material (Oldfrey, Miodownik, Barbareschi, Williams, & Holloway, 2020). Por otro lado, la manufactura aditiva (AM), particularmente la impresión 3D por deposición fundida, destaca como una técnica que crea objetos capa por capa a partir de un modelo digital. Es una opción práctica y económica, y se ha empleado ampliamente en la fabricación de sockets protésicos. Sin embargo, los materiales comunes utilizados, como el PLA y el ABS, pueden carecer de propiedades mecánicas necesarias para resistir fuerzas durante la marcha. Se ha explorado la manufactura híbrida, combinando la impresión 3D con fibra de carbono para mejorar las propiedades mecánicas de los dispositivos. La tabla 2 muestra los enfoques mencionados frente a la técnica tradicional.

Flujo de trabajo							
<b>método tradicional</b>	Recubrir con vendas de yeso el muñón para hacer un molde negativo.	Llenar el molde negativo con yeso para hacer un molde positivo.	Rectificación manual del molde positivo según la fisiología del muñón.		Fabricación manual del socket por termoformado al vacío.	Ensamblar y alinear con componentes estandarizados.	Ajustes / correcciones finales antes y durante el entrenamiento de la marcha hasta que el paciente se sienta cómodo.
<b>Manufactura sustractiva</b>	Escanear el muñón para obtener modelo de referencia virtual.		Diseño del socket y Rectificación virtual del modelo basado en la fisiología del muñón.	Maquinado del molde positivo en maquina CNC.	Fabricación manual del socket por termoformado al vacío.	Ensamblar y alinear con componentes estandarizados.	Ajustes / correcciones finales antes y durante el entrenamiento de la marcha hasta que el paciente se sienta cómodo.
<b>Manufactura aditiva</b>	Escanear el muñón para obtener modelo de referencia virtual.		Diseño del socket y Rectificación virtual del modelo basado en la fisiología del muñón.		Fabricación del socket por impresión 3D.	Ensamblar y alinear con componentes estandarizados.	Ajustes / correcciones finales antes y durante el entrenamiento de la marcha hasta que el paciente se sienta cómodo.

Tabla 2 Comparación procesos de manufactura de socket.

## 7 Objetivos

## **7.1 OBJETIVO GENERAL**

Establecer un protocolo de digitalización de diseño de producto orientado por tecnologías CAD/CAM, que garantice la integración de atributos tácitos de su proceso artesanal para el diseño y fabricación.

Caso de estudio socket para prótesis de miembro inferior.

## **7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Definir un marco de referencia orientado a la caracterización de los atributos tácitos en procesos artesanales de diseño y fabricación por medio de una revisión sistemática de literatura.
- Identificar el conocimiento implícito y explícito embebido en cada una de las actividades del proceso de diseño a medida y fabricación artesanal de sockets de miembro inferior.
- Configurar un algoritmo para la digitalización del método artesanal con tecnologías CAD/CAM, por medio de una guía que permita la integración de sus atributos tácitos.
- Validar el protocolo de la digitalización del proceso artesanal, con la integración de los atributos tácitos, a través de una prueba de diseño de socket para prótesis de miembro inferior

## **8 METODOLOGIA**

La metodología del proyecto de investigación se dividió en cuatro fases guiadas por los objetivos específicos. La primera fase se enfocó en caracterizar los atributos tácitos para garantizar la replicabilidad en otros procesos de base manual mediante un estudio teórico de revisión de literatura. La segunda fase abordó un estudio exploratorio para identificar el conocimiento explícito y tácito del método tradicional de fabricación de sockets a través de entrevistas y estudios de campo. En la tercera fase se construyó un algoritmo que estructuró las actividades necesarias para digitalizar el método convencional de fabricación

de sockets y permitió la integración de los atributos tácitos. Por último, la cuarta fase se realizó una prueba de diseño de socket para validar la digitalización propuesta. como lo muestra la tabla 3.

Fase	Actividades	Descripción
<b>OB 1</b>	<b>Protocolo de búsqueda</b>	definir los criterios de inclusión y exclusión de la revisión sistemática, los tipos de artículos que serán revisados, y de igual forma se establecer la cantidad de casos de estudio con respecto a los procesos artesanales que sean susceptibles a mejoras con la inclusión de tecnologías CAD/CAM.
	<b>Análisis de datos</b>	definir las herramientas a utilizar para el análisis de datos de los documentos seleccionados, se propone primero categorizar los casos de estudio y discriminar el conocimiento en explícito y tácito según el marco de (Wong & Radcliffe, 2000). Y finalmente determinar que parte tácita se utilizó en la adaptación digital de la técnica.
	<b>Marco de referencia</b>	Definir el marco de referencia del conocimiento tácito utilizado en adaptaciones digitales a procesos de manufactura de base manual.
<b>OB 2</b>	<b>Entrevistas semiestructuradas</b>	Realizar entrevistas semiestructuradas con 10 técnicos ortoprotésistas. Orientar las preguntas específicas relacionadas con los procesos y procedimientos utilizados en el diseño y fabricación de sockets además del método de análisis cognitivo de tareas propuesto por Clark, 2014.
	<b>Observaciones de campo</b>	Seleccionar 3 técnicos para esta actividad, con el objetivo de profundizar en el conocimiento tácito y explícito del proceso tradicional de obtención de moldes negativo/positivo. Con el uso de un escáner 3D, se obtendrán los modelos de referencia digital del muñón del paciente y del molde positivo.
	<b>Análisis de datos</b>	Análisis temático de las entrevistas y las observaciones de campo. 1) transcripción de datos; 2) codificación de datos; 3) identificación de temas.
	<b>Análisis jerárquico de tareas</b>	Realizar un análisis jerárquico de tareas dividiendo las tareas principales en subtareas para discriminar el conocimiento utilizado en la actividad en: habilidades, reglas y conocimiento según el SRK (skills, rules, knowledge) framework propuesto por Rasmussen (1983, 1986) y adaptado al proceso de fabricación de sockets
	<b>Diagrama de flujo de proceso</b>	diagrama de flujo que muestre el proceso técnico, agrupando las prácticas identificadas en las entrevistas y el estudio de campo. Este diagrama ayudará a identificar el conocimiento tácito relevante para ser digitalizado en el algoritmo de diseño asistido

		por computadora (CAD) para la fabricación de sockets para prótesis de miembro inferior.
<b>OB 3</b>	<b>Diagrama de integración de atributos tácitos para la digitalización del método</b>	A partir del diagrama del flujo de proceso obtenido, se seleccionan herramientas para digitalizar para preservar las características tácitas de la técnica.
	<b>Establecer la secuencia de pasos para el algoritmo de la técnica digital</b>	Proponer las tareas que componen la digitalización de la técnica.
	<b>Verificaciones</b>	Probar el algoritmo propuesto con casos de estudio trabajos previamente.
	<b>Refinamiento del algoritmo</b>	Realizar posibles mejoras que se identifiquen en las verificaciones de las tareas y herramienta digitales utilizadas.
<b>OB 4</b>	<b>Diseño de la prueba</b>	Proponer una prueba de diseño de socket por el método digital que pueda ser contrastado con un socket de control, por comparación de superficies.
	<b>Selección de participantes</b>	Modeladores CAD y técnicos ortopresitas
	<b>Protocolo de la prueba</b>	describir los pasos que guían el diseño del socket con el método digital, ya que se entregará un archivo de la malla del muñón con una hoja de datos generales del paciente
	<b>Análisis de datos</b>	Análisis de datos por comparación de superficies y curvas en ambos sockets, las diferentes superficies serán superpuestas con el uso del software libre GOM Inspect, y entre más aproximada sea la geometría del socket realizado por el método digital con respecto al tradicional, se tendrá una respuesta positiva a la integración de los atributos tácitos en la digitalización del método, las mediciones entre superficies se realizan por análisis de varianza Anova.

*Tabla 3 Tareas de la metodología.*

## 9 RESULTADOS

### 9.1 -FASE 1 REVISIÓN DE LITERATURA PARA IDENTIFICAR ATRIBUTOS TÁCITOS NECESARIOS EN LA DIGITALIZACIÓN DE PROCESOS MANUALES DE MANUFACTURA

La revisión de literatura pretende un marco de referencia para caracterizar los atributos tácitos en procesos de base manual de manufactura usados para actualizar o mejorar su técnica mediante tecnologías digitales.

## 9.2 Materiales y métodos

La revisión de literatura de esta investigación se basó en el trabajo de Che Ibrahim et al., 2020, ya que es relevante para la estructuración de información relacionada con el conocimiento tácito en los procesos manuales de fabricación. Además, la revisión identificó publicaciones relevantes y describió cómo se seleccionaron los artículos o documentos para el informe final de investigación (Savino, Messeni Petruzzelli, & Albino, 2017). Se utilizó cuatro partes principales: 1) Definición del alcance y el contexto; 2) Identificación de las Keywords; 3) Búsqueda de literatura, 4) Análisis de contenido. Estos pasos se basan en el trabajo de (Manfredi, Frattini, Messeni, & Berner, 2018) y ofrecen un enfoque sistemático, replicable y transparente (Greer & Lei, 2012), como se muestra en la figura 10.

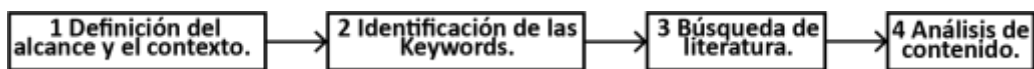


Figura 10 Metodología de la revisión.

### 9.3 Definición del alcance y el contexto

En la primera parte, la "Definición del alcance y el contexto", se estableció que esta investigación pretende identificar el conocimiento tácito presente en un proceso manual y cómo se utiliza para intervenir el proceso mediante tecnologías digitales y mejorar la técnica, y en donde se buscan investigaciones que tomen casos de estudio de procesos artesanales manualmente, y donde la intervención tecnológica esté dirigida por tecnologías CAD/CAM o automatización con robots. Por lo tanto, se plantean dos preguntas para la revisión: PR1: ***¿Qué características del conocimiento tácito se tienen en cuenta para intervenir digitalmente un proceso de fabricación de base artesanal?*** PR2: ***¿Cómo se emulan los atributos tácitos en una adaptación digital del método tradicional?***

### 9.4 Identificación de las Keywords y búsqueda de literatura

En la identificación de las palabras clave, se agruparon los conceptos relacionados con el conocimiento tácito y la fabricación de base manual, se utilizaron las bases de datos Scopus y Web of Science, Se encontraron 826 resultados, los cuales fueron filtrados por los criterios de inclusión descritos en la tabla 4, se identificaron 60 resultados de los cuales se seleccionaron por lectura rigurosa para el análisis de contenido un total de 29 resultados. La figura 11 muestra la selección de resultados.

Criterios	
Inclusión	exclusión
Idioma: español o ingles	Artículos de revisión
Ventana de tiempo:2000-2022	
Tipo de documento: Artículos casos de estudio,	
Tema principal: intervención digital a un proceso de base artesanal	Categorías temáticas según bases de datos no relevantes: environmental sciences, mathematics; chemistry, physics and astronomy, y immunology and microbiology
Validaciones: Los estudios tengan pruebas o experimentos que muestren la efectividad de la técnica frente a la intervención digital	
	Casos de estudio de procesos tradicionales basados en culturas o tradiciones de generación en generación

Tabla 4 Criterios de inclusión – exclusion.

A continuación se muestra la ecuación final: (((craft\* OR handcraft\*)OR (handmade) OR ("traditional craft") OR ("art and craft") OR (craft process\*) OR (traditional process\*) OR (craft method) OR (traditional method) OR (traditional practices) OR (craft practices) OR (traditional workflow) OR (craft based) OR (craft based approach)) AND (manufact\* OR fabricat\*OR Produc\*)) AND ((cad) OR ("comput\* aided design\*") OR (cam) OR ("comput\* aided manufact\*") OR (Cax Technologies) OR (computer-aided technologies) OR (CNC machin\*) OR (additive manufact\*) OR (3d print\*)OR (digitalization) OR (digital fabrication) OR (digital manufact\*) OR ( digital technology) OR (digital retrofitting) OR (digital design) OR (computational design) OR (3d technologies) OR("virtual craft") OR ("computational craft") OR ("hybrid craft") OR (converging technologies) OR (disruptive technologies) OR (rapid prototypes)) AND ("craft knowledge")

OR ("know how") OR (skill\*) OR ("tacit knowledge") OR ("implied knowledge") OR ("knowledge workers"))).

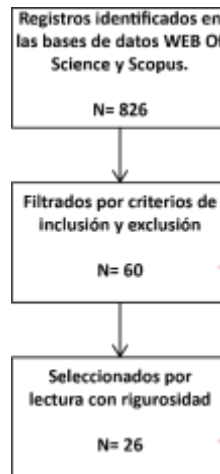


Figura 11 Selección de resultados.

## 9.5 Análisis de contenido y resultados

La clasificación de los documentos relevantes para el análisis de contenido se organizó de acuerdo con el caso de estudio de procesos manuales de fabricación. Esta clasificación ayudó a identificar los atributos clave del conocimiento tácito necesarios para las intervenciones digitales en diferentes técnicas. A partir de estos atributos clave, se identificaron las herramientas o medios utilizados para traducir o emular el conocimiento en un medio digital. En los próximos apartados se detalla el proceso de análisis.

### 9.5.1 Categorización de los casos de estudio

La revisión sistemática reveló diversos casos de estudio en los que se intervenía el proceso manual de manufactura con tecnologías digitales, organizados en dos categorías: 1) Adaptación digital y 2) Automatización. La categoría de adaptación digital incluye intervenciones donde la técnica de fabricación manual se modifica mediante software de modelado CAD para mejorar la calidad de los artefactos, asegurar su precisión geométrica y simplificar el proceso, utilizando en algunos casos ingeniería inversa para obtener modelos de referencia digitales. Además, integra la manufactura aditiva y sustractiva en el

flujo del proceso, con el enfoque de adaptar, y no reemplazar, el proceso convencional. Por otro lado, la categoría de automatización agrupa los casos relacionados con la automatización completa de técnicas convencionales mediante brazos robóticos programados para realizar actividades manuales, con el objetivo de lograr procesos más eficientes y la posibilidad de personalización en masa y diseño a medida como se observa en la figura 12.

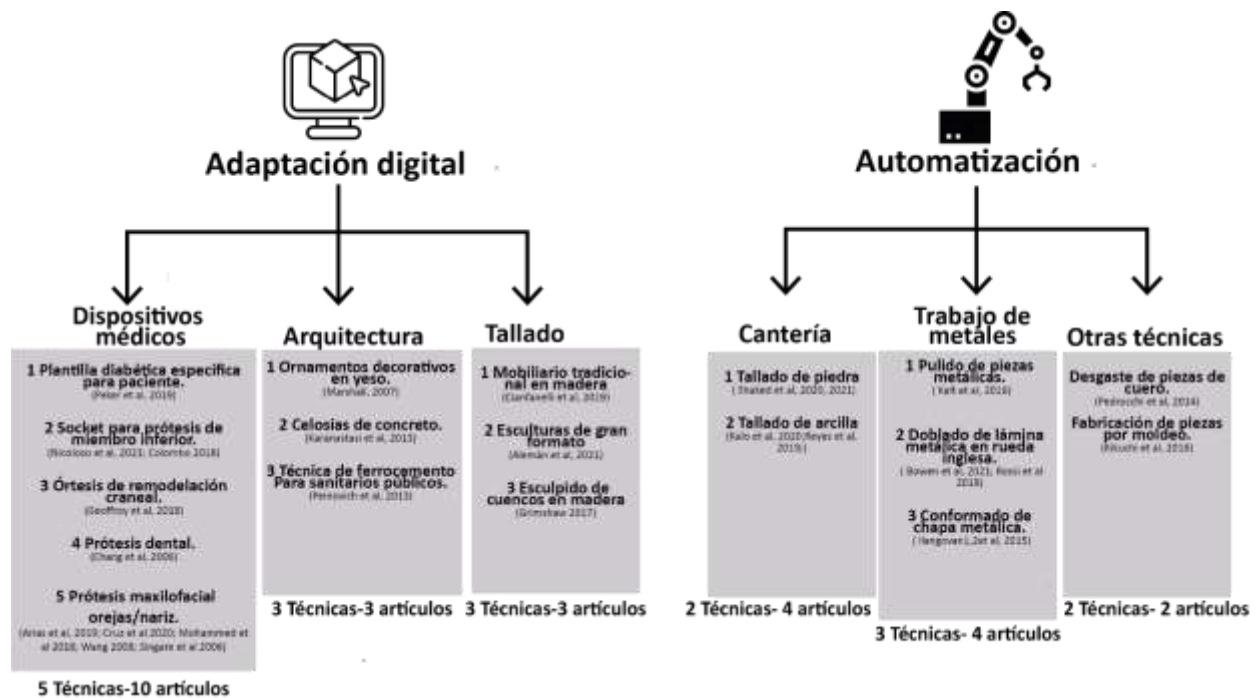


Figura 12 Categorías de los casos de estudio.

## 9.6 OPR1: ¿Qué características del conocimiento tácito se tienen en cuenta para intervenir digitalmente un proceso de fabricación de base artesanal?

### 9.6.1 Atributos Clave del conocimiento tácito

Una vez agrupados los resultados por técnicas similares en la categoría de adaptación digital y automatización se buscaron las características tácitas relevantes para su intervención digital. Se observó que, aunque existe una digitalización de la técnica manual, no siempre se muestra de forma explícita la dimensión tácita del conocimiento utilizado en su proceso. Por lo tanto, se utilizó como referencia el

concepto de dimensión tácita en el contexto los procesos artesanales propuesta por Beamer et al 2001, en la cual se describe que estos procesos están relacionados con las habilidades y la práctica de un oficio que se aprende de manera informal, es decir lo que encierra el saber hacer (now-how) Beamer & Varner, 2001; Nonaka & Konno, 1998). Con esta base teórica se infirieron las características tácitas en los documentos a través de tres partes: Persona experta, proceso de base manual y el artefacto como se muestra en la figura 13. Los atributos tácitos clave encontrados fueron: **percepción espacial; creatividad; habilidades manuales; toma de decisiones; verificaciones y gestos corporales** estos se relacionaron con la experiencia y experticia de la persona experta, mientras que el proceso de base manual se relacionó con las tareas principales de la técnica y el artefacto con el caso de estudio.

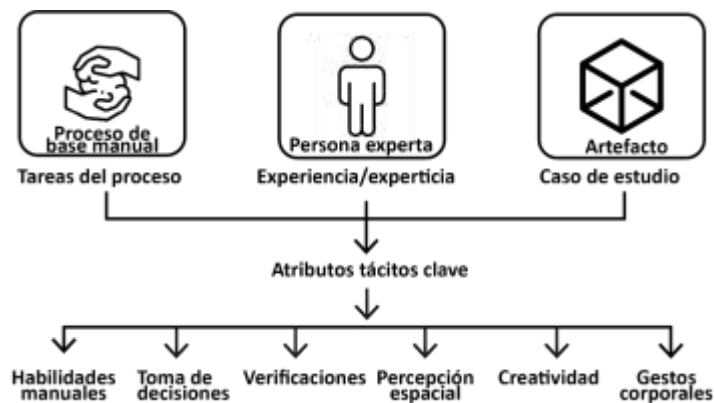


Figura 13 Características para el análisis de los documentos seleccionados.

Dentro de los atributos del conocimiento, el autor menciona el concepto de “el esfuerzo cognitivo”; este se refiere a la forma como el conocimiento facilita la toma de decisiones en situaciones inesperadas. El esfuerzo cognitivo se puede presentar en momentos de realización de las tareas del proceso de manufactura, específicamente en situaciones imprevistas, inesperadas, no planeadas, donde se requiere un entendimiento claro del objetivo y así poder resolver la situación. Para este nivel se identificó el atributo tácito “**toma de decisiones**” para el contexto de resolver situaciones inesperadas o nuevas para la persona experta. Sin embargo, desde la información proporcionada por los artículos se tiene el

limitante de profundizar en este nivel, por la insuficiencia de información en la literatura revisada convirtiéndose en una oportunidad para análisis en futuros trabajos.

A su vez, se utilizó el marco de referencia SRK (skills, Rules, Knowledges) propuesto por Rasmussen 1983, para identificar el nivel cognitivo de cada atributo tácito encontrado, en este marco hay tres niveles del esfuerzo cognitivo requerido para ejecutar una actividad del proceso de manufactura. A continuación, se definen los atributos dentro del marco. La tabla 5 muestra los atributos del nivel habilidades y reglas

<b>Skills (habilidades)</b> , en este nivel se encuentran atributos tácitos que se realizan de manera automática, en donde las tareas se ejecutan de forma fluida y las acciones requieren de poca atención porque están entendidas e interiorizadas		
<b>Habilidades manuales</b>	<b>Gestos corporales</b>	<b>Percepción espacial</b>
Tareas del proceso de fabricación que involucran la transformación del material: <b>moldeo; esculpido; corte; pulido.</b>	Movimientos y gestos manuales realizados por la persona experta durante el proceso de fabricación.	La capacidad para comprender y visualizar las formas y volúmenes del artefacto en dos y tres dimensiones, para manipular y transformar sus geometrías en el del proceso de fabricación.
<b>Rules (reglas)</b> , en este nivel las acciones se realizan conscientemente, y requieren de reglas construidas por experiencias previas, utilizadas para tomar decisiones y resolver posibles problemas en el proceso de manufactura. En este nivel la persona es consciente que existen diferentes caminos para resolver una situación (Elliott, 2005.).		
<b>Toma decisiones</b>	<b>Verificaciones</b>	<b>Creatividad</b>
1. Decisiones sobre la geometría del artefacto respecto a varios factores.  2 solución de problemas en actividades del proceso de fabricación.	Formas de evaluar las tareas del proceso de fabricación.	1 la capacidad de construir formas sin contar con referencias directas, como en casos donde falta una parte del cuerpo del paciente.  2 la habilidad para construir geometrías tridimensionales complejas a partir de referencias bidimensionales, utilizando la imaginación y el conocimiento técnico para completar la forma y función del objeto.

*Tabla 5 atributos tácitos de los niveles Skills y Rules (Rasmussen 1983).*

Además, del conocimiento tácito identificado en los estudios se asoció el conocimiento explícito de las técnicas en forma de conocimiento declarativo necesario para la ejecución de los atributos tácitos ya que se entiende el conocimiento como un continuum entre sus partes tácita y explícita, este ejercicio también complementa el contexto de las técnicas estudiadas. A continuación, se describen los hallazgos en la categoría Adaptación digital.

### 9.6.2 Identificación de atributos tácitos procesos basados en Adaptación digital

Como resultado de esta revisión se identifican los hallazgos relacionados a los conceptos involucrados del conocimiento en áreas y sectores de la economía como en el desarrollo de dispositivos médicos, arquitectura

### 9.6.3 Tecnologías convergentes aplicadas en Dispositivos médicos

Se analizaron los procesos de fabricación de dispositivos médicos, sus casos de estudio fueron de diseño de prótesis u órtesis, se encontró que su proceso este guiado por los siguientes pasos: 1 diagnóstico con especialista para definir materiales, y el dispositivo del paciente. 2 obtención de molde negativo de la parte del cuerpo que se quiere intervenir, a partir de vendas de yeso o cera. 3 molde positivo por vaciado del negativo, y modificado según las necesidades del paciente. 4 pieza final obtenida por laminación o moldeo del positivo. 5 acabados a la pieza, y en el caso de prótesis maxilofaciales la colocación del implante se realiza por cirugía (Arias et al., 2019; Wang et al., 2008). La tabla 6 muestra las técnicas encontradas.

	Técnicas				
	Plantilla diabética específica para paciente.	Prótesis dental	Prótesis maxilofacial: orejas/nariz	Socket para prótesis de miembro inferior	Órtesis de remodelación craneal
Autores	(Peker et al., 2020)	(Chang et al., 2006)	(Arias et al., 2019; Cruz et al., 2020; Singare et al., 2010; Wang et al., 2008)	(Colombo et al., 2018; De Vivo Nicoloso et al., 2021)	(Geoffroy et al., 2018)

Tabla 6 Técnicas del grupo dispositivos médicos.

Los atributos tácitos están conectados entre sí para que los pasos del proceso de fabricación se puedan realizar correctamente, a continuación, se describen cada uno de ellos, donde se muestra la parte tácita que fue necesaria tener de forma equivalente en la intervención digital, o que se modificó con las herramientas CAD/CAM. En el anexo 1, se detallan por las técnicas cada atributo tácito identificado. En la tabla 7 se describe los principales hallazgos reportados en la literatura sobre los atributos tácitos en el desarrollo de dispositivos médicos.

**Habilidades manuales** se encontraron diferentes habilidades manuales en el proceso de fabricación de las técnicas. Se identificó la sensibilidad táctil en la etapa de diagnóstico con especialista y de molde negativo, ya que la persona experta debe tocar la región del cuerpo de interés del paciente para identificar zonas específicas asociadas al desarrollo del artefacto. Moldeo en la habilidad de construir los moldes negativo y positivo. En el negativo tomar la impresión o geometría de la región de interés.

Y en el molde positivo las modificaciones realizadas a la medida del paciente para adecuarse a la forma del cuerpo, que involucran la biomecánica de la marcha en las técnicas del socket y plantilla diabética (Colombo et al., 2018; De Vivo Nicoloso et al., 2021; Mohammed et al., 2018), o modificaciones para asegurar la adaptabilidad a la medida del paciente en las técnicas de prótesis dental, y maxilofacial (Chang et al., 2006; Cruz et al., 2020; Mohammed et al., 2018; Singare et al., 2010; Wang et al., 2008), y para moldear la forma del cuerpo durante su crecimiento en el caso de la ortesis craneal (Geoffroy et al., 2018). Tallado cuando se requiere esculpir una forma o volumen como en los casos de prótesis maxilofacial que se requiere moldear la oreja o nariz desde la referencia del molde negativo (Wang et al., 2008). Corte y pulido para la tarea de acabado, para eliminar bordes filosos o exceso de material.

**Toma de decisiones** están asociadas a etapas del proceso de fabricación en el diagnóstico con el especialista a la selección correcta de los materiales, diseño del artefacto clínico, y para las técnicas de socket, ortesis craneal y plantilla relacionados con aspectos biomecánicos de marcha y regiones donde es posible hacer presión o liberar áreas de contacto entre el dispositivo médico y el cuerpo del paciente (Colombo et al., 2018; De Vivo Nicoloso et al., 2021; Geoffroy et al., 2018; Peker et al., 2020), y para la técnica de prótesis maxilofacial a la planeación quirúrgica y a los métodos de fijación de la prótesis como adhesivos, barras osteointegradas, imanes o sistemas de retención mecánica (Arias et al., 2019; Mohammed et al., 2018; Singare et al., 2010; Wang et al., 2008). Para las etapas de moldeo, las rectificaciones a medida del modelo positivo que tienen que ver con la biomecánica mencionada, y que

se interpretan en modificaciones a la geometría del molde en las técnicas mencionadas (Colombo et al., 2018; De Vivo Nicoloso et al., 2021; Geoffroy et al., 2018) o que permiten la adaptabilidad a la forma de la encía del paciente en la técnica de prótesis dental (Chang et al., 2006). Y a posibles ajustes realizados en todas las etapas del proceso. Respecto a la etapa final de pruebas, esta se realiza con el paciente y se relaciona con la retroalimentación que este comunica desde la comodidad en pruebas de marcha para las técnicas de socket y plantilla ortopédica (Colombo et al., 2018; De Vivo Nicoloso et al., 2021; Peker et al., 202). Y de comodidad en el sentido de que no se sienta dolor en su uso para las demás técnicas.

**Verificaciones** se realizan por observación visual y táctil en las diferentes tareas del proceso de manufactura, evaluando si las tomas de medidas y geometría de interés fueron correctas para la construcción del molde negativo. En la construcción del molde positivo también se tiene en cuenta verificaciones respecto a medidas tomadas previamente sobre la región de interés del paciente (Arias et al., 2019; Chang et al., 2006; Colombo et al., 2018; Cruz et al., 2020; De Vivo Nicoloso et al., 2021; Geoffroy et al., 2018; Mohammed et al., 2018; Peker et al., 2020; Singare et al., 2010; Wang et al., 2008). Y en la etapa de prueba se tiene en cuenta la retroalimentación con el paciente en pruebas de marcha en las técnicas de socket y plantilla diabética (Colombo et al., 2018; De Vivo Nicoloso et al., 2021; Peker et al., 2020), y en general si hay dolor o incomodidad al utilizar el dispositivo clínico para todas las técnicas.

**Percepción espacial** estuvo centrada para identificar la forma, tamaño y regiones o puntos específicos de la parte del cuerpo de interés respectivamente: pie para plantilla diabética (Peker et al., 2020); boca para prótesis dental (Chang et al., 2006); oreja o nariz para la prótesis maxilofacial (Arias et al., 2019; Cruz et al., 2020; Geoffroy et al., 2018; Mohammed et al., 2018; Singare et al., 2010); muñón en socket de miembro inferior (Colombo et al., 2018; De Vivo Nicoloso et al., 2021); y cabeza en ortesis de remodelación craneal (Geoffroy et al., 2018), estas regiones se tienen en cuenta en las etapas de diagnóstico con el especialista y en la construcción del molde negativo, al igual que en la forma y tamaño

del modelo del molde positivo o artefacto clínico finalizado en los pasos de acabado y pruebas con el paciente.

**Creatividad** se identificó específicamente en la técnica de prótesis maxilofacial, donde el experto debe tallar formas anatómicas faltantes, como una nariz o una oreja (Arias et al., 2019; Cruz et al., 2020; Mohammed et al., 2018; Singare et al., 2010). A partir de su experiencia, el profesional modela estas geometrías complejas utilizando referencias limitadas, tales como imágenes bidimensionales o, en el caso de la oreja, su contraparte lateral. La creatividad se manifiesta en la capacidad del experto para interpretar y transformar estas referencias parciales en una prótesis que no solo sea anatómicamente correcta, sino también estéticamente coherente con el resto del rostro del paciente.

Tarea del flujo de trabajo	Atributos tácitos clave inferidos					Conocimiento declarativo
	Habilidades manuales	Percepción espacial	Toma de decisiones	Verificaciones	Creatividad	
<b>Diagnostico con especialista</b>	<b>Sensibilidad Táctil</b> Identificación de regiones y puntos anatómicos de interés.	<b>Observación del paciente.</b>  Forma, tamaño, puntos anatómicos de la región del cuerpo de interés.	<b>Diseño</b>  Tomar decisiones sobre la forma, tamaño del dispositivo médico.  <b>Materiales</b>  Selección de materiales más adecuados para el dispositivo médico.  <b>Biomecánicos</b>  Definir la distribución de carga y presión en el artefacto para evitar puntos de presión y molestias.  <b>Planificación Quirúrgica</b>  (en casos donde sea necesario, prótesis maxilofacial).			<b>Médico</b> Conocimiento de enfermedades y condiciones según el caso de estudio.  <b>Anatómico y fisiología</b> regiones específicas de la parte del cuerpo según el caso de estudio.
<b>Molde negativo</b>	<b>Moldeo</b>  <b>/Sensibilidad Táctil</b> Toma de medidas en yeso, cera, o espuma sobre la región del cuerpo.	<b>Observación del paciente.</b>  Geometría, tamaño, puntos anatómicos específicos del área de interés en el paciente.	<b>Ajustes</b> Realizar posibles durante la toma de medidas.	<b>Inspección visual y táctil</b>  Examinar la impresión detectar posibles defectos.  (defectos en la forma, tamaño).  <b>Mediciones</b>  Verificación de la precisión de las medidas tomadas.		<b>Biomecánico</b> Marcha, Presiones, en el pie y cuerpo en general. para casos de plantilla y socket de prótesis de miembro inferior.  <b>Técnico</b> Manufactura de moldes negativo/positivo.  Uso de herramientas.

<b>Molde positivo</b>	<b>Moldeo</b> Construcción y rectificación del molde positivo según las necesidades específicas del paciente.	<b>Observación del modelo positivo</b> Geometría tamaño puntos anatómicos en el molde.	<b>A medida</b> Realizar ajustes y modificaciones en el modelo positivo para garantizar un ajuste preciso según las características del paciente. <b>Ajustes</b> Realizar posibles ajustes necesarios durante el proceso de fabricación.	<b>Inspección visual y táctil</b> Revisión del modelo positivo para evaluar las regiones modificadas a la medida del paciente. <b>Mediciones</b> Verificación del molde respecto a medidas y puntos anatómicos tomados previamente.	<b>Técnico material</b> tiempos de fraguado y pérdida de humedad del yeso. <b>Técnico material</b> proceso de manufactura de desbaste y corte.
<b>Laminación</b> <b>Técnica: plantilla para pie diabético, socket y ortesis craneal.</b>	<b>Moldeo</b> Termoformado una lámina plástica/ espuma sobre el molde positivo aplicando vacío.	<b>Observación</b> Geometría, tamaño del modelo positivo y dispositivo laminado.	<b>Ajustes</b> Realizar posibles ajustes necesarios durante el proceso de fabricación.	<b>Inspección visual y táctil</b> Examinar el modelo para detectar posibles defectos.	
<b>Tallado</b> <b>Técnica de prótesis maxilofacial y dental.</b>	<b>Tallado</b> Tallado del reflejo de la oreja a partir de la geometría de la geometría del modelo negativo.  Tallado del modelo de la nariz a partir de la geometría del modelo negativo  Tallado de dientes en yeso o cera cuando sea necesario.	Geometría, tamaño del rostro y prótesis, puntos anatómicos específicos.	<b>Ajustes</b> Realizar posibles ajustes necesarios durante el proceso de fabricación. <b>A medida</b> Modificar el modelo a las necesidades y preferencias del paciente.	<b>Inspección visual y táctil</b> Examinar el modelo para detectar posibles defectos. <b>Mediciones</b> Verificación del molde respecto a medidas y puntos anatómicos tomados sobre el paciente.	Habilidad para esculpir y modelar manualmente formas y texturas realistas en el modelo.
<b>Fundición</b> <b>Técnica de prótesis maxilofacial y dental.</b>	<b>Moldeo</b> Fundición final en silicona/cera a partir del modelo anterior.	Geometría, tamaño del rostro y prótesis, puntos anatómicos específicos.	<b>Acabado Estético</b> detalles estéticos de la prótesis para lograr una apariencia natural.	<b>Inspección visual y táctil</b> Revisión de la forma y textura de la prótesis.	Habilidad para esculpir y modelar manualmente detalles y texturas realistas en la prótesis.
<b>Acabado</b>	<b>Corte/ pulido</b> Corte y pulido del dispositivo médico.	Geometría, tamaño del dispositivo médico.	<b>Acabado Estético</b> detalles estéticos del dispositivo médico.	<b>Inspección visual y táctil</b> Examinar el modelo para detectar posibles defectos.	
<b>Pruebas</b>	<b>Sensibilidad táctil</b> Unión de prótesis al paciente Por Cirugía en caso de prótesis maxilofacial.	Geometría, tamaño del dispositivo médico y cuerpo del paciente.	<b>Ajustes y Adaptaciones</b> modificaciones según la retroalimentación del paciente.	<b>Retroalimentación con el paciente</b> Probar el artefacto clínico en el paciente para verificar su ajuste y comodidad. <b>Inspección visual y táctil</b> Evaluación de la adaptación anatómica de dispositivo al paciente.	

Tabla 7 Conocimiento tácito y declarativo identificado en el grupo de dispositivos médicos.

#### 9.6.4 Tecnologías convergentes aplicadas en Arquitectura

En los grupos de Arquitectura se analizaron los flujos de tareas que guían las técnicas basadas en la fabricación manual. Los estudios se centraron en la fabricación manual de moldes para fundirlos en diferentes materiales, como yeso para fabricar ornamentos (Marshall, 2007), concreto para construir bloques (Bártolo, 2013) y ferrocemento para construir muros( Peinovich & Fernández, 2012).

Se identificaron atributos tácitos de percepción espacial respecto al espacio físico donde se ubica el producto (Bártolo, 2013; Marshall, 2007; Peinovich & Fernández, 2012) y respecto a las formas y patrones que se toman de inspiración para la configuración de los módulos que componen las celosías y ornamentos arquitectónicos (Bártolo, 2013; Marshall, 2007). Se encontraron habilidades manuales de sensibilidad táctil, moldeo y esculpido en el desarrollo de los moldes. La toma de decisiones se encontró en la selección de diseños y posibles ajustes durante el proceso de fabricación, mientras que las verificaciones se relacionaron con la inspección visual y táctil, y la medición manual. (Bártolo, 2013; Marshall, 2007; Peinovich & Fernández, 2012). Respecto al atributo de creatividad se encontró el desarrollo formal de las piezas a partir de ejercicio de diseño, modularidad, repetición de forma, simetrías ((Bártolo, 2013; Marshall, 2007) en el tallado de geometrías complejas a partir de referencias bidimensionales (Marshall, 2007). Los conocimientos declarativos de este grupo asociados incluyen el conocimiento de los materiales, técnico, diseño industrial y procesos de fabricación, en el anexo 2 atributos tácitos del grupo arquitectura se detallan por las técnicas los hallazgos y la tabla 8 condensa la información.

Tarea del flujo de trabajo	Atributos tácitos clave inferidos					Conocimiento declarativo
	Habilidades manuales	Percepción espacial	Toma de decisiones	Verificaciones	Creatividad	

<b>Planeación</b>		Espacio, tamaño, donde se ubica el artefacto/producto.	<b>Diseño</b> Decidir sobre los diseños específicos a crear basados en requisitos del cliente o proyecto.  <b>Elección de Materiales</b> Decidir qué materiales son más adecuados para el producto a fabricar.		Desarrollo formal de los ornamentos a partir de ejercicio de diseño, modularidad, repetición de forma, simetrías	<b>Conocimientos Técnicos</b> Técnicas de modelado a mano. Procesos de moldeado y colado de yeso/concreto Uso de herramientas y equipos tradicionales.  <b>Conocimiento de Materiales</b> Entender las propiedades y comportamientos de los materiales utilizados en la fabricación para adaptarlos al diseño digital.  <b>Diseño y Dibujo Técnico</b> Capacidad para interpretar planos y diseños técnicos.  <b>Mecánica Básica</b> Principios básicos de la mecánica para la construcción de moldes y productos.
<b>Moldeo/ fundición</b>	<b>Moldeo</b> Destreza manual en la elaboración de moldes.  <b>Esculpido</b> Destreza manual para esculpir con herramientas perfiles y ornamentos.	Tamaño y forma de los moldes.	<b>Ajustes</b> modificaciones o ajustes en el proceso de fabricación según sea necesario.	<b>Inspección Visual/táctil</b> Inspección de los moldes y demás tareas del proceso para asegurar su precisión y calidad.		
<b>Acabado / Ensamblaje</b>	<b>Corte/ pulido</b> Corte y pulido de las piezas	Geometría, tamaño de las piezas finales	<b>Acabado Estético</b> detalles estéticos de las piezas	<b>Inspección Visual/táctil</b> Identificar visualmente posibles defectos o inconsistencias en los artefactos.  Destreza para comparar el artefacto fabricado con el diseño original.		

Tabla 8 Conocimiento tácito y declarativo del grupo arquitectura.

### 9.6.5 Técnicas para creación digital: Tallado

Se identificaron atributos de percepción espacial para las formas, escala de los artefactos diseñados. Creatividad relacionada con la construcción de formas tridimensionales complejas a partir de referencias bidimensionales. En cuanto a las habilidades manuales, se destacó la destreza para esculpir materiales. La toma de decisiones se relacionó con la resolución de problemas durante el proceso y aspectos relacionados con el acabado superficial y ensamblajes de partes, mientras que las verificaciones se asociaron con la inspección visual y táctil durante las etapas del proceso de fabricación. Los conocimientos declarativos encontrados abarcan áreas de diseño, materiales, técnicas de fabricación, herramientas y seguridad (Cianfanelli et al., 2019; Díaz-Alemán, n.d.; Grimshaw, 2017). La tabla 9 resume el conocimiento tácito identificado.

	Atributos tácitos clave inferidos		
--	-----------------------------------	--	--

Tarea del flujo de trabajo	Habilidades manuales	Percepción espacial	Toma de decisiones	Verificaciones	Creatividad	Conocimiento declarativo
<b>Diseño y Planificación</b>  <b>Preparación de Herramientas</b>  <b>Corte y tallado</b>  <b>Ensamblaje</b>  <b>Acabado</b>	<b>Esculpido</b> Destreza manual para esculpir con herramientas geometrías complejas	<b>Percepción Espacial</b> Habilidad para visualizar y trabajar en tres dimensiones	<b>Acabado Superficial</b> Determinar el tipo de acabado superficial que mejor se adapte al producto final.  <b>Ensamblaje</b> Tomar decisiones sobre cómo unir las piezas de manera segura y duradera.  <b>Ajustes y Retoques</b>  Resolución de problemas durante el proceso de fabricación. Ajuste de procesos en función de las necesidades específicas de cada producto.	<b>inspección Visual y táctil</b> Examinar visualmente el material y las piezas para detectar imperfecciones o errores.  Utilizar el sentido del tacto para detectar irregularidades en la superficie o el ensamblaje.  Comparar el producto con el diseño original para garantizar la fidelidad al mismo.  Verificar componentes fabricados para detectar posibles defectos.	<b>Creatividad</b> Habilidad para construir geometrías complejas a través de referencias bidimensionales	<b>Materiales</b> Conocimiento sobre las propiedades de los materiales utilizados.  <b>Diseño</b> Entender principios de diseño para crear productos funcionales y estéticos.  <b>Herramientas</b> Conocimiento sobre el uso y mantenimiento de herramientas manuales.  <b>Técnicas de Fabricación</b> Familiaridad con técnicas de corte, tallado, ensamblaje y acabado.  <b>Seguridad</b> Conocimiento de medidas de seguridad para prevenir accidentes durante la fabricación.

Tabla 9 Conocimiento tácito y declarativo identificado en los grupos de arquitectura y tallado.

### 9.6.6 Automatización

El análisis de contenido de la categoría de automatización se hizo de forma similar a la categoría de adaptación digital guiada por las partes: Persona experta, proceso de base manual y el artefacto como se describe en la figura 13, pero con la diferencia que no se tomaron todas las actividades del proceso de base manual, ya que en esta categoría el objetivo de los casos de estudio fue automatizar la tarea principal por medio de un brazo robótico que simula los movimientos corporales de la persona experta. Sobre los atributos tácitos, se identificaron: habilidades manuales; toma de decisiones; verificaciones y gestos corporales referidos a los movimientos y gestos manuales de la persona experta durante el proceso de fabricación, y la fuerza utilizada en la manipulación del material y las herramientas. A continuación, se describen los atributos por los grupos de la categoría.

### 9.6.7 Automatización en técnicas de cantería y trabajo de metales

En los grupos de Cantería y Trabajo de metales, se reunieron estudios que buscan automatizar las tareas tradicionales mediante la captura y análisis de los movimientos corporales de una persona experta, traduciéndolos en esquemas de control robotizado. En el grupo de cantería, los estudios se enfocaron en el tallado de piedra para acabados arquitectónicos, identificando gestos corporales y la destreza manual necesaria para esculpir la piedra. Respecto a la toma de decisiones, se observó que la persona experta ajusta parámetros como posición, ángulo y trayectoria de la herramienta basándose en la observación y sensibilidad táctil según las condiciones de la roca. Los estudios lograron en parte automatizar estas decisiones para que el robot pudiera ajustar sus acciones en función de las condiciones cambiantes del entorno y del material. La calidad del tallado se evalúa mediante inspección visual y táctil, y los conocimientos declarativos se encontraron en áreas técnicas y de materiales (Kalo et al., 2020; Shaked et al., 2020, 2021).

De manera similar, en el grupo de trabajo de metales, los estudios abordaron la transformación de metal mediante técnicas como el conformado manual de chapa metálica, el doblado de lámina con rueda inglesa y el pulido de piezas metálicas. Se identificaron gestos corporales y la destreza en el esculpido y pulido del metal, junto con la sensibilidad táctil. Respecto a la toma de decisiones, se observó que el experto se adapta a los cambios en la geometría de la pieza metálica durante el proceso, ajustando el ángulo, velocidad, fuerza y movimiento de la herramienta o la pieza. Los estudios lograron aproximarse a estas decisiones mediante los datos obtenidos y, en algunos casos, midiendo la fuerza de los impactos con las herramientas de tallado. La evaluación de la calidad de la superficie se realiza mediante inspección visual y táctil, y algunos estudios verificaron la automatización mediante la medición de los impactos sobre el metal. También se identificaron conocimientos declarativos en áreas técnicas y de materiales (Bowen et al., 2021; Ilangovan et al., 2016; Kalt et al., n.d.; Rossi, 2018). La tabla 10 describe el conocimiento tácito y declarativo de este grupo.

Autores	Técnica	Atributos tácitos clave	Conocimiento declarativo
---------	---------	-------------------------	--------------------------

		Habilidades manuales	Gestos corporales	Toma de decisiones	Verificaciones	
shaked, lee, Sinai & Sprecher, 2021.  shaked, lee, Sinai & Sprecher, 2020.  Kalo A., Tracy K., Tam 2020	Tallado de la piedra	<b>Esculpido</b> Destreza en el manejo de herramientas tradicionales como cinceles y martillos. Habilidad para realizar cortes precisos y suaves en el material.	<b>Gestos corporales</b> Gestos y movimientos específicos de forma precisa.	<b>Observación y sensibilidad táctil.</b> Habilidad para realizar decisiones en tiempo real basadas en retroalimentación visual y háptica. Sensibilidad táctil para ajustar el tallado según las condiciones del material.  Evaluación de la estabilidad y resistencia de la piedra durante el proceso de tallado. Resolución de problemas imprevistos durante el proceso de tallado.	<b>Inspección Visual</b> Examinar visualmente la calidad y precisión del tallado.  <b>Validación Táctil</b> Utilizar el sentido del tacto para detectar imperfecciones o áreas que requieran corrección.  <b>Medición</b> Verificar las dimensiones y proporciones según el diseño.	<b>Técnicos</b> Maquinado y acabado de piedra.  <b>Material</b> Conocimiento de los tipos de piedra y sus propiedades. Conocimientos en proporciones de mezcla de materiales.
Ilagovan, Monfared, Jackson, 2016  Bowen et al. 2021  Rossi, Nicholas, 2018  Ilagovan, Monfared, Jackson, 2016	Conformado de chapa metálica (doblado)  Doblado de lámina con rueda inglesa.  Pulido de piezas metálicas	<b>Esculpido /Pulido</b> Destreza en el uso de herramientas manuales. Habilidad para interpretar visualmente la deformación de la lámina durante el proceso. Habilidad para ajustar la presión y el movimiento de forma manual.  <b>Sensibilidad táctil y habilidades motoras</b> Trabajar con el metal de forma manual.	<b>Gestos corporales</b> Gestos y movimientos específicos de forma precisa.	<b>Observación y sensibilidad táctil</b> Habilidad para adaptarse a cambios en la geometría de la chapa durante la formación. Habilidad para interpretar visualmente la deformación de la lámina durante el proceso. Destreza en la coordinación mano-ojo para controlar el proceso de formación de láminas de metal. Ajustar la técnica de formación en función de la respuesta del material. Seleccionar el ángulo, velocidad, fuerza del movimiento de la herramienta durante la formación.	<b>Inspección Visual y táctil</b> Evaluación de la calidad del acabado de la pieza. Capacidad para identificar visualmente defectos en la superficie.	<b>Técnicos</b> Formación de chapa/herramientas específicas/rueda inglesa/proceso de pulido. Metalurgia y deformación de metales. funcionamiento de la rueda inglesa y su interacción con el material.  <b>Materiales</b> Conocimiento de la geometría y comportamiento de los materiales.

Tabla 10 Conocimiento tácito y declarativo identificado en el grupo de cantería y trabajo de metales.

### 9.6.8 Otras técnicas para la automatización

En esta sección se reunieron dos técnicas que no encajaron en las categorías anteriores: el desbaste de piezas de cuero para calzado y la fabricación de piezas mediante la técnica de Hand Lay-Up con materiales compuestos. La técnica de Hand Lay-Up consiste en la fabricación de piezas a partir de un molde simple donde se colocan capas de material, como fibra de vidrio o carbono, unidas por resina y prensadas a mano con un rodillo. Para capturar el conocimiento tácito de esta técnica, se recopilaron datos sobre la trayectoria del rodillo y la fuerza ejercida por la persona experta (Kikuchi & Suzuki, 2016).

En el caso del desbaste de piezas de cuero, a diferencia de los demás casos en la categoría de automatización, no se recopilaron datos sobre los gestos corporales de personas expertas. En su lugar, la automatización y emulación del conocimiento tácito se realizaron mediante un proceso de lógica difusa.

Este proceso permite controlar la trayectoria y adaptarse a la variabilidad de la textura y el espesor del cuero para evitar daños en el material. El controlador de lógica difusa permite a un brazo robótico ajustar suavemente la fuerza y la dirección de la pieza de cuero frente a la herramienta de desbaste, de forma similar a como lo haría un operario experto, ajustando el movimiento de sus manos según las condiciones cambiantes del material para mantener la calidad del acabado durante el proceso de desbaste (Pedrocchi et al., 2015). La tabla 11 describe el conocimiento tácito y declarativo para este grupo de otros casos de estudio.

caso de estudio	Atributos tácitos clave				Conocimiento declarativo
	Habilidades manuales	Gestos corporales	Toma de decisiones	Verificaciones	
Moldeo de piezas con materiales compuestos.	<p><b>Moldeo</b> Habilidad para manipular materiales y moldes de forma precisa. Destreza en el uso de herramientas manuales y rodillos para aplicar presión.</p>	Gestos y movimientos específicos de forma precisa.	<p><b>Observación, sensibilidad táctil</b> Determinar la presión compresiva adecuada al aplicar el rodillo. Aplicación de fuerza y presión para lograr la calidad deseada.</p> <p>Detectar imperfecciones y burbujas de aire.</p>	<p><b>Observación visual y la sensación táctil</b> Evaluación del grosor y uniformidad del material Sensación manual para detectar imperfecciones o inconsistencias</p>	<p><b>Conocimientos técnicos</b> Estabilidad dimensional y presión compresiva. Desairado y eliminación de burbujas de aire. Manejo de máquinas y herramientas</p> <p><b>Conocimiento de materiales</b></p>
Desbaste de piezas de cuero.	<p><b>Desbaste</b> Habilidad para manipular la herramienta de desbastado de manera precisa. Destreza en el trazado manual de trayectorias sobre el cuero.</p>		<p><b>Observación, sensibilidad táctil</b> Presión adecuada a aplicar entre la herramienta de desbastado y el cuero. Velocidad, movimiento, fuerza de la herramienta de desbastado para lograr el resultado deseado.</p>	<p><b>Observación visual y la sensación táctil</b> Identificación y corrección de problemas durante el proceso de desbastado. Acabado del cuero después del desbastado para garantizar que cumple con los estándares de calidad.</p>	

Tabla 11 Conocimiento tácito y declarativo identificado en el grupo de otros casos de estudio.

## 9.7 PR2: ¿Cómo se emulan los atributos tácitos clave en una intervención digital a la técnica convencional?

### 9.7.1 Adaptación digital

Para identificar cómo se emuló el conocimiento tácito en la digitalización de las técnicas correspondientes a esta categoría, se buscaron las herramientas digitales utilizadas en las investigaciones que imitaron el a tributo tácito “**habilidades manuales**”, y a su vez los cambios respecto al uso de la tecnología digital y los nuevos conocimientos declarativos para su ejecución. En el grupo de dispositivos médicos se encontró

que las habilidades manuales de sensibilidad táctil y moldeo para la obtención de la geometría de referencia de la parte del cuerpo humano de interés, se emularon con técnicas de ingeniería inversa de obtención de modelos digitales por escaneo 3D y en donde el conocimiento tácito de sensibilidad táctil para identificar regiones anatómicas clave es equivalente a la técnica convencional, mientras que la habilidad de moldear con las vendas de yeso o cera se imita con la herramienta de escáner 3D (Arias et al., 2019; Chang et al., 2006; Colombo et al., 2018; Cruz et al., 2020b; De Vivo Nicoloso et al., 2021; Geoffroy et al., 2018; Mohammed et al., 2018; Peker et al., 2020; Singare, Guanghui, et al., 2010; Wang et al., 2008).

Y las habilidades manuales de moldeo y esculpido fueron imitadas en software de modelado CAD, donde prevaleció el modelado de esculpido digital que permite en el medio virtual esculpir de forma similar que se realizaría con las manos utilizando pinceles digitales para agregar, retirar, suavizar, o aplanar una superficie, de esta forma se consiguen emular las modificaciones que se realizarían a los moldes de la técnica convencional (Chang et al., 2006; Colombo et al., 2018; Cruz et al., 2020b; Geoffroy et al., 2018; Mohammed et al., 2018; Singare, Guanghui, et al., 2010). También se encontró dispositivos hápticos que imitan la fuerza que se ejerce al momento de tallar un material en el medio virtual (Singare, Guanghui, et al., 2010). Y la obtención física de los modelos digitales se realizó por impresión 3D (Arias et al., 2019; Chang et al., 2006; Colombo et al., 2018; Cruz et al., 2020b; De Vivo Nicoloso et al., 2021; Geoffroy et al., 2018; Mohammed et al., 2018; Wang et al., 2008), o métodos CNC de manufactura sustractiva (Peker et al., 2020; Singare, Guanghui, et al., 2010), lo que reemplazó el proceso final de moldeo, sin embargo, se mantiene el atributo tácito de pulido y corte para lograr el acabo final de las piezas obtenidas por la manufactura digital.

En los grupos de arquitectura y tallado, de forma similar las habilidades manuales de moldeo y tallado se emularon con herramientas de modelado CAD principalmente el esculpido digital. Y la obtención de las piezas físicas se realizó por manufactura sustractiva con máquinas CNC (control numérico de 3 ejes), las

cuales desbasta material a partir de trayectorias tomadas de los modelos CAD digitales. En estos casos también se mantuvo la habilidad para pulido y corte que permite el acabado de las piezas (Bártolo, 2013; Cianfanelli et al., 2019; Díaz-Alemán, n.d.; Grimshaw, 2017; Marshall, 2007; Peinovich & Fernández, 2012).

Respecto a los demás atributos, se encontró que el objetivo de las intervenciones realizadas no fue un reemplazo total de las labores manuales si no que, al contrario, las herramientas digitales intervinieron en partes clave del proceso mostrando una manufactura híbrida. Por tanto, el atributo de **“toma de decisiones”** es equivalente a la técnica convencional a excepción de las decisiones de materiales y ajustes en las tareas que se modifican respecto a las herramientas digitales. De igual forma, **“verificaciones”** donde las habilidades de tacto y observación para evaluar el artefacto final son equivalentes a la técnica convencional. El atributo de **“percepción espacial”** es equivalente para entender la forma y espacio desde los entornos digitales, al igual, que el atributo **“creatividad”** para la construcción de geometrías complejas con herramientas de modelado CAD. La tabla 12 detalla la emulación del conocimiento tácito para el grupo de Adaptación digital.

Intervención digital			
Atributo tácito clave	emulación	Cambios	conocimientos declarativos respecto a herramientas digitales
Sensibilidad Táctil		Equivalente a la técnica convencional.	
Moldeo	Ingeriría inversa Escáner 3Dcomercial/Sensor Kinect/Tomografía computacional	Manejo de escáner 3D y calibración de la herramienta. Uso de software CAD: reparar malla, rellenar vacíos, eliminar ruidos	Técnico Principios del escaneo 3D. Tipo de método por franjas, cámaras infrarrojas, calibración del equipo.  Clases de mallas: estructura de la malla, nube de puntos, densidad, calidad, peso.
Esculpido/Moldeo	Modelado CAD Herramientas convencionales Herramienta de esculpido digital dispositivos hápticos	Habilidades en los softwares CAD Modificar mallas o superficies con herramientas de esculpido digital, suavizar agregar, quitar material.	Técnico Tipos de modelado y herramientas de software CAD
Moldeo	Manufactura digital impresión 3D MDF /Maquina CNC	Habilidades en el software para preparar el archivo de impresión 3D/maquinado CNC. Habilidades en el uso de las maquinas	Técnico conocimientos de manufactura aditiva o sustractiva, construcción de trayectorias.  Materiales Propiedades de los materiales de manufactura digital.
Corte/pulido		Acabado de piezas obtenidas por manufactura digital	
Percepción espacial		Habilidad para visualizar y trabajar en 3D para construir de modelos digitales tridimensionales.	
Creatividad		Habilidad para construir geometrías complejas a través de referencias bidimensionales,	

		impresiones de molde se trasladó a las herramientas de modelado CAD	
Verificaciones Inspección visual/táctil		<b>Equivalente a la técnica convencional</b>	
Toma de decisiones		<b>Equivalente a la técnica convencional</b> Selección del tipo de prótesis; Selección de diseño; Acabado estético; Personalización/diseño a medida; seguimiento  <b>Modificado a las tecnologías digitales</b> Selección de materiales; Ajustes durante el proceso de fabricación.	

Tabla 12 Emulación de los atributos tácitos en la categoría adaptación digital.

### 9.7.2 Automatización

En esta categoría, se identificaron herramientas que emularon los atributos tácitos. El atributo de “**gestos corporales**” y las “**habilidades manuales**” de tallado, pulido y moldeo se replicaron mediante la captura de los movimientos corporales de expertos, usando cámaras y sensores. En el grupo de cantería, se registraron la trayectoria, velocidad y ángulos de entrada de la herramienta en el tallado de la piedra (Kalo et al., 2020; Shaked et al., 2020, 2021). Y en el grupo trabajo de metales además se capturó la fuerza ejercida con la herramienta (Bowen et al., 2021; Ilangovan et al., 2016; Kalt et al., n.d.; Rossi, 2018). Estos datos se utilizaron para programar brazos robóticos que emularon la actividad con herramientas convencionales. En contraste, el desbaste de piezas de cuero para calzado se emuló con un controlador de lógica difusa (Pedrocchi et al., 2015).

En cuanto a la toma de “**decisiones**” y “**verificaciones**”, basadas en la observación y sensibilidad táctil para ajustar fuerza, ángulos y movimientos según las características del material, se lograron emular gracias a que los robots en los estudios contaban con cámaras y sensores de fuerza. Estos sensores analizan el material o la pieza durante la tarea, permitiendo variar los parámetros de trayectoria o fuerza para obtener el resultado deseado (Bowen et al., 2021; Ilangovan et al., 2016; Kalo et al., 2020; Kalt et al., n.d.; Rossi, 2018; Shaked et al., 2020, 2021). La tabla 13 resume los hallazgos.

Intervención digital		
Atributo tácito clave	emulación	Cambios
Gestos corporales	<b>Herramientas</b> Sistemas de cámaras y sensores de presión.	Robot realiza la tarea, reemplazando a la persona experta.

Esculpido /Pulido	<b>Datos</b> Captura de movimiento/fuerza con la herramienta manual de una persona experta.
Moldeo	<b>Métricas</b> Trayectoria; posición; orientación de las manos y herramienta manual durante la tarea. velocidad de la herramienta; ángulo de entrada; recorrido del tallado; área tallada; número de golpes por segundo de la herramienta; presión ejercida
Desbaste	<b>Herramienta</b> Controlador de robot con lógica difusa. <b>Métricas</b> Trayectoria; fuerza; dirección de la pieza durante la tarea.
Toma de decisiones	Decisiones basadas en los datos obtenidos de cámara y sensores durante la ejecución de la tarea.
Verificaciones Inspección visual/táctil	

Tabla 13 Emulación de los atributos tácitos en la categoría Automatización.

## 9.8 Marco de Referencia

Con las respuestas a las preguntas planteadas sobre qué tipo de conocimiento tácito se requiere emular y los medios para su emulación, en las intervenciones digitales a los procesos de fabricación manual, se planteó un marco de referencia que busca establecer relaciones en cuanto al uso de las tecnologías digitales y los conocimientos tácitos aplicados en las tareas y actividades del proceso de desarrollo de un producto. Esto permitió que los artefactos construidos con la intervención sean lo más fieles posible a los resultados obtenidos mediante la técnica convencional.

En la categoría de adaptación digital, se demuestra cómo las integraciones tecnológicas CAD/CAM intervienen en el atributo tácito “**habilidades manuales**” en tareas del proceso tradicional, como el moldeo, esculpido, corte y pulido. De manera similar, el atributo “**percepción espacial**” y “**creatividad**” se adaptan para el trabajo digital para entender el entorno y las geometrías en 3 dimensiones de forma virtual posibilitando la construcción de formas complejas. Y Los atributos tácitos en la “**toma de decisiones**” y verificaciones se mantienen en su mayoría equivalentes, dado que, si bien cambia el tipo de herramienta, se requiere de la inspección visual y sensibilidad táctil. Estas actividades las realiza la persona experta a través del tacto y la observación de pruebas con usuarios y características físicas del artefacto construido. Las actividades de verificación y las decisiones tomadas durante el proceso de fabricación se ajustan según los medios digitales utilizados. La figura 14 describe el marco de referencia.

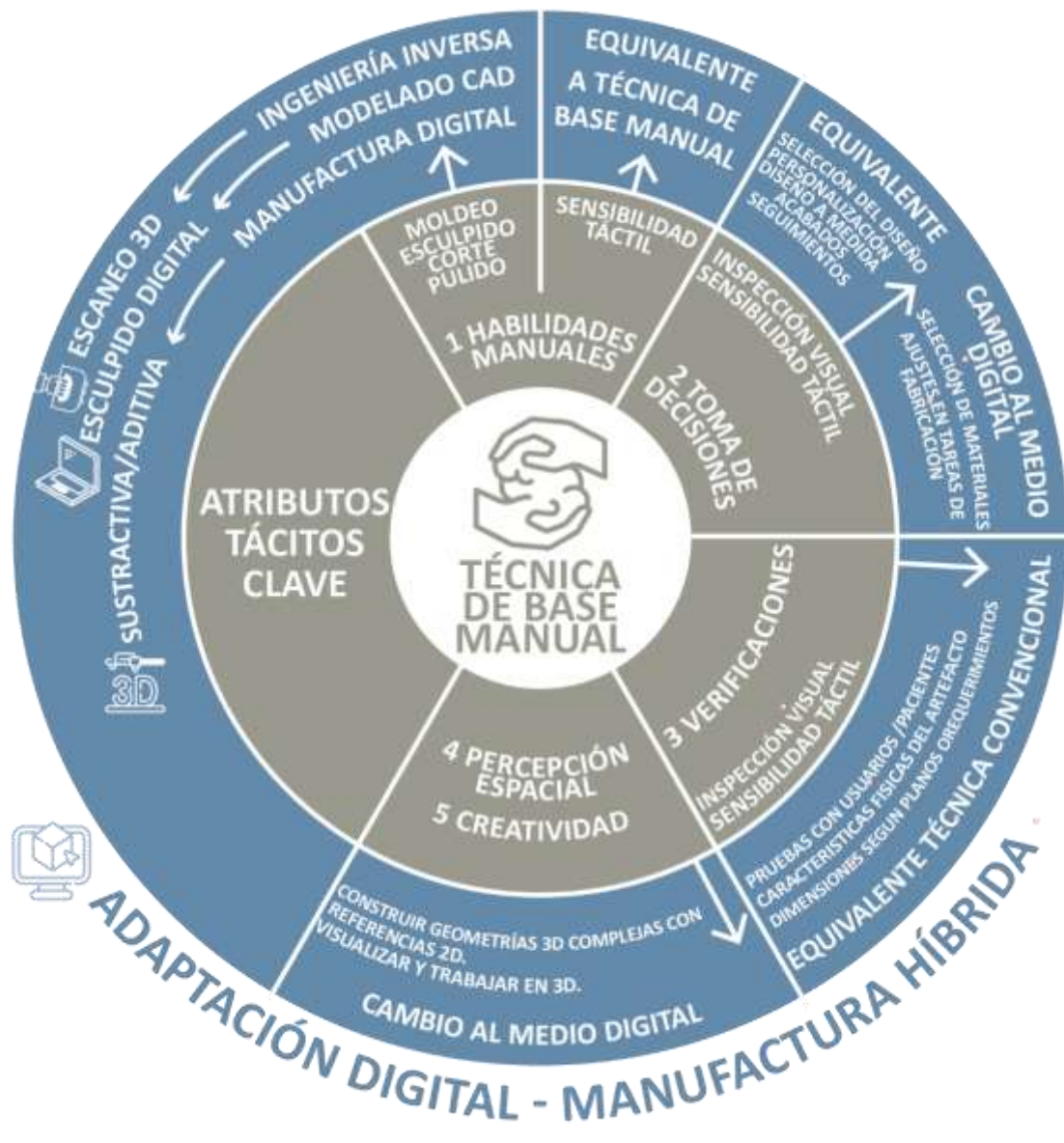


Figura 14 Marco de referencia para la categoría adaptación digital.

En cuanto a la categoría de automatización, se muestra otro marco de referencia, donde se toman los atributos tácitos del método convencional con el objetivo de reemplazar a la persona experta por un brazo robótico. Se estudian los **“gestos corporales”** por medio de cámaras y sensores de presión que capturan datos de trayectoria, la velocidad, y la fuerza con que la persona realiza la labor, al utilizar herramientas manuales. Y estos datos se traducen en los movimientos y acciones de un brazo robótico

que emula la actividad. Además, los atributos de “toma decisiones” y “verificaciones” que desde el método convencional se realizan mediante la inspección visual y la sensibilidad táctil del experto se imitan al integrar cámaras y sensores de presión en el robot que ejecuta la tarea, según la figura 15.

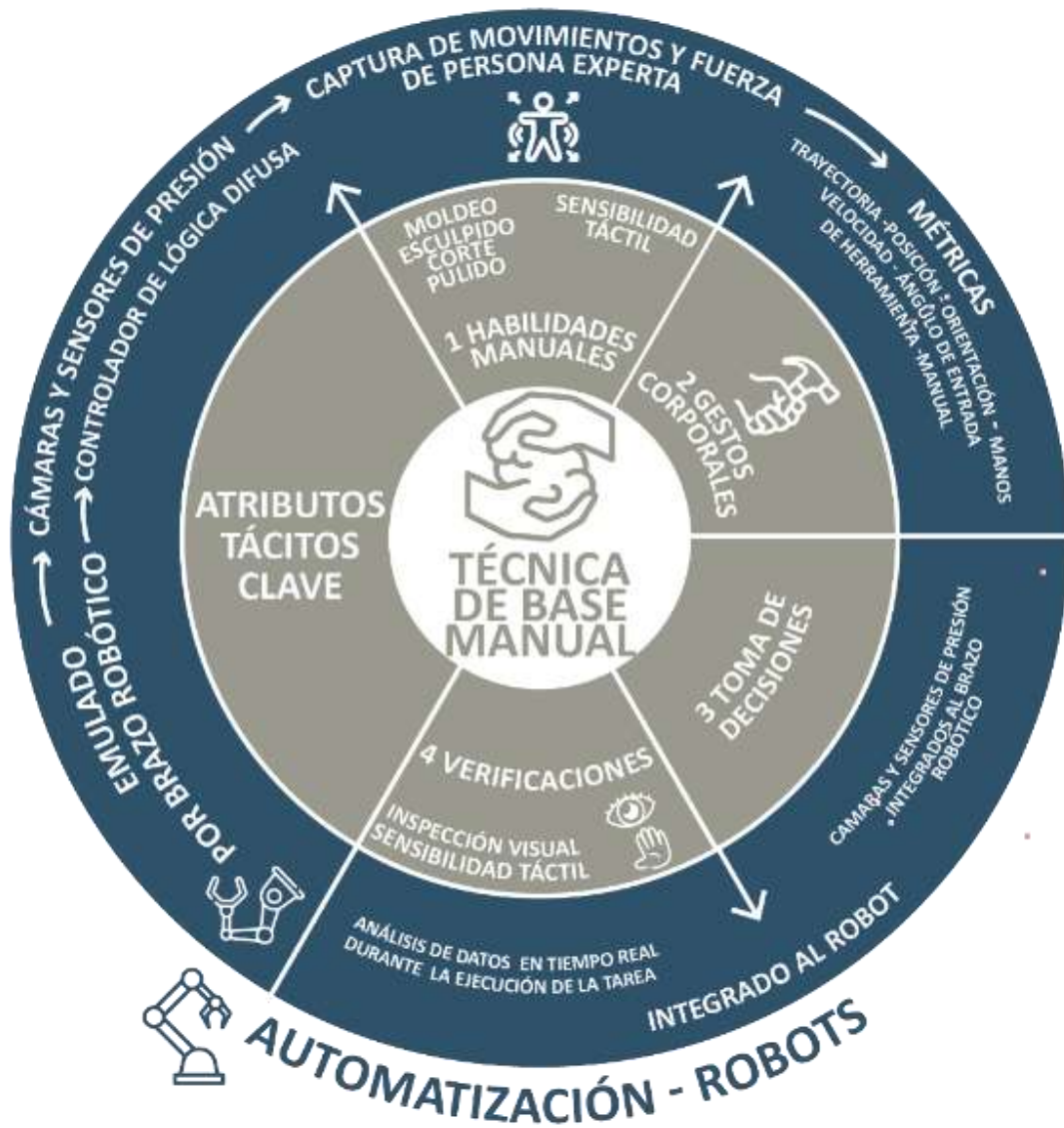


Figura 15 Marco de referencia para la categoría automatización.

## 10 FASE 2 ESTUDIO DE CAMPO ENTREVISTAS Y OBSERVACIONES DE CAMPO PARA EL CASO DE ESTUDIO PROCESO TRADICIONAL DE FABRICACIÓN DE SOCKETS

### 10.1 Entrevistas semiestructuradas

Se realizaron 10 entrevistas a técnicos ortoprotésicos expertos de diferentes casas ortopédicas y ciudades. como se muestra en la siguiente tabla. Las entrevistas se realizaron tanto de forma presencial como virtual mediante la plataforma Zoom. En ambos casos, las entrevistas fueron grabadas y para su transcripción se utilizó el software DESCRIPT. La tabla 14 describe el código del técnico la casa ortopédica y la ciudad.

Técnico código	Casa ortopédica	Ciudad
T1	mahavir kmina	Medellin
T2	mahavir kmina	Medellin
T3	mahavir kmina	Medellin
T4	mahavir kmina	Medellin
T5	Orthosander	Bucaramanga
T6		Ciudad de México
T7	Líneas hospitalarias	Bucaramanga
T8	Cicop	Bucaramanga
T9	Líneas hospitalarias	Bucaramanga
T10	Líneas hospitalarias	Bucaramanga

*Tabla 14 Técnicos para entrevistas.*

La tabla 15 revela las preguntas realizadas a los participantes:

Consideraciones previas	Molde negativo	Molde positivo
¿Cuáles factores influyen en la elección de los componentes de la prótesis?	¿Cómo construye el molde negativo?	¿Cómo se construye el molde positivo?
	¿Qué tipo de marcaciones se realiza sobre el muñón?	¿Qué factores determinan el escalado del molde? ¿Como se verifica?
	¿Cuáles mediciones se toman sobre el muñón?	¿Cuáles modificaciones se hacen de forma general al molde?
	¿Qué regiones generales tienen en cuenta para presionar sobre el muñón y las vendas de yeso?	¿Cuáles modificaciones se hacen específicamente para cada paciente?

	¿Dependiendo del paciente qué regiones se presionan sobre el muñón con las vendas de yeso? ¿Cómo se hacen esas presiones y se verifican?	¿Qué determina la geometría de las zonas de presión y liberación? ¿Cómo son esas formas? ¿Cómo se verifican?
		¿Qué determina la forma proximal del molde? ¿Cómo se verifica?
		¿Qué determina la forma distal del molde? ¿Cómo se verifica?

Tabla 15 Preguntas propuestas para entrevistas semi estructuradas.

## 10.2 Análisis de datos

### 10.2.1 Codificación

Una vez transcritas las entrevistas la información se organizó por las fases principales y sus tareas que determinan el flujo de trabajo de la técnica convencional, se identificaron 25 códigos que agruparon la información con conocimiento tácito relevante, esta actividad se realizó en el software excel. Se buscaron descripciones sobre el saber hacer Know how, toma de decisiones que determinan la geometría del socket y que estuvieran relacionadas directamente desde la experiencia de los técnicos participantes. En ese sentido, se descartó información del Know what (saber que) que está más relacionado con el conocimiento explícito direccionado por un conjunto de reglas, Por otro lado también se encontró como conocimiento tácito relevante las apropiaciones a la técnica convencional de fabricación de sockets que cada técnico apropió desde su experiencia obviando o haciendo algunos pasos de manera diferente, teniendo en cuenta que el conocimiento tácito es una construcción personal lograda desde las propias vivencias de la persona en la experiencia de trabajar la técnica.

### 10.2.2 Nivel cognitivo según el marco SRK

Se asignaron las categorías: skills, rules y knowledge a los códigos identificados dependiendo de qué tan complejo resulta la toma de decisiones para ejecutar la tarea dentro del flujo de trabajo respecto a su dimensión tácita.

- **Skill** En la categoría inicial de "Rules", se tomaron en cuenta los códigos que mostraron para los técnicos la habilidad de reconocer de manera instantánea la situación requerida para una tarea específica y responder a ella de forma inmediata. Y la respuesta dada es ejecutada de forma automática y sin esfuerzo ya que los participantes técnicos poseen un nivel de destreza tal que requieren una atención mínima para llevar a cabo las acciones, las cuales están interiorizadas en su ejecución; se encontraron los códigos asociados a las tareas de evaluar el estado del muñón con inspecciones visuales y tacto, identificar y marcar regiones críticas como las prominencias óseas que determinan las zonas de carga y las retroalimentaciones que se hacen en diálogo con el paciente.
- **Rules** en esta segunda categoría se agruparon los códigos relacionados con las tareas del flujo de trabajo, que se encuentran guiadas por un control más consciente en forma de reglas identificadas por los técnicos participantes. A través de la experiencia y resolución de problemas en la manufactura del socket, los técnicos son conscientes que hay formas alternativas para resolver la situación. Se identificaron los códigos pertinentes a la toma de decisiones en cuanto a las presiones aplicadas en el molde negativo, así como los códigos vinculados a las correcciones realizadas en el molde positivo. Estos aspectos involucran diversos factores, como el tipo de suspensión del socket, el estado muscular y la longitud del muñón. Estas decisiones están guiadas por las reglas del proceso de manufactura, asimiladas y adaptadas en algunos casos según la experiencia individual de cada técnico participante.
- **Knowledge** En esta categoría final se han agrupado códigos que reflejan tareas que requieren un nivel de complejidad sustancial, superando la profundidad de los niveles anteriores. Esto es el resultado de situaciones inesperadas, como casos de muñones con geometrías complicadas o condiciones físicas particulares de los pacientes. Se han identificado códigos relacionados con casos específicos de alta complejidad debido a la geometría y longitud del muñón, factores que

dificultan la toma de decisiones para la selección de componentes de la prótesis y, al mismo tiempo, el moldeado en la región distal del socket para su integración con las partes estandarizadas de la prótesis.

A continuación, se describen los códigos identificados agrupados por la fase y tareas principales del flujo de trabajo:

### 10.2.3 Consideraciones previas

En esta fase se determina una sola tarea principal que es identificar el tipo de socket transtibial y las respectivas piezas modulares de la prótesis, se encontraron dos códigos con conocimiento tácito importante: *1 Evaluar el estado del muñón* para decidir si es posible realizar la prótesis y *2 Nivel de amputación del muñón* para la toma de decisiones sobre los componentes de la prótesis en función de la longitud del muñón. En la tabla 16 se describen los códigos:

Tarea	Código	Parte tacita	Skills	Rules	Knowledge
Definir los componentes de la prótesis y tipo de socket	<b>Consideraciones sobre la longitud del muñón:</b> La toma de decisiones en relación con la selección de los componentes modulares de la prótesis se basa en la longitud del muñón. Un muñón prolongado ofrece una ventaja significativa en términos de palanca y resulta ideal para la protetización. Sin embargo, cuando la longitud es excesiva y su extremo distal se encuentra muy próximo al tobillo, surgen limitaciones para colocar una caña (tubo metálico) y se complica la elección del tipo de pie y su articulación adecuados.	<b>Know how:</b> Escoger los componentes de la prótesis en función de la longitud del muñón.	*	*	*
Definir los componentes de la prótesis y tipo de socket	<b>Evaluación del estado del muñón:</b> Implica discernir si el muñón es apto para la prótesis basándose en su condición. Esto se logra mediante una inspección visual y táctil que permite determinar si el tono muscular es el adecuado. Un muñón con flacidez excesiva puede contener líquido que, con el uso de la prótesis, causa una disminución en su tamaño, lo que resulta en una incompatibilidad con el socket.	<b>Know how:</b> Decidir si el muñón es apto para ser protetizado dependiendo de su estado si presenta enemas o condiciones que requieran terapias.	*		

Tabla 16 Códigos identificados en la fase de consideraciones previas.

### 10.2.4 Molde negativo

Esta fase tiene como objetivo tomar la geometría del muñón del paciente, se identificaron los pasos de: envolver en papel *film* el muñón con o sin *liner*, dependiendo si la prótesis lo requiere; marcaciones de zonas de carga, descarga y perímetros; envolver con vedas de yeso, presiones; y alineación. La tabla 17 muestra los códigos identificados.

Tarea	Código	Parte tacita	Skill	Rules	Knowledge
Marcaciones zonas de carga y descarga	<b>Regiones críticas en el muñón:</b> Se define por la experiencia y la habilidad manual de visualizar y palpar para encontrar correctamente las regiones importantes que corresponden a zonas de carga y descarga. También se entiende que estas regiones son personalizadas y no son las mismas en cada paciente y es necesario reconocerlas diferencias desde la experiencia del técnico.	<b>Know how:</b> Identificar las regiones importantes en el muñón desde el ejercicio del tacto. <b>Habilidad manual:</b> palpar/visualizar.	*		
Marcaciones zonas de carga y descarga	<b>Validaciones con el paciente:</b> En un dialogo con el paciente el técnico valida correctamente las regiones sensibles que tanta presión o cuanto dolor tienen en función de identificar correctamente las zonas a demarcar	<b>Know How:</b> Validar marcaciones con el paciente. Identificar regiones según el estado del muñón	*		
Marcación de circunferencias	<b>Toma de perímetros:</b> Apropiación de la técnica en función del inicio de la toma de medidas y la distancia dependiendo de la longitud del muñón	<b>Know how:</b> toma correcta de la medida y su marcación. Apropiación de la técnica tradicional	*		
Presiones al molde negativo	<b>Consideraciones respecto a la suspensión:</b> Toma de decisiones en cuanto a la cantidad de presión realizada sobre el molde negativo durante la toma de medidas en función del tipo de suspensión con o sin linner. Si la prótesis tiene linner la presión debe ser menor	<b>Know how:</b> nivel de presión en el molde negativo <b>Habilidad manual:</b> moldeo	*	*	
Presiones al molde negativo	<b>Consideraciones respecto estado del muñón:</b> Toma de decisiones en cuanto a los niveles de presión en el molde negativo en función del estado muscular del muñón. A mayor flacidez del muñón se puede realizar una mayor presión en el molde negativo.	<b>Know how:</b> nivel de presión en el molde negativo <b>Habilidad manual:</b> moldeo	*	*	
Presiones al molde negativo	<b>Actividad física del paciente:</b> Toma de decisiones en cuanto a los niveles de presión en el molde negativo dependiendo de la actividad física del paciente, Si es un paciente con una actividad física elevada como deportista las presiones sobre el molde negativo deben ser mayores, más pronunciadas	<b>Know how:</b> nivel de presión en el molde negativo <b>Habilidad manual:</b> moldeo	*	*	

Presiones al molde negativo	<b>Rectificaciones desde el molde negativo:</b> Se busca realizar la mayor cantidad de modificaciones al molde negativo al tomar medidas para conseguir una forma más anatómica al socket y reducir la cantidad de rectificaciones al molde positivo en el paso posterior. (esta estrategia no siempre se contempla en la técnica tradicional)	<b>Know how:</b> nivel de presión en el molde negativo <b>Habilidad manual:</b> moldeo <b>Apropiación de la técnica tradicional</b>	*	*	
-----------------------------	--	---	---	---	--

Tabla 17 Códigos identificados en la fase de molde negativo.

### 10.2.5 Molde positivo

En esta fase se obtiene un positivo de la geometría del muñón por vaciado de yeso, se encontraron las siguientes tareas: vaciado del molde; rectificado del molde; rectificación de zonas de carga y descarga. En este análisis sobre el escalado del molde se identificó que los técnicos no lo realizan de forma homogénea en la superficie del molde positivo, si no que tienen en cuenta las regiones donde es posible retirar material de la superficie del molde positivo, y las regiones sensibles no son intervenidas, o en ciertas circunstancias son liberadas es decir se agrega material en la superficie del molde para que no se afecten por presiones durante el uso del socket.

o las liberan. Y utilizan las medidas de los perímetros circunferenciales para tener una referencia inicial para hacer estas reducciones o liberaciones, comparando el antes y después de la rectificación, por tanto, la tarea de escalado de molde cambia a rectificaciones del molde. La tabla 18 muestra los códigos identificados junto con el componente tácito encontrado y organizado en los pasos mencionados.

Tarea	Código	Parte tacita	Skill	Rules	Knowledge
Preparar el molde	<b>Consideraciones respecto al material:</b> Se refiere a los conocimientos necesarios que involucran la mezcla para el yeso, su preparación, para que pueda ser tallado en las diferentes rectificaciones, como el pulir o agregar material teniendo en cuenta tapar los poros o reducir la humedad.	<b>Know how:</b> Preparar el molde para ser rectificado con los conocimientos interiorizados del material (yeso). <b>Habilidad manual:</b> moldeo	*		

Rectificaciones al molde	<p><b>Rectificaciones respecto al estado del muñón:</b> Toma de decisiones sobre como pulir el molde en función del nivel muscular del muñón a mayor flacidez mayor el porcentaje de reducción sobre el cuerpo del molde, pero respetando las regiones óseas marcadas previamente.</p> <p>se tienen en cuenta tablas de porcentajes de reducción y retroalimentación previa con el paciente.</p>	<p><b>Know-how:</b> Toma de decisiones cuanto se debe reducir/aumentar en el molde positivo.</p> <p><b>Habilidad manual:</b> tallado</p> <p><b>Know-what=</b> menos táctico tablas y porcentajes para el escalado.</p>	*	*	
Rectificaciones al molde	<p><b>Personalización de la técnica sin escalado:</b> El técnico manifiesta no escalar el molde positivo porque bajo su experiencia dificulta el proceso de fabricación del socket, porque se corre el riesgo de perder la geometría del muñón y se tiene un resultado menos anatómico</p>	<p>Personalización de la técnica direccionada por la experiencia</p> <p><b>Habilidad manual:</b> tallado</p>	*	*	
Rectificaciones al molde	<p><b>Consideraciones de la pierna sana:</b> Al tomar mediciones de la pierna sana en algunos casos es posible acercar las medidas del escalado del molde a las dimensiones de la pierna sana comparando las medidas de sus circunferencias al igual que una comparación con respecto a la altura de la rodilla es posible que la del muñón este a diferente altura</p>	<p>Personalización de la técnica direccionada por la experiencia. <b>Know how:</b> Como hacer el escalado del molde en función de la comparación de perímetros con la pierna sana y muñón.</p>	*	*	
Rectificaciones al molde	<p><b>Control de las rectificaciones con las medidas circunferenciales:</b> Una forma de controlar las dimensiones finales de las rectificaciones tanto para las liberaciones como las presiones es comparar las medidas de las circunferencias a la altura de la región a rectificar. La medida inicial muestra un inicio para la reducción o el aumento teniendo en cuenta que se deben respetar las zonas sensibles, al hacer la rectificación se comparan las dos medidas.</p>	<p><b>Know how:</b> cuanta liberación/ presión se debe realizar</p> <p>Toma de decisiones en función de la medida de circunferencia frente a la medida del molde y las consideraciones del paciente.</p> <p><b>Habilidad manual:</b> tallado</p>	*	*	
Rectificaciones al molde	<p><b>Las presiones y liberaciones siguen la forma de la anatomía de la región:</b> la geometría de las rectificaciones continua la forma del muñón intentando que sean lo más anatómicas posibles.</p>	<p><b>Know how:</b> geometría de las rectificaciones</p> <p>las liberaciones y presiones siguen la forma de la anatomía del usuario</p> <p><b>Habilidad manual:</b> tallado</p>	*		
Zonas de liberación	<p><b>Rectificaciones personalizadas a cada paciente:</b> Regiones poco comunes que sean necesarias de liberar dadas por protuberancias en la región distal, implantes u otra condición que requiera ser descargada durante la marcha.</p>	<p><b>Know-how:</b> Toma de decisiones cuanto material agregar para construir las liberaciones identificadas.</p> <p><b>Habilidad manual:</b> tallado</p>	*	*	*
Zonas de liberación	<p><b>Personalización de la técnica liberaciones previas:</b> Estrategia diferente tomada del proceso tradicional en la que las liberaciones al molde se realizan desde la construcción del molde negativo agregando material sobre las</p>	<p><b>Know-how:</b> Toma de decisiones cuanto material agregar para</p>	*	*	

	regiones de descarga directamente en el muñón o linner, para que en el proceso de vaciado ya se encuentren liberadas las zonas identificadas	construir las liberaciones identificadas. <b>Habilidad manual:</b> tallado <b>Apropiación de la técnica</b>			
Zonas de presión	<b>Rectificaciones según el tipo de suspensión:</b> Toma de decisiones respecto a las zonas de carga, regiones a presionar que requieren retirar material en función del tipo de la suspensión de la prótesis, cuando el socket lleva linner las presiones ejercidas son menores.	<b>Know-how:</b> Toma de decisiones cuanto material agregar para hacer liberar la región identificada. <b>Habilidad manual:</b> tallado	*	*	
Zonas de liberación	<b>Respetar la anatomía del muñón: Para verificar las liberaciones realizadas en las zonas de descarga si alteran demasiado la anatomía del muñón, hay que reducirlas si no agrega mucho yeso al molde.</b>	<b>Know how:</b> Verificar las liberaciones en el molde positivo <b>Habilidad manual:</b> tallado	*		
Zonas de liberación	<b>Liberaciones respecto al estado del muñón:</b> Nivel de liberación cantidad de material a agregar dependiendo de que tan fuertes son las prominencias óseas, entre más fuertes sean se requiere una mayor liberación	<b>Know How:</b> Como configurar las zonas de descarga de la marcha. <b>Habilidad manual:</b> tallado	*		
Zonas de liberación	<b>Consideraciones personalizadas al paciente:</b> Cuando son pacientes que ya están acostumbrados a un tipo de socket previo se respeta las liberaciones y presiones presentes en la geometría de su socket, ya que modificantes considerables pueden causar molestias durante la marcha o en el uso en general del artefacto	<b>Know How:</b> Como configurar las zonas de carga y descarga de la marcha <b>Habilidad manual:</b> tallado	*		

Tabla 18 Códigos identificados en la fase de molde positivo.

### 10.2.6 Región proximal

Esta fase comprende la configuración de la región proximal del socket, en donde se construye la mayor parte de las presiones que aportan a la suspensión de la prótesis. Para las paredes medial/lateral la región de los cóndilos; pared anterior la región de la rótula; pared posterior la fosa poplítea. Las variadas regiones en todas las paredes del socket hacen que su borde tenga una geometría compleja. La tabla 19 muestra los códigos identificados.

Tarea	Código	Parte tacita	Skill	Rules	Knowledge
Construcción del borde proximal	<b>Rectificaciones respecto al estado del muñón:</b> Toma de decisiones sobre como configurar el borde proximal del socket teniendo en cuenta que para los muñones delgados demasiada presión en el borde proximal puede llegar a lastimar durante la marcha	<b>Know how:</b> configurar el borde proximal del socket <b>Habilidad manual:</b> moldeo	*	*	
Construcción del borde proximal	<b>Consideraciones respecto del largo del muñón:</b> en las zonas medial y lateral se construyen las aletas que rodean la región condilar cuando el muñón es largo se tiene un buen brazo de palanca por tanto la	<b>Know how:</b> configurar el borde proximal del socket	*		

	altura de los cóndilos no debe ser muy pronunciada	<b>Habilidad manual:</b> moldeo/corte			
Construcción del borde proximal	<b>Consideraciones personalizadas al paciente:</b> Cuando son pacientes que ya están acostumbrados a un tipo de socket previo se respeta la forma de las aletas y el corte en la región anterior y posterior	<b>Know how:</b> configurar el borde proximal del socket <b>Habilidad manual:</b> moldeo/corte	*		
Construcción del borde proximal	<b>Corte del borde proximal según valor estético y funcional:</b> el corte de las aletas debe permitir una buena suspensión en el caso de la interfase blanda y a su vez debe verse bien no sobresalir sobre las prendas que utilice el paciente	<b>Know how:</b> forma del anillo mando o región proximal Altura de las aletas entre lo funcional y cosmético. <b>Habilidad manual:</b> moldeo/corte	*		

Tabla 19 Códigos identificados en la fase de región proximal.

### 10.2.7 Región distal

En esta fase se hacen las rectificaciones necesarias en la región distal del molde positivo que permiten la marcha y la unión con el resto de las piezas modulares de la prótesis. A continuación, se muestran los códigos identificados en la tabla 20.

Tarea	Código	Parte tacita	Skill	Rules	Knowledge
Región Distal	<b>Consideraciones según prominencias óseas:</b> Toma de decisiones en cuanto a la configuración de la geometría distal teniendo en cuenta prominencias como puntas de los huesos prominentes producto de cirugía u otra condición como implantes. Si existen estas prominencias es necesario liberarlas teniendo en cuenta mantener una forma redondeada y anatómica al muñón del paciente	<b>Know how:</b> configurar la zona distal del socket. <b>Habilidad manual:</b> moldeo	*	*	
Región Distal	<b>Consideraciones según piezas modulares de la prótesis:</b> como moldear la región distal para que sea posible colocar un adaptador que permita conectar con las piezas estandarizadas. En algunos casos por una geometría compleja del muñón o si es muy largo mayor al tercio medio se hace necesario construir un adaptador especial personalizado al paciente.	<b>Know how:</b> configurar la zona distal del socket <b>Habilidad manual:</b> moldeo.	*	*	*
Región Distal	<b>Consideraciones según la biomecánica de la marcha:</b> según los esfuerzos que se producen al momento de caminar o utilizar la prótesis es necesario liberar la región distal para mitigar posibles molestias en el hueso remanente.	<b>Know how:</b> configurar la zona distal del socket <b>Habilidad manual:</b> moldeo	*		

Tabla 20 Códigos identificados en la fase de región distal.

### 10.3 Temas y categorización

Se realizó una categorización basada en los atributos tácitos de toma de decisiones, verificaciones y sensibilidad táctil, agrupando los códigos previamente identificados. A su vez, estas categorías se organizaron en temas dentro del atributo tácito de habilidades manuales, identificándose tres temáticas principales: 1) Moldeo, 2) Moldeo y Tallado, y 3) Corte y Pulido. Cada una de estas temáticas se asocia con etapas específicas del proceso de fabricación de sockets:

1. **Moldeo:** Involucra la obtención del molde negativo del muñón y la conformación de la región distal del molde positivo.
2. **Moldeo y Tallado:** En la construcción del molde positivo, en donde el tallado se refiere a las tareas de retirar yeso del molde positivo para configurar las regiones de presión.
3. **Corte y Pulido:** Enfocado en la elaboración y acabado de la región proximal del socket.

Además, se identificó una categoría de "Apropiación a la Técnica," donde se agruparon códigos relacionados con tareas que los técnicos han adaptado o modificado según su experiencia en la fabricación de prótesis. Estas adaptaciones se observaron particularmente en la etapa de obtención de los moldes negativo y positivo, específicamente en las mediciones de las circunferencias del muñón y en los ajustes del molde positivo. La estructura jerárquica de temas, categorías y códigos se ilustra en la Figura 16. Esta organización permitió identificar el conocimiento tácito más relevante, definido como "know-how," junto con sus variables en cada etapa del proceso de fabricación.

### 10.4 Interpretación

La categorización de los códigos en los atributos tácitos identificados en la revisión de literatura muestra una conexión entre ellos en donde los atributos tácitos no están presentes de forma individual, al contrario siendo el principal atributo en el conocimiento tácito del proceso convencional de fabricación de sockets las "**habilidades manuales**", los atributos de "**verificaciones**" y "**toma de decisiones**" guían

las actividades de moldeo de transformación del material y direccionan la geometría de los moldes y del socket para que sea adecuada a la forma del paciente.

La categorización de los códigos en los atributos tácitos, identificados a partir de la revisión de la literatura, revela una interconexión entre ellos. Estos atributos no existen de forma aislada; el principal atributo en el conocimiento tácito del proceso convencional de fabricación de sockets es las **“habilidades manuales”**. Y Los atributos de verificaciones y toma de decisiones orientan las habilidades manuales en las actividades de moldeo y transformación del material, así como la dirección de la geometría de los moldes y del socket, para que se adapten adecuadamente a la forma del paciente.

Además, la sensibilidad táctil y la inspección visual son fundamentales para los atributos de **“verificaciones”** y **“toma de decisiones”**, como se identificó en la revisión de la literatura. En el caso de la fabricación de sockets, estos atributos tácitos están fuertemente influenciados por el diálogo con el paciente durante la fase del molde negativo. En esta fase, se obtiene retroalimentación del paciente sobre las regiones sensibles del muñón y los niveles de dolor que puede tolerar. Este diálogo permite personalizar el socket según las necesidades y costumbres del paciente. En las pruebas de marcha y postura de la prótesis, se dialoga continuamente con el paciente, que ayuda a validar la forma del socket, ya que expresa cualquier dolor o molestia en el muñón al usar la prótesis.

Se identificó la categoría de **“apropiación a la técnica”** como un componente del conocimiento tácito. Esta categoría abarca las modificaciones que los técnicos han hecho al proceso convencional de fabricación de sockets, basadas en su experiencia. Por ejemplo, técnicos T9 y T10 ajustan las mediciones de las circunferencias del muñón al tomar medidas con y sin presión de la cinta métrica. Un caso notable es el técnico T5 que opta por no realizar el escalado y las liberaciones en las zonas óseas del molde positivo, lo que resulta en un socket más anatómico y adaptado al paciente. La figura 16 describe los temas y la categorización realizada.

# Habilidades manuales

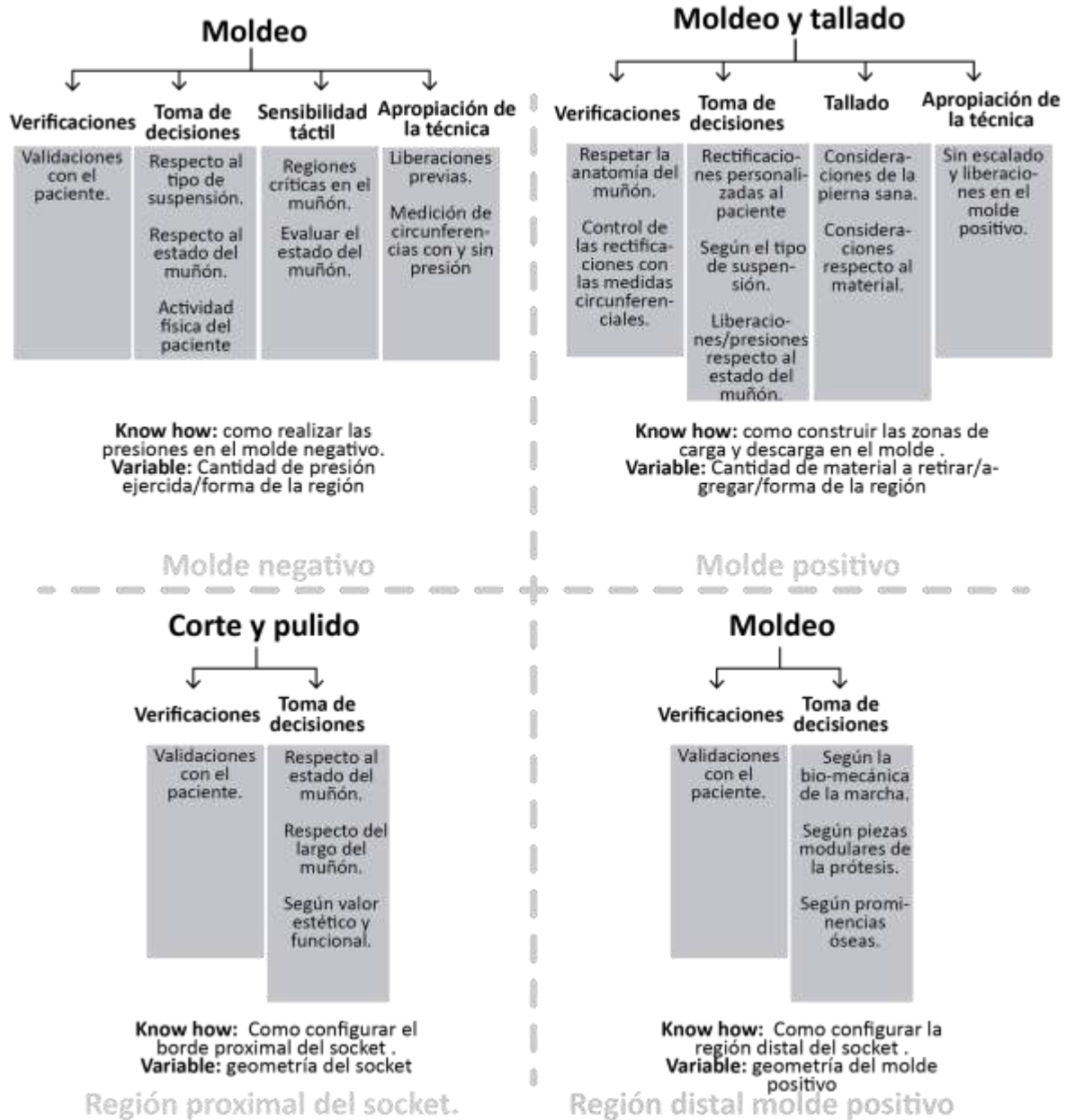


Figura 16 Temas y categorías según atributos tácticos.

## 10.5 Análisis jerárquico de tareas

Se describieron las subtareas del proceso de fabricación de sockets, dividiéndolo en cinco partes: 1) Consideraciones previas, 2) Molde negativo, 3) Molde positivo, 4) Región distal y 5) Región proximal. Para

esta actividad, se realizó un análisis individual de cada participante entrevistado, y a partir de los datos proporcionados por ellos, se construyó el proceso de fabricación general. Además, se identificaron los atributos tácitos presentes en la ejecución de cada subtarea, incluyendo tipos de **“habilidades manuales”**, **“toma de decisiones”** y **“verificaciones”**. También se reconocieron los atributos tácitos de **“percepción espacial”** y **“creatividad”**. Según la revisión de la literatura, el atributo tácito de **“percepción espacial”** se relaciona con la escala y la forma tridimensional de los objetos en el espacio. Por su parte, el atributo de **“creatividad”** es crucial para el modelado de geometrías complejas, donde es necesario que el técnico aporte soluciones formales basadas en su experiencia.

### 10.5.1 Consideraciones previas y Molde negativo

Las subtareas de las consideraciones previas incluyen actividades como la elección del tipo de socket transtibial, la selección de partes estandarizadas y la evaluación de si el paciente está en condiciones de ser protetizado. Por otro lado, las subtareas del molde negativo comprenden los pasos previos al vendaje de yeso del muñón, incluyendo la ubicación del paciente, las marcaciones, las mediciones y las presiones aplicadas en el molde. La Tabla 21 describe estas subtareas en detalle.

Tarea principal	Tarea y subtareas	Habilidades	Toma de decisiones	Esfuerzo cognitivo competencias	Verificaciones	Percepción espacial
<b>1. Consideraciones previas</b>	1.1 Tomar especificaciones médicas	Interpretación correcta para realizar la protetización	definir la técnica y tareas a realizar	<b>Cognitivo:</b> Depende de las particularidades del caso médico que motiven a adaptar el proceso	Correspondencia de la técnica definida con respecto a la especificación médica	No aplica
	1.2 Evaluar si es apto para ser protetizado	sensibilidad táctil.	Depende Valoración según inspección y habilidad del técnico.	<b>Procedural:</b> asociación correcta del conocimiento corroborado con la sensibilidad táctil	Inspección visual /palpar	Muñón/cuerpo del paciente
	1.3 primera prótesis / paciente con prótesis/ tiempo con la prótesis	sensibilidad táctil.	Tipo de socket de prueba o definitivo/componentes de la prótesis.	<b>Cognitivo:</b> evaluación tipo de producto, valoración de tiempo de uso.	Inspección visual /palpar	
	1.4 Identificar el tipo de muñón	sensibilidad táctil.	Depende Valoración según inspección y habilidad del técnico.	<b>Cognitivo y procedural:</b> relación de información recogida a partir de la sensibilidad táctil para definir correctamente el tipo de muñón	Inspección visual/palpar	
	1.5 naturaleza de la amputación: trauma o enfermedad (diabetes)	No requiere	Del tipo de socket y componentes.	No requiere	Inspección visual.	Muñón.

	1.6 Evaluar el estado físico del paciente	sensibilidad táctil para determinar estado.	Evaluar componentes según estado físico del paciente.	<b>Cognitivo y procedural:</b> relación de información recogida a partir de la sensibilidad táctil para definir correctamente el estado de muñón.	Inspección visual				
	1.7 evaluar entorno y expectativas del paciente	Interacción asertiva	Recoger la información suficiente que le permita seleccionar los componentes de la prótesis.	<b>Cognitivo y actitudinal:</b> Capacidad para evaluar las condiciones de entorno, hacer una correspondencia sobre la viabilidad técnica y presupuestal para tomar la decisión más adecuada	Retroalimentación con el paciente.				
<b>2. Construcción del molde negativo.</b>	2.1 Ubicar al paciente en posición sedente y pierna ligeramente flexionada.	Procedural	Determinar ajustes necesarios si el paciente no puede adoptar la posición ideal debido a limitaciones físicas	<b>Procedural:</b> Aplicación adecuada de la teoría.	Inspección visual.	Muñón/cuerpo del paciente.			
	2.2 Envolver con papel film el muñón o linner (dependiendo del tipo de prótesis)		Ajustar la cantidad de vendas y la presión utilizada en función de la forma del muñón y la comodidad del paciente.	<b>Cognitivo:</b> evaluando la cantidad de vendas necesarias y la presión a aplicar en cada capa para evitar compresión excesiva	Inspección visual/ táctil				
	2.3 Marcar con un lápiz graso zonas de carga y descarga		Determinar, qué zonas deben soportar más o menos carga para maximizar comodidad y funcionalidad.	<b>Cognitivo:</b> identificar visualmente las zonas óptimas en el muñón, considerando puntos anatómicos clave y presión tolerable.	Inspección visual/ táctil				
	2.4 Marcar la mitad de rodilla y el apoyo patelar		Determinar la ubicación exacta de las marcas en función de la estructura anatómica del paciente.	<b>Cognitivo:</b> identificar visualmente los puntos anatómicos clave.					
	2.5 Marcar circunferencias de contornos transversales a lo largo del cuerpo del muñón cada 5 o 3 cm								
	2.7 Marcar la mitad de rodilla y el apoyo patelar								
	2.8 Marcar la tibia								
	2.9 tomar distancia medial-lateral ML								
	2.10 Tomar distancia anterior -posterior AP								
	2.11 Envolver el muñón en vendas de yeso						sensibilidad táctil/ Moldeo.	Ajustar la cantidad de vendas y la presión utilizada en función de la forma del muñón y la comodidad del paciente.	<b>Cognitivo:</b> evaluando la cantidad de vendas necesarias y la presión a aplicar en cada capa para evitar compresión excesiva.
	2.6 Realizar la presión en la fosa poplítea						sensibilidad táctil/ Moldeo.	Ajustar la presión aplicada en función de la respuesta del paciente y la cantidad de marca deseada.	<b>Cognitivo:</b> evaluar la ubicación exacta de la fosa poplítea y calcular la cantidad de presión necesaria para dejar una marca precisa.

Tabla 21 Análisis jerárquico de tareas etapas de consideraciones previas y molde negativo.

### 10.5.2 Molde positivo, Región distal y proximal

En el caso del molde positivo, las subtareas describen actividades como el vaciado del molde negativo, la colocación del molde en el atril, el remarcar regiones críticas y realizar rectificaciones. En cuanto a la

región distal, el proceso implica el moldeo de esta área añadiendo yeso. Para la región proximal, se realiza el laminado del molde positivo, el pulido y corte del socket en la parte superior, y las pruebas de marcha con la prótesis armada. En estas actividades, se destacó la importancia de los atributos de percepción espacial para configurar la forma del molde y el socket. Asimismo, se encontró que, en las actividades de cortar el socket en la parte superior para dar forma a la región proximal, así como en la rectificación distal, es fundamental el atributo de creatividad. El técnico debe construir una forma estética, anatómica y que se adapte a las demás piezas estandarizadas de la prótesis, requiriendo así un aporte de estilo y conocimiento formal basado en su experiencia en la fabricación del dispositivo. La tabla 22 detalla las subtareas.

Tarea principal	subtareas	Habilidades manuales	Toma de decisiones	Esfuerzo cognitivo competencias	Verificaciones	Percepción espacial	Creatividad
<b>3. Construcción del molde positivo</b>	3.1 vaciado del molde negativo con yeso.	Moldeo.	Respecto al material. Evaluar si es necesario realizar ajustes en el vaciado	<b>Cognitivo:</b> considerar la consistencia del yeso, la cantidad necesaria y la forma del negativo para asegurar que el molde sea preciso.	Inspección visual/ consistencia del fraguado.	Forma del molde negativo.	N/A
	3.2 Montar el molde en puesto de trabajo posición horizontal	Moldeo.	Ajustar respecto a Planos medial, lateral, anterior, posterior.	<b>Procedural:</b> Aplicación adecuada de la teoría.	Inspección visual / ángulo del molde.	Forma del molde/ Regiones anatómicas.	
	3.3 Escalar el cuerpo del molde (pulir retirar material)	Sensibilidad táctil /Tallado.	tipo de muñón; Respecto a dimensiones de la pierna sana.	<b>Cognitivo y procedural:</b> evaluar las áreas del molde que requieren ser escaladas.	Medidas de circunferencias	Forma del molde/ Forma del muñón/ Regiones anatómicas.	
	3.4 Liberar regiones agregando yeso al molde positivo		Determinar la cantidad y la forma exacta de yeso a agregar en función de: Tipo de suspensión; estado del muñón.	<b>Cognitivo y procedural:</b> evaluar las zonas de contacto crítico y considerando cómo la adición de yeso afectará la forma final.	Medidas de circunferencias; Retroalimentación con el paciente.		
	3.4 Realizar las presiones en las regiones de carga retirando yeso al molde		Decidir la cantidad de material a retirar según: tipo de suspensión; estado del muñón.	<b>Cognitivo y procedural:</b> Evaluar las zonas de carga en el molde y determinar cuánta presión es necesaria en cada región.	Medidas de circunferencias; Retroalimentación con el paciente.		
<b>3.1 Región proximal del socket</b>	3.1.1 Termo formar el molde	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	3.1.2 Cortar socket en la parte superior	Sensibilidad táctil/Corte/pulido.	Estado y longitud del muñón; Valor estético y funcional.	<b>Cognitivo y procedural:</b> Determinar la geometría exacta del corte proximal en el socket plastificado.	Inspección visual / Retroalimentación con el paciente.	Forma del socket	Construcción estética y anatómica del socket en la parte proximal.
	3.1.3 Probar el socket en el paciente	Sensibilidad táctil.	Ajustar el socket según la respuesta del paciente. Prueba estática.	<b>Cognitivo y procedural:</b> Evaluar el ajuste del socket en el paciente, considerando la comodidad, estabilidad y alineación con las zonas de carga y descarga.	Inspección visual /táctil. Retroalimentación con el paciente.	Forma del socket/muñón	

<b>3.2 región distal del socket</b>	3.2.1 agregar 2 a 3cm de yeso en la región distal del molde	Sensibilidad táctil/moldeo.	Bio mecánica de la marcha; piezas estandarizadas; prominencias óseas.	<b>Cognitivo y procedural:</b> Evaluar la necesidad de agregar material en la región distal del molde.	Inspección visual.	Forma del molde /muñón.	Construcción estética y anatómica del socket en la parte distal.
-------------------------------------	---	-----------------------------	---	--	--------------------	-------------------------	--

Tabla 22 Análisis jerárquico de tareas etapas de molde positivo y regiones distal - proximal.

## 10.6 Observaciones de campo

Se realizaron visitas a 3 laboratorios de órtesis y prótesis con el objetivo de profundizar en la adquisición del conocimiento tácito relevante en el proceso de fabricación de sockets. Esta etapa del estudio se fundamentó en la metodología empleada por Johnson et al 2019, quienes adoptaron un enfoque etnográfico a través de observaciones y entrevistas. En esta investigación, se aplicó un enfoque similar, dividiendo las observaciones en dos partes específicas relacionadas con casos de prótesis transtibiales: 1) Captura de datos sobre la geometría del muñón; 2) Elaboración del molde positivo. A continuación, se detallarán las observaciones obtenidas en los laboratorios, durante la observación se realizaron preguntas abiertas referentes a las tareas ejecutadas por el técnico.

### 10.6.1 Observación Laboratorio A.

Para esta observación se tomó un caso de estudio transtibial **P1**, muñón derecho con socket PTB, (por sus siglas en inglés, ( Patellar Tendon Bearing), es un tipo de socket que se caracteriza porque el apoyo se encuentra en el tendón patellar. Y utiliza suspensión con liner, que es una funda de silicona, funciona como interfaz entre el muñón y el socket. Y se une con un pin al resto de la prótesis. Esta es la primera prótesis de la paciente.

**Captura de datos sobre la geometría del muñón.** La paciente se ubicó en posición sedente con el muñón levemente flexionado. El técnico ortoprotesista colaboró en la colocación del liner en el muñón y procedió a envolverlo con papel film. Posteriormente, el técnico llevó a cabo las marcaciones con un lápiz grueso, trazando circunferencias (perímetros) medidas cada 5 milímetros a lo largo del muñón, comenzando

desde la punta distal de la extremidad. Adicionalmente, se registró la medida longitudinal ML (medial, lateral) utilizando un calibrador pie de rey, midiendo la distancia entre los cóndilos de la rodilla. Después, el técnico preparó los vendajes de yeso y procedió a envolver la extremidad para crear el molde negativo. Durante este proceso, se realizaron presiones cuidadosas en puntos específicos: una sobre la parte inferior de la rótula marcando el tendón patelar y en la fosa poplítea. Estas presiones sutiles ocasionaron una leve deformación en las vendas de yeso. Finalmente, una vez completado el envolvimiento del muñón, el técnico retiró el molde.

Tras completar la construcción del molde negativo, el técnico proporciona explicaciones sobre el enfoque particular para este paciente. Dado que se utiliza una suspensión con liner y considerando las características del muñón, se determina que no es necesario realizar un escaldo del muñón en el molde positivo. Adicionalmente, el técnico señala que no hay protuberancias óseas excesivamente prominentes en el muñón, lo que evita la necesidad de marcarlas. Se presta atención especial a una región en la pared lateral donde un tendón se ubica en la parte proximal; el técnico subraya la importancia de no aplicar una presión excesiva en esta área. Asimismo, se menciona que con el uso del liner, las presiones ejercidas en el socket no deben ser muy fuertes.

Una vez concluida la fase de obtención del molde negativo, se procedió a realizar una captura adicional utilizando un escáner 3D, con el propósito de obtener un modelo digital de la geometría del muñón. Se empleó un escáner con las siguientes especificaciones técnicas: el escáner 3D GO SCAN 50, portátil y basado en luz blanca, con una resolución de 0.500 mm. Sus dimensiones son 150 x 171 x 251 mm, con un peso de 950 g. En esta captura, se adoptó un procedimiento similar al de la toma convencional, en la cual el liner se mantuvo sobre el muñón. Además, se ubicaron marcadores en áreas de relevancia previamente identificadas por el técnico ortoprotésista. La posición de la paciente fue consistente con la toma convencional, y el equipo realizó un escaneo de 360 grados en torno al muñón, logrando una

representación tridimensional completa y precisa de su forma. La figura 17 ilustra la toma de datos sobre el muñón.

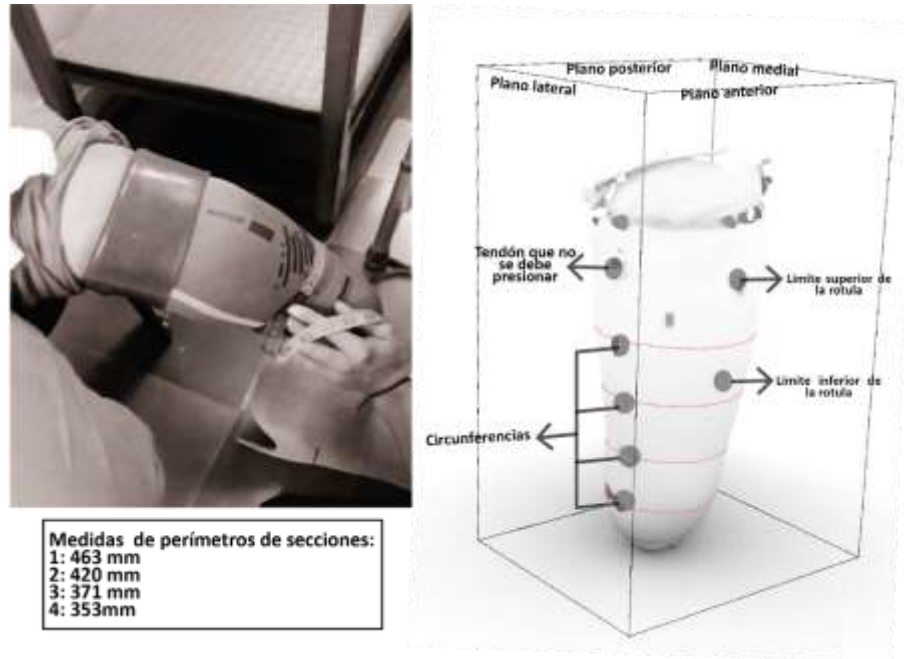
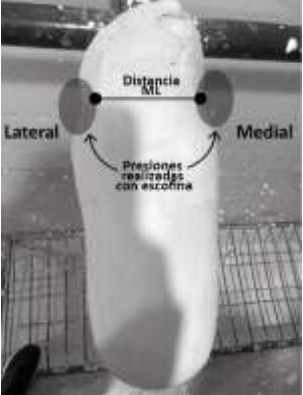
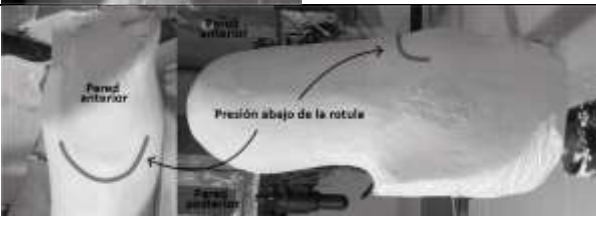
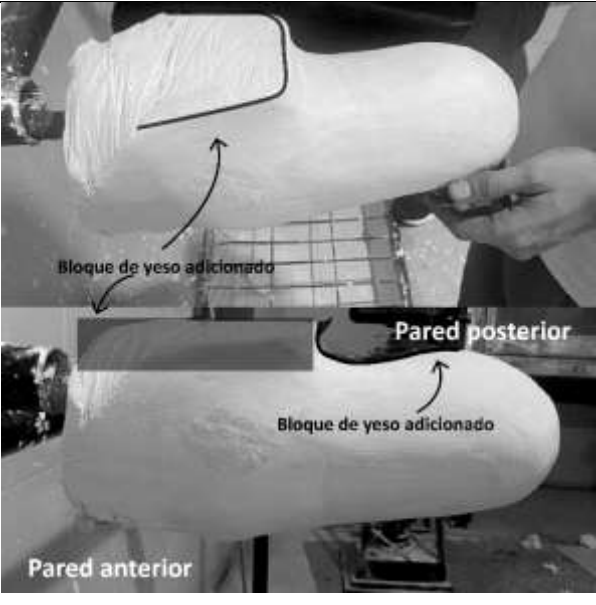


Figura 17 Reconstrucción muñón digital. Izquierda mediciones análogas realizadas por el técnico. Derecha modelo digital con marcaciones.

**Elaboración del molde positivo:** El técnico preparo el yeso y vació el molde negativo, en esta tarea él deja un tubo metálico en el centro del molde a modo de eje, el cual le permite su manipulación al ser colocado en un atril de forma horizontal. A continuación, se describen las tareas realizadas en la tabla 23.

Tarea	Habilidades	Variable	Figura
El técnico colocó el molde en el atril para iniciar las rectificaciones.			

<p><b>Rectificaciones en la región proximal</b> A partir de la medida tomada en ML (medial lateral) de aproximadamente 15 cm, el técnico rectificó retirando material del molde sin exceder esa medida y procurando no presionar el tendón del costado lateral.</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a retirar  Geometría de la rectificación</p>	
<p><b>Rectificaciones pared anterior</b> En la pared anterior en la parte de la rótula el técnico presionó la región inferior siguiendo su contorno en forma de U con la escofina</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a retirar  Geometría de la rectificación</p>	
<p><b>Rectificaciones pared posterior</b> El técnico adicionó un bloque rectangular de yeso sobre la pared posterior a la altura de la fosa poplítea para construir el apoyo en esa región del molde, además modificó la forma de la cara de esa pared en la parte media suavizando la unión entre el bloque y el molde.</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a retirar/agregar  Geometría de la rectificación</p>	

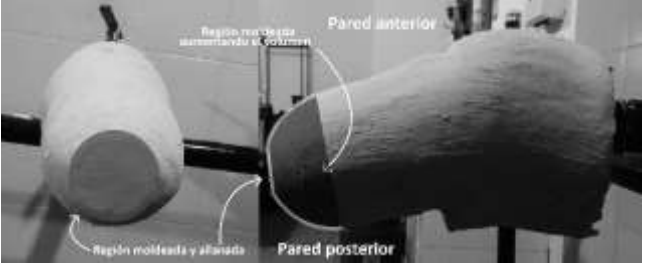
<p><b>Rectificaciones en la región distal</b></p> <p>El técnico rectificó la región distal aumentando el volumen aproximadamente un 1 cm de forma pareja y en una altura aproximada de 4cm.</p> <p>Y el técnico allanó la base para construir la región de acople entre el socket y las partes estandarizadas.</p> <p>El técnico manifestó realizar esta rectificación para proporcionar un colchón sobre esta región que ayuda a amortiguar la zona durante la marcha.</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a retirar/agregar</p> <p>Geometría de la rectificación</p>	
---	-----------------------	--	--

Tabla 23 tareas críticas elaboración del molde positivo. observación de campo A.

### 10.6.2 Observación Laboratorio B

Para esta observación de campo se tomaron dos casos de estudio **P2 y P3**, trabajados por un mismo técnico, el caso de estudio **P2** es un paciente con amputación transtibial derecha, utiliza un socket tipo ( ), con una interfaz blanda, no es su primera prótesis. El caso de estudio **P3**, es un paciente con amputación transtibial derecha, utiliza un socket socket PTB y liner de silicona, no es su primera prótesis. A continuación, se describe el seguimiento a la toma de medidas y obtención de los moldes.

**Captura de datos sobre la geometría del muñón:** Los pacientes se sentaron con la rodilla del muñón ligeramente flexionada. Luego, el técnico procedió a realizar una inspección del muñón para identificar los puntos anatómicos críticos. En el primer caso, envolvió el muñón en papel film y utilizó un lápiz grueso para marcar todas las regiones previamente identificadas. En el segundo caso, el procedimiento fue similar, pero se registraron las regiones utilizando un liner de silicona. Posteriormente, el técnico aplicó vendajes de yeso alrededor de los muñones de los participantes, y realizó una presión en la región patelar

y en la zona de la fosa poplítea con lo cual se modificó en esas regiones la forma del molde. La figura 18 ilustra el proceso.



Figura 18 obtención de datos de la geometría del paciente. Izquierda caso de estudio 1. Derecha caso de estudio 2.

A continuación, en la figura 19 se muestran las regiones críticas identificadas por el técnico en cada caso.

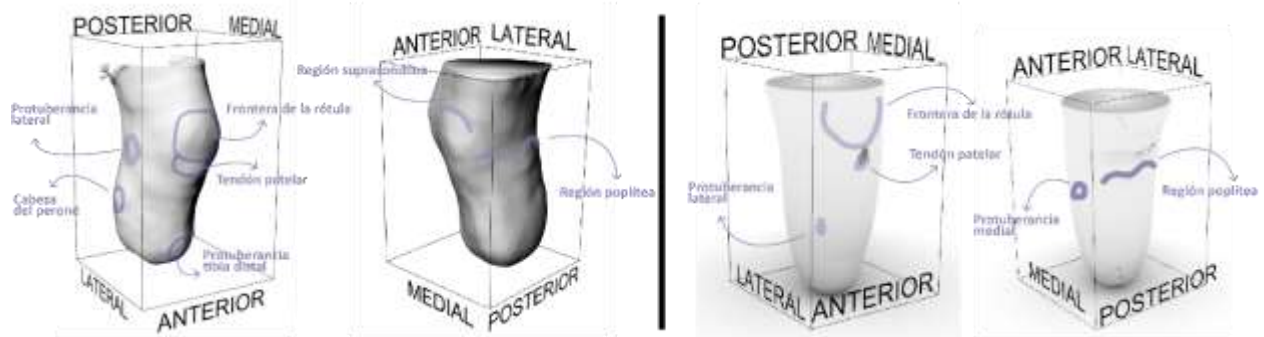


Figura 19 Regiones anatómicas marcadas por el técnico. Izquierda caso P2, derecha caso P3.

De forma similar que en la observación A, una vez el técnico terminó de realizar la toma de medidas, se hizo una toma de datos con un escáner 3D para obtener la geometría del muñón en un formato digital se utilizó el mismo escáner. Se hizo un barrido en 360 grados y se posicionaron marcadores sobre las regiones anatómicas identificadas previamente por el técnico. La figura 20 ilustra el proceso.

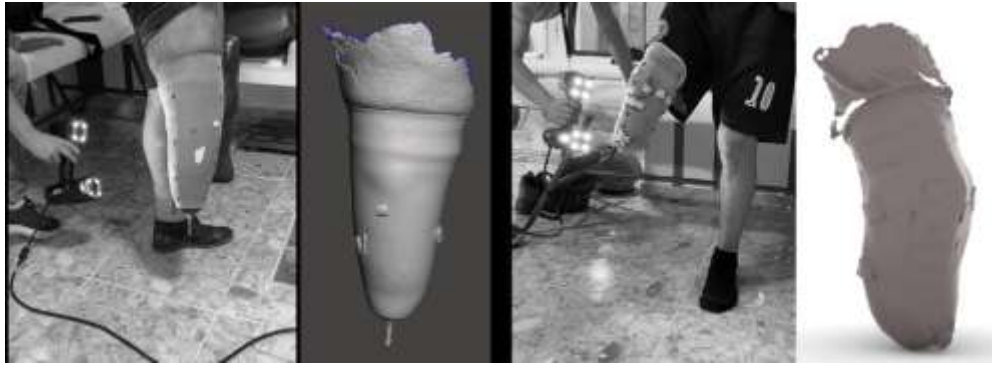
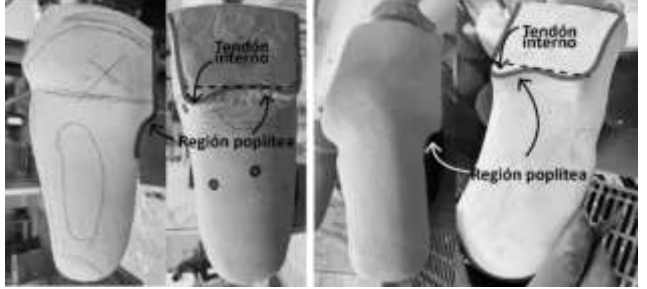
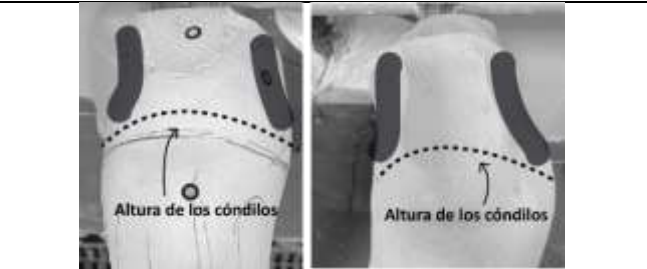
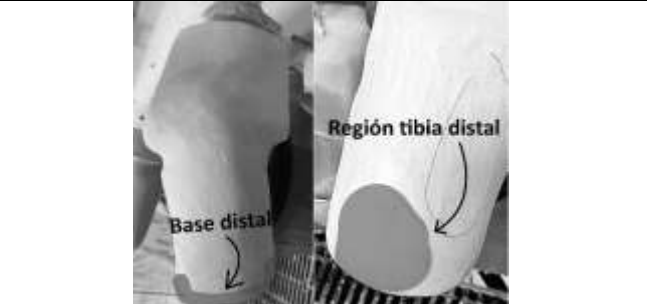

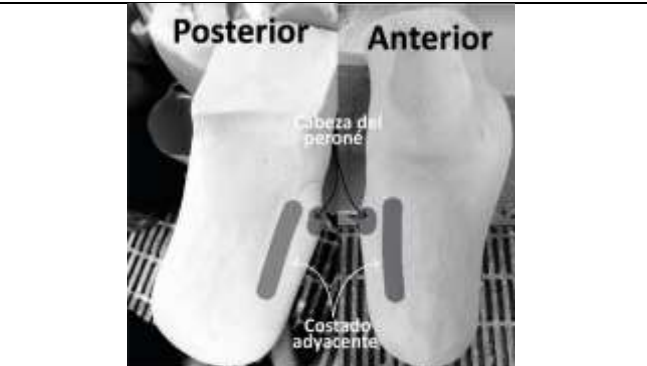


Figura 20 obtención de geometría digital del muñón. Izquierda caso P3 y derecha caso P2.

**Elaboración del molde positivo:** El proceso de elaboración del molde positivo consistió en que el técnico vertió yeso líquido sobre los moldes negativos para crear los moldes positivos. Para asegurar la alineación, se colocó un tubo metálico en el centro del molde, que funcionó como un eje y se montó en un atril para facilitar el proceso de moldeo. La tabla 24 detalla las rectificaciones realizadas en esta etapa.

Tarea	Habilidades	Variable	Figura
El técnico colocó el molde en el atril para iniciar las rectificaciones.			
<p><b>Apoyo patelar y zona poplítea.</b> El técnico marcó el apoyo del tendón patelar a la misma altura que la región de la fosa poplítea, con la escofina el técnico retiró material en la zona del tendón patelar. La zona rectificada es una depresión en forma de "U"</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a retirar</p> <p>Geometría de la rectificación</p>	<p>Arriba caso P3. Abajo caso P2</p>

<p><b>Apoyo en la zona de la fosa poplítea.</b> El técnico adicionó un bloque de yeso rectangular a la altura de la fosa poplítea en la pared posterior.</p> <p>Después suavizó y formó el apoyo en esa región, teniendo en cuenta que el tendón interno es más bajo que el externo.</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a agregar</p> <p>Geometría de la región</p>	 <p>Izquierda caso P3. Derecha caso P2</p>
<p><b>Apoyo supra condilar.</b> En la parte superior de los cóndilos el técnico retiró material para formar la presión en esa región distal.</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a retirar</p> <p>Geometría de la región</p>	 <p>Izquierda caso P3. Derecha caso P2</p>
<p><b>Región distal caso P2.</b> Para este caso el técnico liberó agregando yeso en la región de la tibia distal y de forma pareja adicionó yeso alrededor de toda la base distal para aplanar su superficie, y el técnico agregó una capa de yeso de aproximadamente 1 cm.</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a agregar</p>	
<p><b>Región distal caso P3.</b> El técnico liberó la punta distal del peroné agregando un poco de yeso y dando forma plana a la base distal.</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a agregar</p>	
<p><b>Rectificación sobre la cabeza del peroné caso P2.</b> Para este tipo de protuberancia ósea el técnico no libera agregando yeso. Por el contrario, sobre los costados adyacentes a la protuberancia el técnico retiró material para encapsular la zona y permitir un apoyo durante la marcha.</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a retirar</p> <p>Geometría de la región</p>	

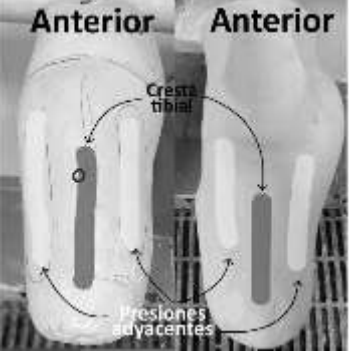
<p><b>Presiones a los costados de la cresta tibial.</b> En la pared anterior del molde positivo a los costados de la cresta tibial el técnico realizó una ligera presión retirando material y dando una forma triangular al molde.</p>	<p>Moldeo Tallado</p>	<p>Cantidad de material a retirar</p> <p>Geometría de la región</p>	 <p>Izquierda caso P3. Derecha caso P2</p>
--	---------------------------	---	--

Tabla 24 tareas críticas elaboración del molde positivo. observación de campo B.

**Interface blanda.** Dadas las características del estilo de vida y la edad del caso de estudio P2, se requirió que la interfaz entre el muñón y el socket sea de espuma blanda, en lugar de un forro de silicona. Por lo tanto, fue necesario fabricar manualmente la interfaz. Para su ejecución, se utilizó el molde positivo sobre el cual se laminó una espuma EVA de 5 mm de espesor, aplicando vacío y temperatura para ajustarla a las medidas del paciente. La figura 21 muestra la interfaz laminada sobre el molde positivo.

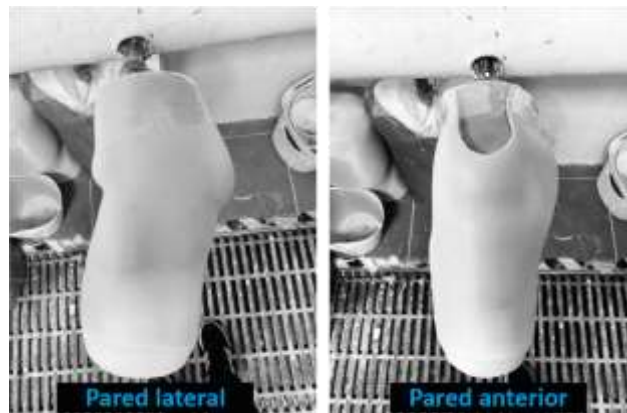


Figura 21 interfaz blanda.

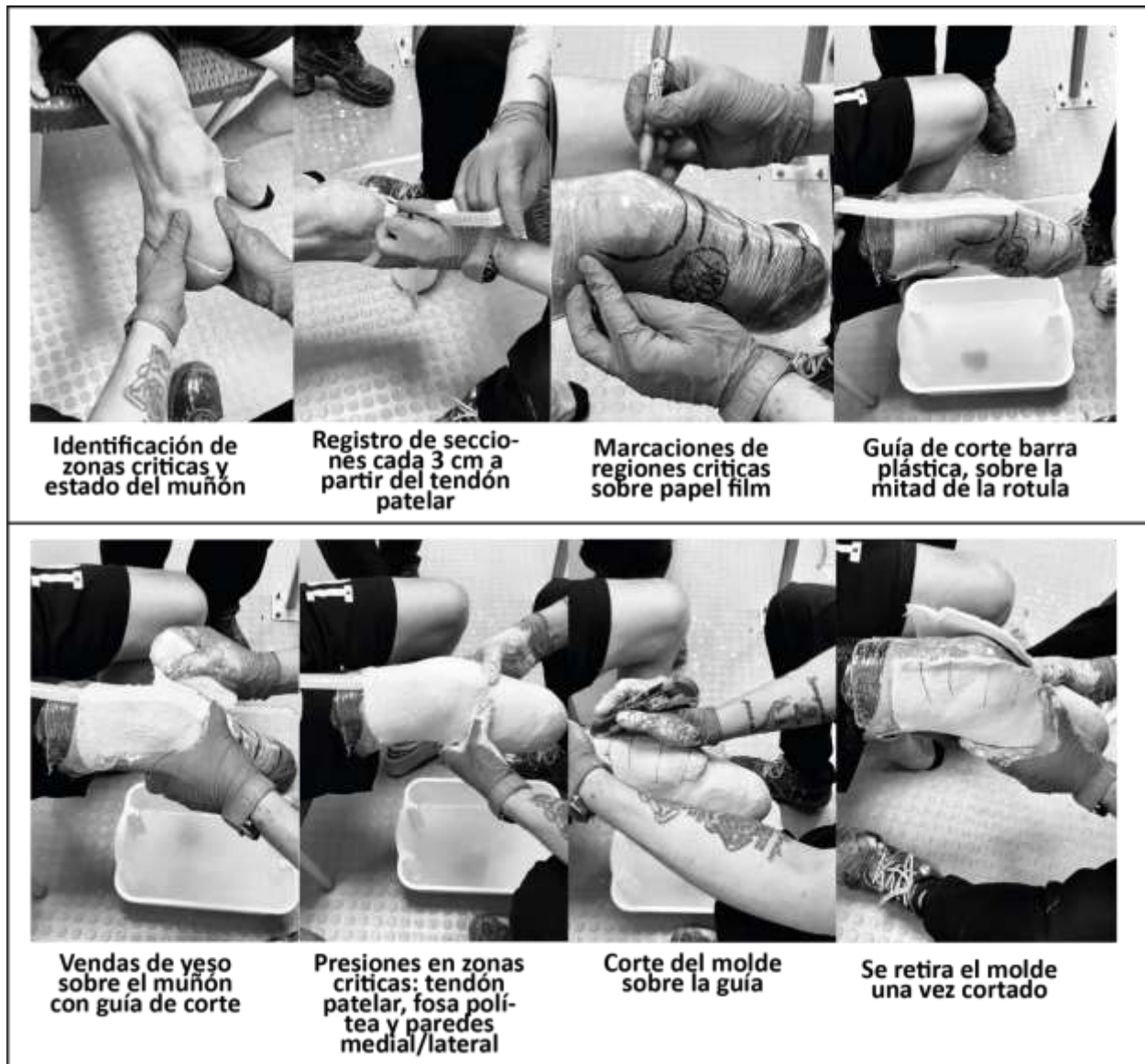
### **10.6.3 Observación laboratorio C**

Esta observación de campo se realizó con el caso de estudio **P2**, el cual presenta una amputación transtibial derecha con una interfaz blanda y no es la primera prótesis que utiliza.

#### **Captura de datos sobre la geometría del muñón:**

El participante se sienta y flexiona suavemente la pierna amputada. En este momento, el técnico inicia un diálogo con el participante para establecer confianza, planteándole preguntas sobre su estilo de vida y la causa de la amputación. Simultáneamente, el técnico explora el muñón, palpándolo con el objetivo de identificar zonas críticas, como protuberancias óseas, y evaluar el estado del miembro. Luego, partiendo del tendón patelar, el técnico utiliza un marcador en la parte anterior del muñón para realizar marcas cada 3 centímetros, indicando así las mediciones de los perímetros circunferenciales que registra con una cinta métrica. A continuación, el muñón se envolvió con papel film, y se realizaron marcaciones adicionales en las zonas críticas óseas, resaltando nuevamente las alturas de las circunferencias. Acto seguido, se procedió a colocar una guía de corte, una barra plástica, en la mitad de la rótula.

El técnico envolvió el muñón con vendas de yeso, ejerció presión en la parte anterior sobre el tendón patelar en forma de U, y en la parte posterior en la fosa poplítea, además de ejercer presión en las paredes medial y lateral para dar forma triangular al molde. Una vez completadas las presiones sobre la rótula, el técnico utilizó un lápiz para trazar guías sobre el molde. Posteriormente, con un bisturí, realizó el corte necesario en el molde de yeso para poder retirarlo. Las marcaciones previas cumplen la función de facilitar la unión precisa del molde en la zona donde fue cortado, asegurando así una representación precisa de la geometría del muñón. La figura 22 ilustra con fotografías las tareas realizadas.



*Figura 22 Pasos de la captura de la geometría del muñón (molde negativo), Observación de campo C.*

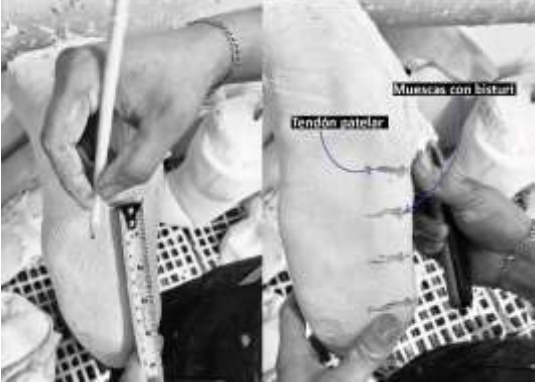
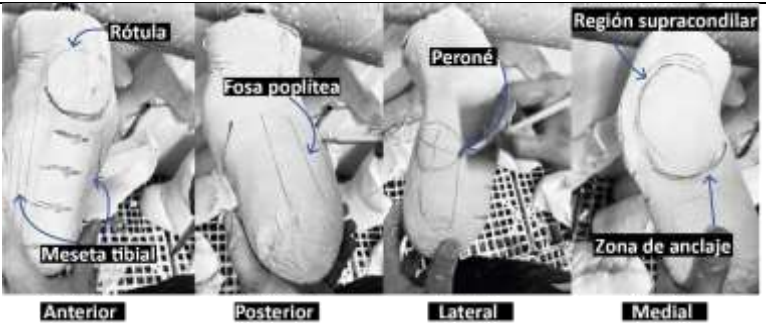
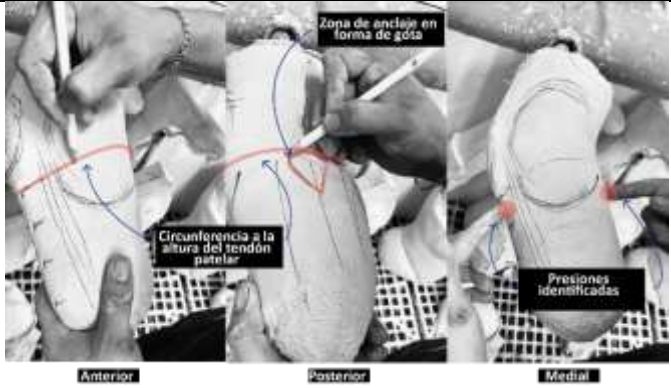
Por otro lado, la figura 23 muestra las regiones críticas que el técnico considero necesarias para la construcción del socket, y de forma paralela la reconstrucción digital con las mismas regiones realizadas sobre el modelo virtual.



Figura 23 Regiones críticas marcadas por el técnico. Izquierda marcaciones; Derecha regiones marcadas en el modelo digital.

**Elaboración del molde positivo.** A continuación, se describe las diferentes operaciones que el técnico realizó para construir el molde positivo, divididas en 3 tablas: tabla 25 marcaciones, tabla 26 rectificaciones de presión y tabla 27 rectificaciones de liberación. En las tareas donde fue posible se asignó el atributo tácito “**habilidades manuales**” y la variable asociada a la tarea.

Tarea	Habilidades	Variable	Figura
<b>Retirar el molde negativo del positivo.</b> Una vez posicionado el molde positivo sobre el atril de trabajo, con un bisturí el técnico cortó el molde negativo y lo retiró.	Moldeo	Geometría del muñón	
<b>Rectificar el molde en la región de la guía de corte.</b> Con una escofina el técnico emparejó el molde en la parte anterior desde la rótula hacia la zona proximal que es donde se posiciona la guía.	Moldeo-retirar material	Geometría del muñón	

<p><b>Identificar el tendón patelar y las alturas de los cortes cada 3 cm.</b> El técnico con un lápiz en la cara anterior marcó el tendón patelar. Y cada 3 cm marcó las alturas de las secciones. Además, realizó muescas para no perder las marcaciones en el moldeo posterior.</p>	<p>Palpar</p>	<p>Geometría del muñón</p> <p>Marcacion es previas</p>	
<p><b>Identificar regiones críticas.</b> El técnico con un lápiz volvió a marcar las zonas previamente identificadas durante la construcción del molde negativo.</p>	<p>Palpar</p>	<p>Geometría del muñón</p> <p>Marcacion es es previas</p>	
<p><b>Altura de la fosa poplítea a nivel del tendón patelar.</b> El técnico dibujó una circunferencia (perímetro a la altura del tendón patelar). Y en la parte posterior en la fosa poplítea marcó un anclaje en forma de gota.</p>	<p>Palpar</p>	<p>Geometría del muñón</p> <p>Marcacion es previas</p>	

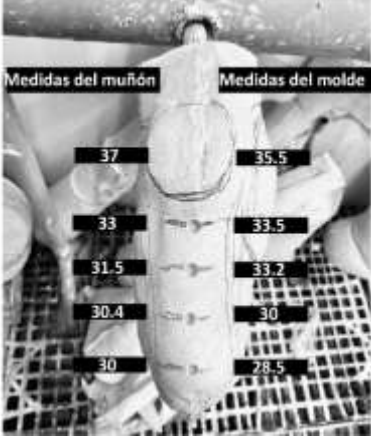

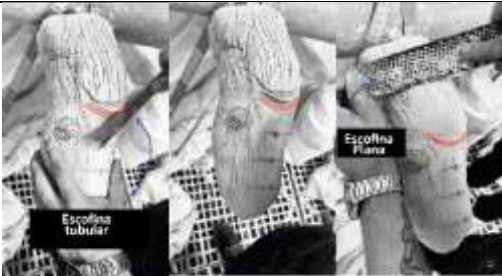

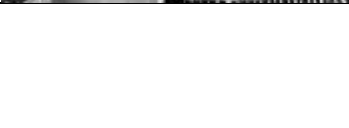
<p><b>Comparar las medidas de las secciones en el molde con la toma en el muñón.</b> El técnico con una cinta métrica midió las secciones. Y explicó que las variaciones se deben a las presiones que realizó sobre las vendas en la toma del molde negativo.</p>	<p>Palpar</p>	<p>Geometría del muñón</p> <p>Marcacion es previas</p>	
---	---------------	--	--

Tabla 25 Observación de campo C. marcaciones en el molde positivo.

### Rectificaciones de presión

Tarea	Habilidades	Variable	Figura
<p><b>Sombrear con el lápiz todo el cuerpo del molde.</b> El técnico sombreó todo el cuerpo del molde con un lápiz para tener una referencia de que regiones han sido rectificadas o suavizadas</p>	<p>Palpar</p>	<p>Geometría del muñón</p> <p>Marcaciones previas</p>	
<p><b>Rectificación del tendón patelar.</b> En la región patelar con una escofina tubular el técnico retiró material formando una U debajo de la rótula, y emparejó o suavizó la zona de la rótula con una escofina plana.</p>	<p>Palpar</p> <p>Moldeo/ tallado</p>	<p>Geometría del muñón</p>	
<p><b>Rectificación de las mesetas tibiales, fosa poplítea.</b> El técnico utilizó la escofina plana para retirar material en las zonas mencionadas, cuidando de no tocar las regiones con protuberancias óseas.</p>	<p>Palpar</p> <p>Moldeo/ tallado</p>	<p>Geometría del muñón</p>	
<p><b>Suavizar la región distal.</b> El técnico con la escofina plana moldeó la región distal, suavizando y homogenizando con las demás áreas</p>	<p>Palpar</p> <p>Moldeo/ tallado</p>	<p>Geometría del muñón</p>	


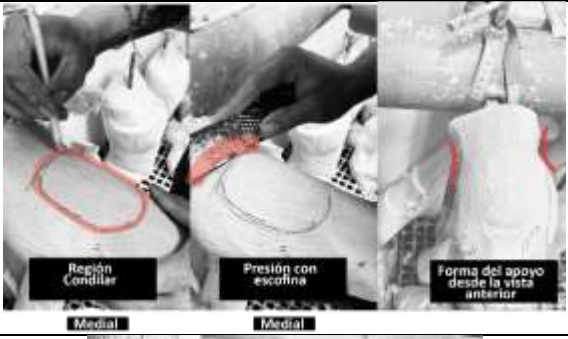


<p>rectificadas, el técnico buscó regularizar el molde.</p>																		
<p><b>Rectificación de apoyos supra condilares.</b> El técnico en la cara medial volvió a marcar la zona del cóndilo, y con la escofina plana retiró material, de igual forma en el cóndilo lateral. El técnico tiene en cuenta que la presión en la región medial es mayor por eso volvió a marcar la zona con lápiz.</p>	<p>Palpar Moldeo/ tallado</p>	<p>Geometría del muñón</p>	 <p>Región Condilar Medial</p> <p>Presión con escofina Medial</p> <p>Forma del apoyo desde la vista anterior</p>															
<p><b>Suavizar la superficie del molde.</b> El técnico pasó una malla metálica sobre el cuerpo del molde para retirar irregularidades y homogenizar la superficie alisándola.</p>	<p>Palpar Moldeo/ tallado</p>	<p>Geometría del muñón</p>																
<p><b>Rectificación de las secciones.</b> Con una cinta métrica el técnico volvió a medir las secciones y las comparó con las medidas previas del molde y el muñón.</p> <p>Ente 1.5 y 2cm de diferencia.</p>	<p>Palpar</p>	<p>Geometría del muñón Marcaciones previas</p>	 <p>Medidas del molde Rectificado</p> <p>Medidas del muñón</p> <p>Medidas del molde</p> <table border="1"> <tr> <td>17</td> <td>35.5</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>33</td> <td>33.5</td> <td>31.5</td> </tr> <tr> <td>31.5</td> <td>33.2</td> <td>30.7</td> </tr> <tr> <td>30.4</td> <td>30</td> <td>28.8</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>28.5</td> <td>27.7</td> </tr> </table>	17	35.5	14	33	33.5	31.5	31.5	33.2	30.7	30.4	30	28.8	30	28.5	27.7
17	35.5	14																
33	33.5	31.5																
31.5	33.2	30.7																
30.4	30	28.8																
30	28.5	27.7																

Tabla 26 Observación de campo C. Rectificaciones de presión en el molde positivo.

## Rectificaciones de Liberación

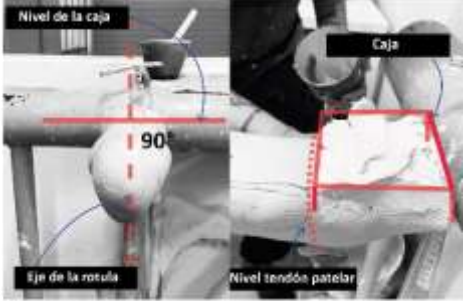



Tarea	Habilidades	Variable	Figura
<p><b>Caja cara posterior.</b> El técnico agregó yeso en la pared posterior desde la parte superior del nivel del tendón patelar. Para lograr posicionar de forma correcta la caja toma como guía el eje de la rótula desde la vista inferior del molde.</p>	<p>Palpar  Moldeo/ tallado</p>	<p>Geometría del muñón</p>	
<p><b>Liberación de protuberancias óseas.</b> El técnico aplicó con una espátula yeso sobre las protuberancias que necesitan ser liberadas, para el caso específico son: cresta tibial, región del peroné y una protuberancia ósea adyacente al peroné en la parte superior de la meseta tibial lateral, y finalizó puliendo las regiones con una escofina plana.</p>	<p>Palpar  Moldeo/ tallado</p>	<p>Geometría del muñón</p>	
<p><b>Terminación de la caja posterior y fosa poplíteica.</b> El técnico pulió la caja construida con la escofina plana, además retiró material en la fosa poplíteica, haciendo una concavidad en forma de gota, y los extremos inferiores los redondeó ya que ahí descansarían los dos tendones a cada lado respectivamente.</p>	<p>Palpar  Moldeo/ tallado</p>	<p>Geometría del muñón</p>	
<p><b>Acabado del molde.</b> El técnico suavizó la superficie con una malla metálica y un paño húmedo.</p>	<p>Palpar  Moldeo/ tallado</p>	<p>Geometría del muñón</p>	

Tabla 27 Observación de campo C. Rectificaciones de liberación en el molde positivo

**Interface blanda.** Como se mencionó en el estudio de campo anterior dado el estilo de vida y la edad del caso **P2**, es necesario que la interfaz entre el muñón y el socket sea de espuma blanda en lugar de un forro de silicona. Para lograrlo, se procedió a fabricar manualmente la interfaz. Su construcción inició colocando un colchón de espuma en la parte distal del molde, seguido de una lámina tubular de espuma alrededor del cuerpo del molde para su termo formado en vacío, la lámina debió previamente calentarse en un horno. Y esta interfaz se probó sobre el muñón del paciente para validar su forma. La figura 24 ilustra la construcción de la interfaz.



*Figura 24 construcción de interfaz blanda*

### 10.7 Diagrama del conocimiento tácito de la técnica

Con la información obtenida del análisis de entrevistas y observaciones de campo, se construyó el diagrama general de la técnica tradicional de fabricación de sockets, detallando el conocimiento tácito y explícito en cada una de las tareas principales, respecto a la parte tácita los atributos identificados fueron **“habilidades manuales”**; **“toma de decisiones”**; **“verificaciones”**; **“percepción espacial”** y **“creatividad”** como se muestra en la figura 25, los atributos fueron especificados en cada tarea, y las tareas del proceso se agruparon en las siguientes categorías: molde negativo, molde positivo, región distal y región proximal del molde positivo. Para las habilidades manuales se describe la variable que afecta la geometría del socket en cada tarea. La figura 26 muestra en detalle el diagrama del molde negativo.



Figura 25 Atributos tácitos clave en la fabricación de sockets.

### Molde negativo

	Conocimiento Declarativo	Anatómico			Anatómico	Bio mecánico		
Descripción de la tarea	Ubicar al paciente en posición sedente y el muñón ligeramente flexionado	Envolver con papel film el muñón o liner (dependiendo del tipo de prótesis)	Mediciones: Circunferencias de contornos transversales	Marcaciones: Zonas de carga y descarga	Mediciones: ML (medial - lateral)	Envolver el muñón en vendas de yeso	Presiones sobre las vendas	Alineación del molde negativo
Habilidades manuales			Sensibilidad táctil Variable: Geometría del muñón.		Sensibilidad táctil/moldeo Variable: Presión sobre la piel.	Sensibilidad táctil/moldeo Variable: Presión sobre las vendas.	Sensibilidad táctil Variable: Geometría del muñón.	
Atributos tácitos					Estado/anatomía del muñón		Tipo de suspensión	
Verificaciones			Inspección visual / retroalimentación con el paciente.		Inspección visual / retroalimentación con el paciente.		Inspección visual.	
Percepción espacial			Forma del muñón			Forma del muñón		

Figura 26 Diagrama general de la técnica con detalle de conocimiento tácito parte molde negativo.

Para el diagrama del molde positivo las tareas de vaciar el molde negativo, ubicarlo en el atril y retirar las vendas solo se describen, pero no se detallan ya que estas desaparecen en su posterior digitalización como se muestra en la figura 27.

## Molde positivo

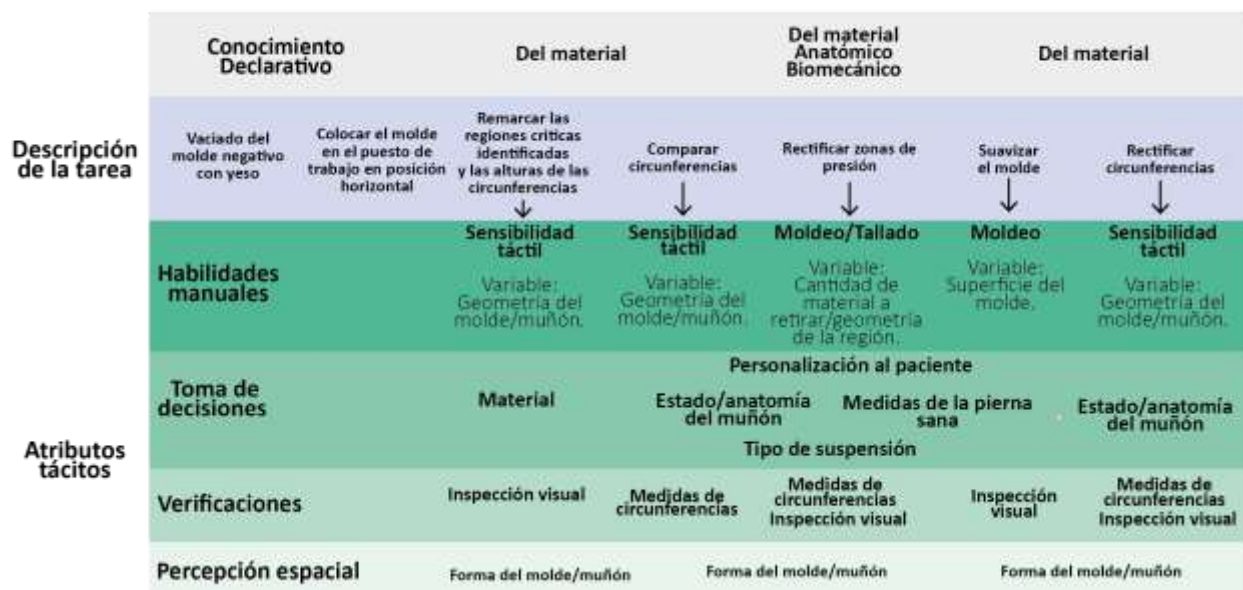


Figura 27 Diagrama general de la técnica con detalle de conocimiento tácito parte molde positivo.

A continuación, se describen las actividades de liberación del molde positivo en el cuerpo y región distal como se observa en la figura 28. Por otro lado, la figura 29 describe las actividades para el corte proximal del socket las cuales no se realizan en las etapas de moldeo sino en las etapas de termoformado y acabado. En las interacciones con los técnicos, se identificó que la validación de su forma se lleva a cabo mediante pruebas de marcha y sedente, durante las cuales se verifica si los límites del socket causan molestias o incomodidades al paciente, como se especifica en el diagrama.

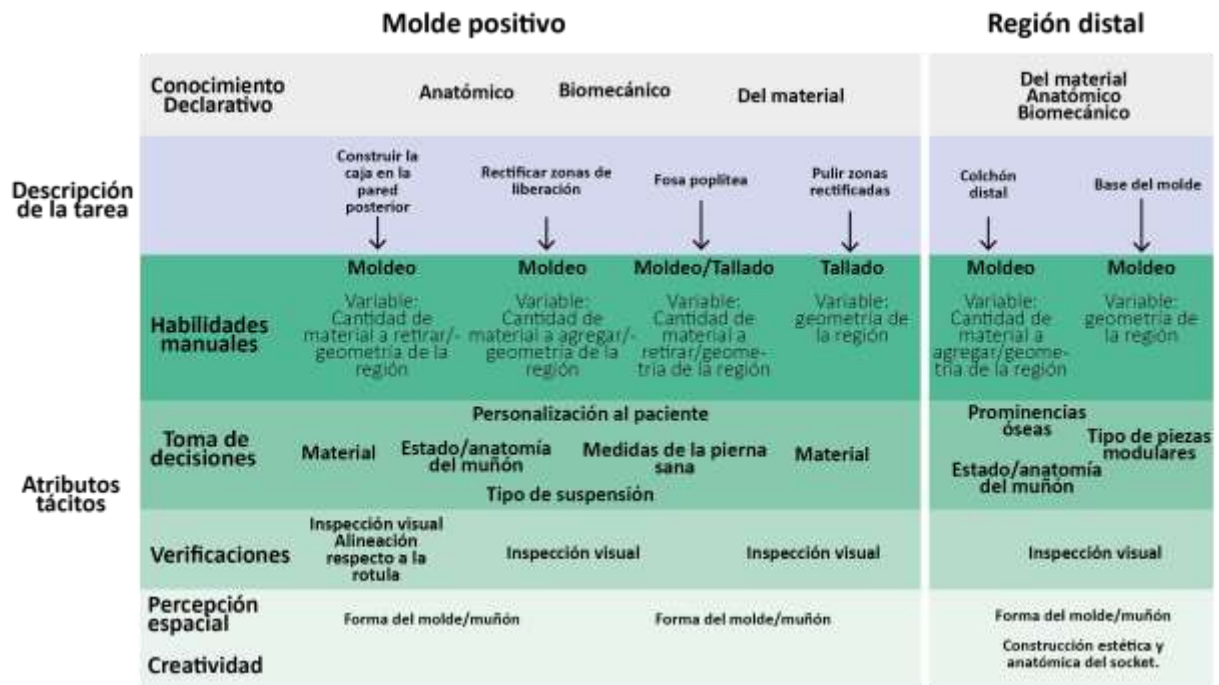


Figura 28 Diagrama general de la técnica con detalle de conocimiento tácito parte liberaciones en el molde positivo y Región distal.



Figura 29 Diagrama general de la técnica con detalle de conocimiento tácito parte región proximal.

## 11 FASE 3 DIGITALIZACIÓN DEL METODO CONVENCIONAL DE FABRICACIÓN DE SOCKETS

En esta fase, se definió el algoritmo digital para la técnica convencional de fabricación de sockets, integrando el conocimiento tácito previamente identificado de: **1 habilidades manuales de tacto, moldeo, corte y pulido; 2 Toma de decisiones. 3 verificaciones; 4 percepción espacial; 5 creatividad.** Para su integración, se utilizaron herramientas digitales identificadas en el marco de referencia de la revisión de literatura.

### 1 habilidades Manuales:

- Tacto: El técnico utiliza esta habilidad para marcar y evaluar el estado del muñón. Esta tarea es equivalente en el algoritmo propuesto, donde se colocan marcadores físicos sobre las regiones identificadas.
- Moldeo/tallado: Esta habilidad manual se emula con herramientas CAD de esculpido digital.
- Corte y pulido: En la técnica convencional, estas habilidades se utilizan en las tareas de acabado del socket después del plastificado. Estas actividades se emulan en la manufactura digital y su postproceso.

**2 toma de Decisiones** La toma de decisiones en el diseño del socket se muestra en varios factores que influyen en su geometría: componentes estandarizados, anatomía, personalización estilo de vida del paciente, el estado del muñón y el material, y son los que considera el técnico para definir las rectificaciones al molde positivo mediante el moldeo y tallado del mismo, en ese sentido las herramientas de esculpido digital permiten modificarlas considerando estos factores, sin embargo, respecto al material en el proceso digital no se tiene en cuenta el yeso ya que cambia a polímeros de PLA en el proceso de impresión 3D.

**3 verificaciones** Las verificaciones se mantienen equivalentes que en el método convencional por inspección visual, retroalimentación con el paciente, y en el caso de las actividades que simulan las

rectificaciones al molde positivo su control se realiza con mediciones tomadas al muñón en secciones transversales y distancias específicas ML (mediales-laterales) y AP (anterior-posterior) las cuales se utilizan para tener un rango de referencia de la profundidad de la presión o el aumento de la liberación, una vez hecha la modificación el técnico compara las medidas, las mediciones y comparaciones se hacen de forma similar en el modelo digital para el diseño del socket.

**4 percepción espacial** Este atributo necesario para entender el volumen y la forma tridimensional del muñón, molde y socket, es equivalente en el medio virtual con las interfaces del programa CAD y herramientas de medición que facilitan entender la escala y tamaño de objetos en el medio digital.

**5 creatividad** Este atributo se mantiene para dar forma al socket en las regiones específicas de la parte distal y proximal respectivamente, cambiando a las herramientas generales de CAD y esculpido digital.

### **11.1 Digitalización a la técnica**

La figura 30 muestra de forma general los cambios que se realizan a la técnica convencional con la intervención de las tecnologías CAD/CAM, al igual que se muestra las tareas que son equivalentes y necesarias de mantener para asegurar una geometría correcta del socket. Las actividades del molde negativo se transforman en la obtención de un modelo digital del muñón por escaneo 3D. Y el molde positivo se transforma en actividades para la alineación del modelo digital y las rectificaciones de las zonas de liberación y presión. Y la parte final de termoformado se convierte en la delimitación de la región distal y manufactura digital.

También a las tareas guiadas por las tecnologías digitales, se le ha asignado una escala de esfuerzo cognitivo, que se describe en la parte derecha de la figura 30. Siendo las de mayor esfuerzo las tareas relacionadas a rectificar el molde positivo, ya que requieren de una mayor experiencia en la técnica y deben verificarse por mediciones de secciones en algunos casos, y por inspección visual. Por esta razón

se propone el uso de guías paramétricas como una ayuda a la ejecución de la tarea, las cuales están descritas en la “sección Guías de rectificado para las modificaciones al modelo digital”.

Respecto a las tareas que tienen un grado medio en el esfuerzo cognitivo se tiene las relacionadas al escaneo 3D del muñón para obtener una geometría digital del mismo, ya que se requiere experiencia en el uso del escaneo digital para lograr una malla completa de la anatomía. Mientras que las tareas de marcación y alineación del modelo se les asigno un grado bajo porque requieren de pasos con herramientas convencionales CAD y se ejecutan de forma rápida. Las rectificaciones de presión y liberación tienen un grado alto porque deben verificarse con secciones transversales y tienen un mayor grado de iteración hasta lograr la forma correcta. Finalmente, las actividades de manufactura digital tienen un grado alto por la cantidad de variables en la impresión 3D de temperatura, tiempos, velocidades, por esto están fuera del alcance del proyecto.

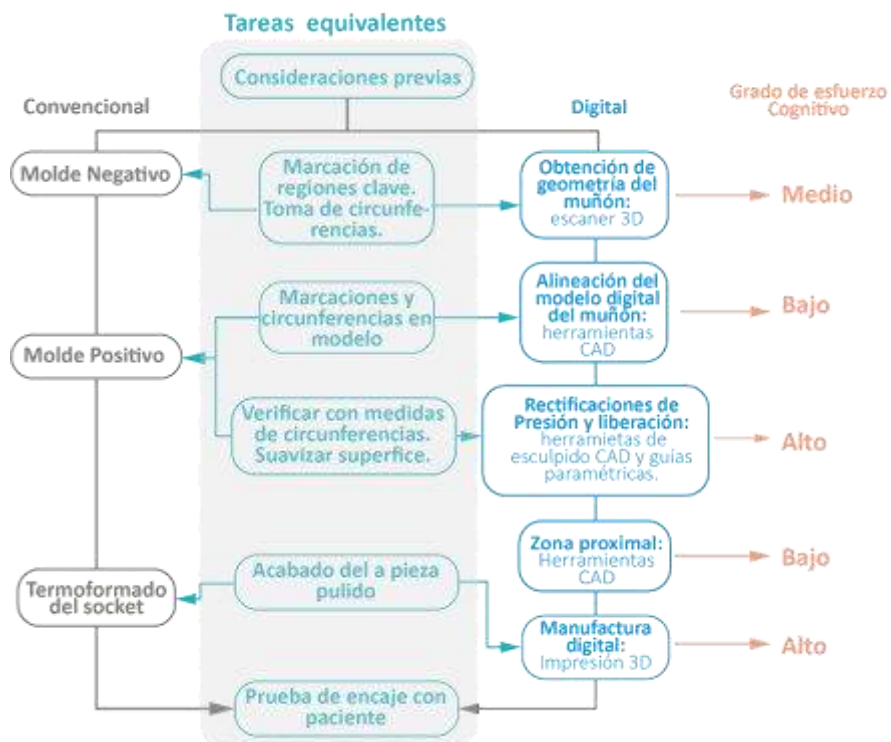


Figura 30 Intervención a la técnica convencional con tecnologías digitales

## 11.2 Integración del conocimiento tácito en la digitalización

En esta sección se describe en detalle la transformación de las tareas del método convencional utilizando herramientas digitales, los diagramas mostrados se agruparon en partes principales del proceso: 1 Molde negativo, 2 Molde positivo: Alineación y rectificaciones de presiones, 3 Molde positivo: rectificaciones de liberación y región distal, 4 Región proximal y 5 manufactura. En ellos se muestra cómo cambian o se mantienen los atributos tácitos en la implementación digital, por lo que se describe las tareas necesarias para utilizar las herramientas digitales de software y escáner 3D. Además, para su ejecución, es esencial contar con un modelador CAD, ya que los técnicos protesistas no suelen estar familiarizados con estas tecnologías. Por ello, se establecen dos roles: **técnico protesista y modelador CAD**.

**1 molde negativo.** Esta parte es equivalente a la construcción del molde negativo que contiene la geometría del muñón, se lleva a cabo una emulación mediante ingeniería inversa con escáner 3D, se definieron tareas del método convencional que son equivalentes y otras tareas que se modifican con las tecnologías digitales. Las relacionadas con las marcaciones de zonas de presión y liberación, la medición de circunferencias, la determinación de la distancia medial-lateral (ML) se mantienen sin cambios. Para las marcaciones se utilizaron marcadores (relieves) que pudieron ser registrados en el escáner 3D. Y la acción de vendar el muñón con yeso cambia por escaneo 3D; las labores de aplicar presión al molde para marcar las regiones de carga se realizan con herramientas de esculpido CAD como se muestra en la figura 31. Los demás diagramas se muestran en el anexo 1 integración del conocimiento tácito en la digitalización de la técnica.

## Obtención de geometría del muñón

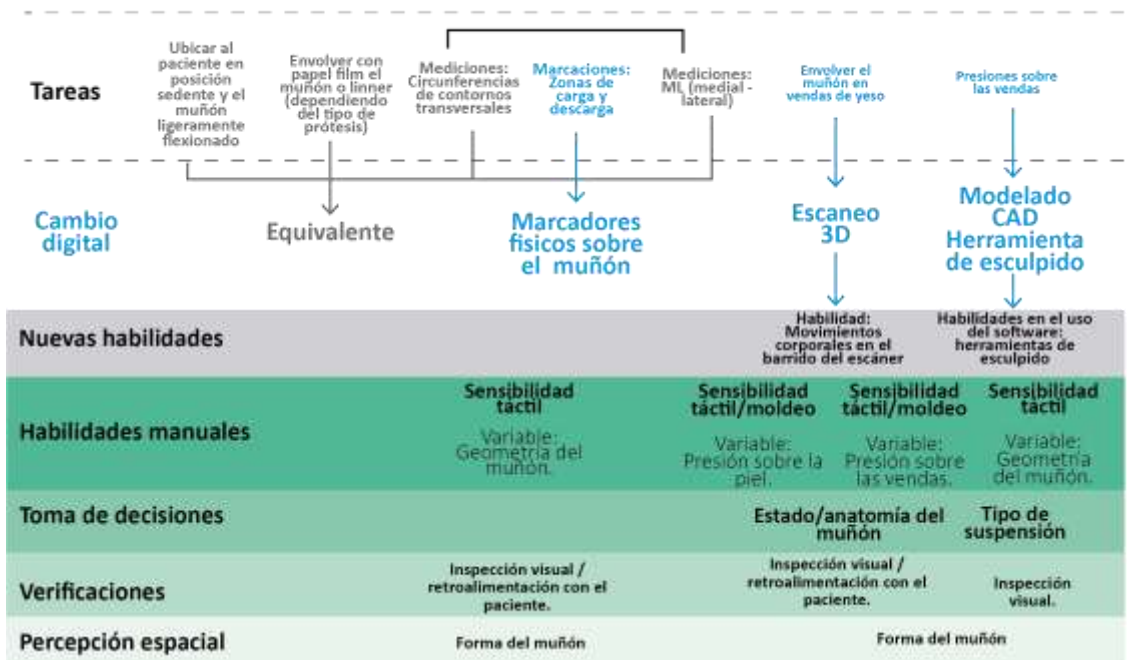


Figura 31 Cambio digital en la fase de obtención de geometría del muñón. Las tareas en gris permanecen sin cambios.

### 11.3 Esfuerzo cognitivo del proceso digital

En este apartado se describen en detalle el esfuerzo cognitivo, procedural, **habilidades**, **toma de decisiones**, y **verificaciones** de las tareas del proceso digital, de manera equivalente al análisis jerárquico de tareas de las tablas 21 y 22 del proceso convencional. La tabla 28 muestra la etapa de obtención de la geometría del muñón, en ella solo se describe la tarea de escaneo 3D ya que las actividades anteriores son equivalentes al proceso convencional y también se describe la etapa de Alineación de modelo y rectificaciones de presión.

Técnica			Habilidades	Toma de decisiones	Esfuerzo cognitivo competencias	Procedural	Verificaciones
Etapas	Proceso manual	cambio en medio digital					
Obtención de geometría del muñón	Obtención del molde negativo	Escaneo 3D	Manejo de dispositivos de escaneo 3D, interpretación de datos escaneados y capacidad de resolución de problemas en tiempo real.	Ajustar parámetros del escáner (resolución, velocidad, ángulo) y decidir si es necesario realizar un segundo escaneo para completar áreas faltantes.	Identificar las áreas clave del muñón que deben ser capturadas con precisión, considerando la calidad del escaneo y la eliminación de posibles oclusiones.	Operar el escáner 3D siguiendo un recorrido sistemático alrededor del muñón para capturar toda la geometría necesaria.	Reconstrucción completa
	Vaciado del molde negativo con yeso	Adecuar la malla de la reconstrucción	Manejo de software de modelado 3D, análisis de geometría digital y habilidades de atención al detalle.	Determinar qué elementos deben ser eliminados o corregidos y qué nivel de detalle es necesario para conservar la precisión geométrica.	Identificar zonas con ruido, inconsistencias o agujeros en la malla digital, evaluando su impacto en la precisión del modelo.	Utilizar herramientas de software para limpiar la malla, eliminando el ruido y cerrando agujeros pequeños para obtener una superficie continua.	Malla limpia y cerrada
Alineación de modelo y rectificaciones de presión	Colocar el molde en el puesto de trabajo en posición horizontal	Alinear el modelo digital	Manejo de herramientas de alineación en software CAD, análisis espacial.	Decidir la orientación final basada en anatomía del paciente	Determinar los planos adecuados de referencia para asegurar la correcta orientación del modelo.	Ajustar el modelo digital respecto a los planos superior, frontal y lateral en el software.	Visual respecto a puntos anatómicos
	Remarcar las regiones críticas identificadas y las alturas de las secciones	Colocar marcadores en el modelo digital	identificación de zonas críticas y uso de herramientas de marcado digital.	Identificar las áreas que requieren marcación para zonas de presión y liberación.	Ubicar marcadores digitales en las zonas correspondientes usando herramientas de modelado.	Ubicar marcadores digitales en las zonas correspondientes usando herramientas de modelado.	Comparar con imágenes o referencias anatómicas
	Comparar secciones	Medición digital de circunferencias	Comparar los valores obtenidos con las mediciones físicas y decidir si se requieren ajustes en el modelo.	Identificar los puntos clave para medir circunferencias de contornos en el modelo digital.	Usar herramientas de medición del software para obtener circunferencias transversales del modelo.	Usar herramientas de medición del software para obtener circunferencias transversales del modelo.	las dimensiones deben coincidir dentro de los márgenes tolerables.
	Rectificar zonas de presión	Construcción de zonas de presión con herramientas de esculpido CAD	Habilidades en esculpido digital, modelado 3D y trabajo con superficies.	Decidir qué áreas requieren presión y cómo esculpir el modelo para obtener la geometría deseada.	Identificar las áreas del modelo donde se debe aplicar presión, tomando en cuenta las necesidades del paciente.	Usar herramientas de esculpido en CAD para crear áreas específicas de presión en el modelo digital.	Según medidas de circunferencias
	Verificar circunferencias en el molde	Medición digital de circunferencias	Precisión en medición digital, análisis comparativo de datos.	Comparar las circunferencias del modelo digital con las mediciones físicas y determinar si las modificaciones están dentro de los rangos esperados.	Comparar las circunferencias obtenidas con las del muñón, asegurando la precisión en las mediciones.	Medir circunferencias transversales del modelo en puntos clave y compararlas con las mediciones físicas.	Verificar que las circunferencias del modelo digital coincidan dentro de los márgenes establecidos con las mediciones físicas.

Tabla 28 Esfuerzo cognitivo en las etapas de obtención de la geometría del muñón, Alineación del modelo y rectificaciones de presión.

La tabla 29 muestra el esfuerzo cognitivo en las etapas de: rectificaciones de liberación, zona proximal y manufactura.

Técnica			Habilidades	Toma de decisiones	Esfuerzo cognitivo competencias	Procedural	Verificaciones
Etapa	Proceso manual	cambio en medio digital					
Rectificaciones de liberación	Construir la caja en la pared posterior	Modelado CAD de la pared posterior	Habilidades en modelado CAD, especialmente en la creación de estructuras funcionales.	Decidir la geometría adecuada para la pared posterior del socket que proporcione apoyo sin comprometer la comodidad.	Identificar la ubicación adecuada para la pared posterior, considerando la biomecánica y las necesidades del paciente.	Modelar la caja en CAD para proporcionar soporte a los tendones flexores y asegurar una marcha adecuada.	Verificar que la pared posterior del modelo sea funcional y que se ajuste correctamente a la anatomía del paciente.
	Rectificar zonas de liberación: cresta tibial y región distal	Rectificación de zonas de liberación con herramientas de esculpido CAD	Habilidades en esculpido y modelado de zonas de liberación.	Decidir la cantidad de material a eliminar en las zonas de liberación según la anatomía y las necesidades del paciente.	Identificar las zonas donde se debe eliminar material para aliviar presión o evitar puntos de incomodidad.	Utilizar herramientas de esculpido en CAD para eliminar material de las zonas de liberación en el modelo.	Verificar que las zonas de liberación sean adecuadas y que no haya material en exceso que cause incomodidad o presión.
	Pulir zonas rectificadas	Suavizar el modelo con herramientas CAD	Habilidades en suavizado y refinamiento de superficies en CAD.	Decidir el grado de suavizado necesario sin perder la integridad estructural del modelo.	Identificar áreas del modelo que requieren suavizado para mejorar el confort y la funcionalidad.	Aplicar herramientas de suavizado en CAD para suavizar las superficies del modelo sin alterar su geometría crítica.	Verificar que el suavizado no afecte la precisión del modelo y que las superficies sean homogéneas y funcionales.
Zona proximal	Cortar el socket termoformado	Marcar el borde proximal en el modelo digital	Precisión en el uso de herramientas de marcado en software CAD.	Decidir la ubicación exacta del borde proximal para asegurar un ajuste cómodo y funcional.	Identificar el borde proximal del socket con base en referencias anatómicas del modelo digital.	Usar herramientas de CAD para marcar el límite proximal en el modelo digital.	Verificar que el borde proximal esté correctamente marcado en función de la anatomía y funcionalidad.
	Termoformar el socket	Desfasar la superficie digital del socket	Habilidades en manejo de herramientas de desfasado en software CAD.	Decidir el espesor adecuado para el desfasado, considerando resistencia y comodidad del socket.	Determinar la cantidad de desfase necesaria para asegurar un ajuste correcto sin comprometer la estructura.	Aplicar un desfase uniforme a la superficie digital del socket usando herramientas CAD.	Verificar que el desfase sea consistente y cumpla con los requisitos de diseño y funcionalidad.
Manufactura	Termoformar el socket	Impresión 3D	Habilidades en manejo de impresoras 3D y preparación de archivos para impresión.	Decidir los parámetros de impresión como resolución, material y orientación del socket en la impresora.	Seleccionar el material adecuado y configurar los parámetros de impresión basados en el diseño del socket.	Exportar el modelo digital a un formato compatible, preparar la impresora y ejecutar la impresión.	Verificar que la impresión 3D se complete sin defectos estructurales y que el socket cumpla con las especificaciones digitales.

Tabla 29 Esfuerzo cognitivo en las etapas de: rectificaciones de liberación, zona proximal, manufactura digital

#### 11.4 Algoritmo de emulación de la técnica

A continuación, se describe la digitalización de la técnica aplicada al diseño de socket de la observación de campo A, se utilizaron dos tipos de software CAD, Rhinoceros® para la alineación del modelo y la construcción de marcadores, y la caja posterior, y por otro lado las operaciones que simulan el moldeo manual se trabajaron en el software Meshmixer® por su facilidad para el manejo y modificación de mallas. De igual forma se definieron dos roles en el flujo de tareas que corresponden a Rol: técnico y Rol

diseñador. La figura 33 muestra el algoritmo general y el anexo 2 algoritmo de emulación a la técnica detalla las tareas.

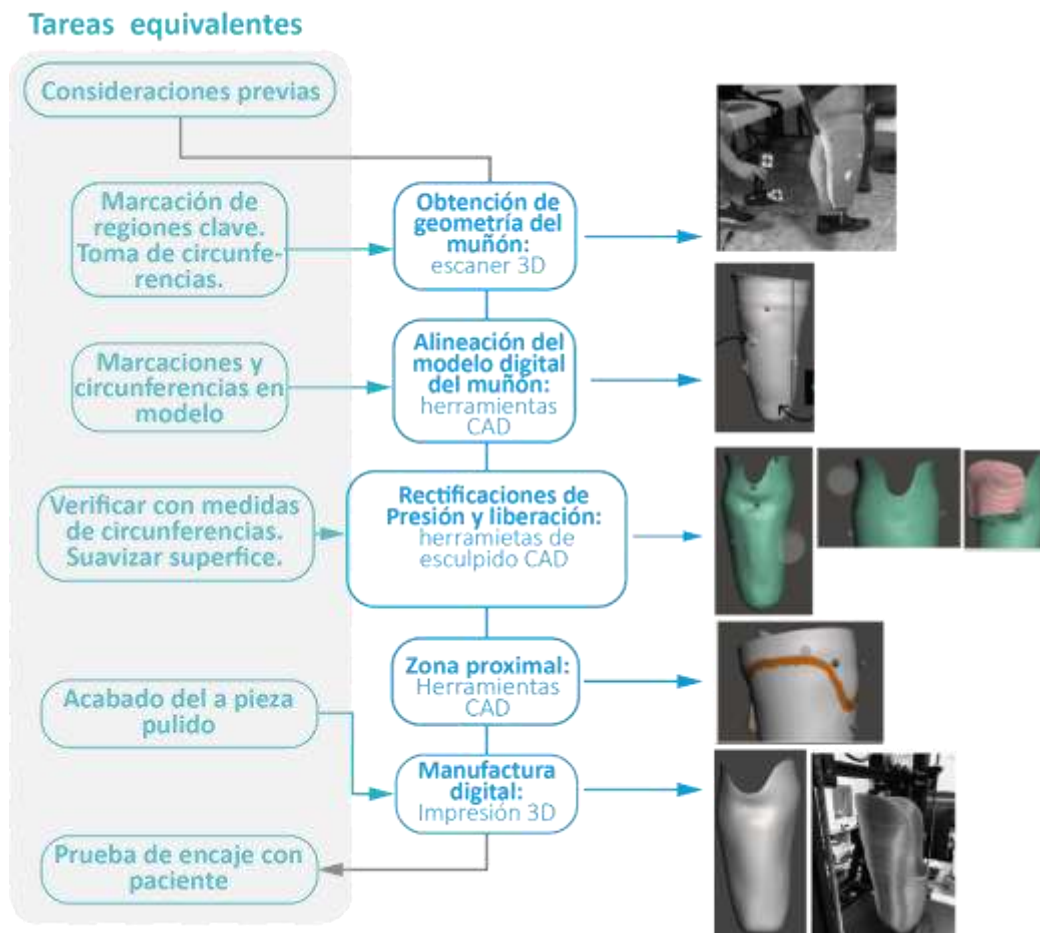
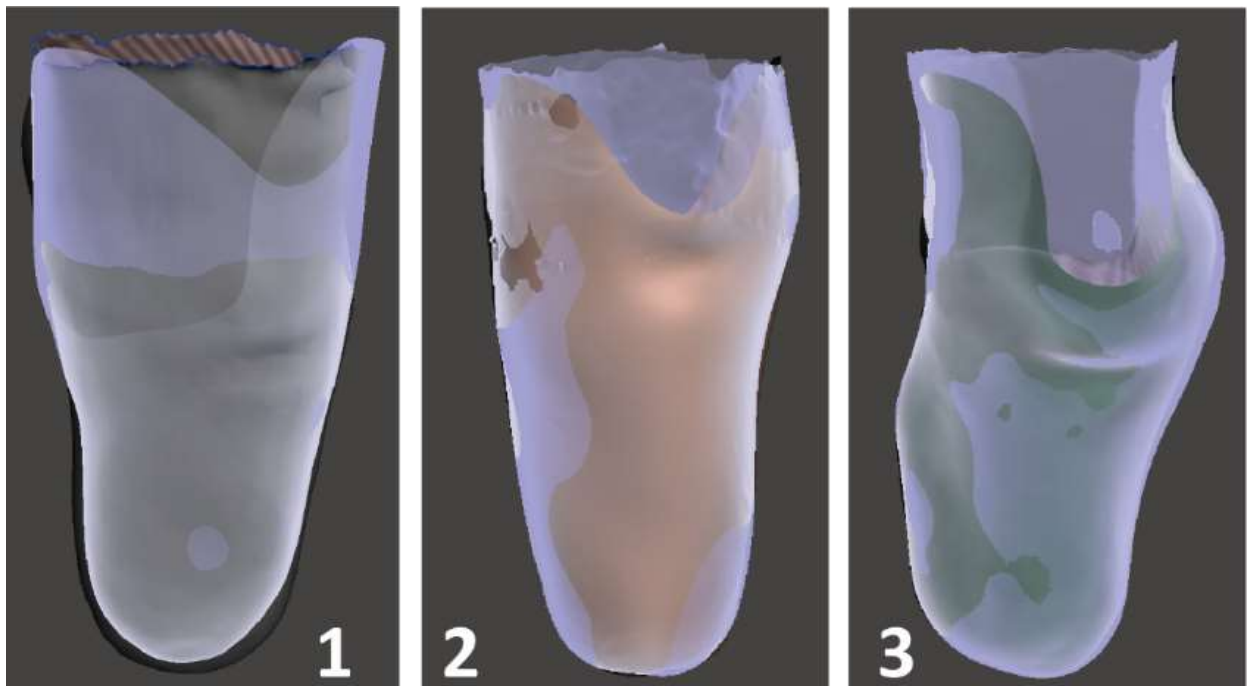


Figura 32 Aplicación del algoritmo digital, al paciente de observación de campo A.

### 11.5 Verificaciones al algoritmo

Las verificaciones del algoritmo se realizaron comparando la superficie del socket digital con respecto a la superficie del molde positivo, para esto se escaneó el molde positivo del caso **P1** y se superpusieron las superficies de ambos modelos. Se verificó la correspondencia de las rectificaciones realizadas mediante herramientas de esculpido CAD, con el modelo digital del molde positivo obtenido a partir de su versión física reconstruida. Es importante señalar que estas verificaciones se llevaron a cabo paso a paso durante

el modelado CAD, y no al final de todas las modificaciones, ya que en esta primera exploración fue necesario confirmar la emulación del moldeo en el medio digital, de esta forma se aseguró que es posible imitar las operaciones de moldeo, y tener una precisión equiparable a las realizadas en la técnica convencional. Además, se diseñaron los sockets de los demás casos de las observaciones de campo con el algoritmo propuesto, para ver su replicabilidad en diferentes casos transtibiales. La figura 33 muestra los sockets modelados sobre la malla de su molde positivo, el cual fue alineado teniendo con las referencias anatómicas realizadas por los técnicos.



*Figura 33 Comparación de mallas sockets modelados con algoritmo de la digitalización a la técnica. 1 caso P1. 2 caso P3. 3 caso P2.*

Se realizó la impresión 3D con material PLA en técnica de deposición fundida del socket modelado en el caso de estudio **P1**, el técnico evaluó y comparó visualmente el socket con el molde positivo e identificó que la forma general del modelo es aceptable, sin embargo, el socket modelado requiere de mayor ajuste

en los apoyos supra condilares ya que estos quedaron muy abiertos en el modelo digital, al igual que se necesita de una mayor presión en la pared posterior. La figura 34 muestra la impresión del socket y la apreciación de técnico.

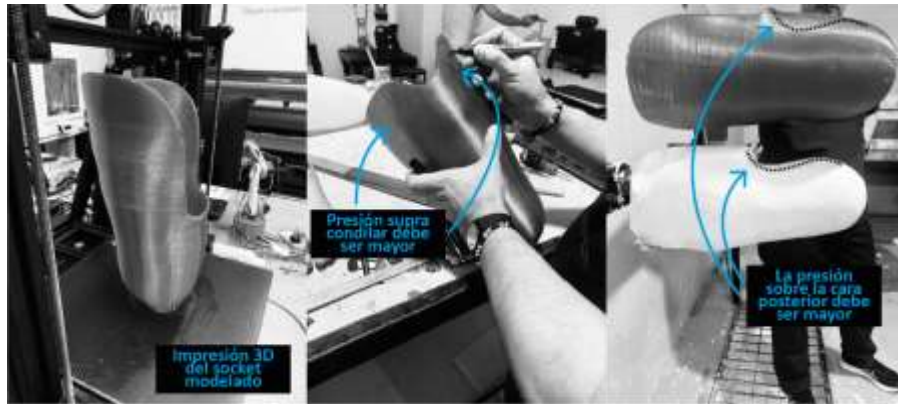


Figura 34 la impresión del socket y la apreciación de técnico.

## 11.6 Diagnóstico del algoritmo

Tras analizar el desempeño general del algoritmo en los diseños de socket aplicados a los casos de estudio de las observaciones de campo, se hizo un diagnóstico para identificar oportunidades de mejora. Además, se propusieron soluciones que podrían ayudar a mitigar las dificultades encontradas. A continuación, se presenta una descripción detallada de lo identificado en la tabla 30.

Etapa /paso	Oportunidad de mejora	Posible solución
<b>Obtención de la geometría del muñón.</b>	Los marcadores físicos que se colocan sobre el muñón para identificar regiones críticas generan ruido en forma de relieves sobre la superficie del modelo digital que es necesario eliminar con las herramientas de escupido como aplanar y suavizar la superficie.	Construir marcadores que sean fácilmente removibles al adecuar la malla del modelo digital  Utilizar un escáner que permita tomar la textura y color en la reconstrucción para que las marcaciones no tengan relieve.
<b>Adecuar la malla de la reconstrucción.</b>	Si al momento de reconstruir el muñón quedan regiones muy grandes sin reconstruir porque el escáner no las registró en el barrido, estas áreas son complejas de rellenar y puede restar precisión al modelo digital.	Asegurarse que la reconstrucción 3D sea lo más completa posible

<p><b>Modificaciones en la geometría del modelo digital.</b></p>	<p>Aunque las herramientas de esculpido digital pueden replicar las habilidades de moldeo realizados, lograr una precisión total en relación con la geometría final de la modificación es complejo. Esto se debe a que los técnicos ejercen un control tácito sobre las modificaciones al molde positivo y carecen de un método explícito para determinar las medidas exactas de la rectificación, y esta toma de decisiones depende de varios factores.</p> <p>En los sockets modelados digitalmente, fue posible ejercer un control preciso en las rectificaciones gracias a la referencia proporcionada por la malla digital del molde positivo.</p>	<p>Se propone el desarrollo de guías de rectificado paramétrico en forma de volúmenes, para cada rectificación. Estas guías se superpondrían sobre la malla del modelo digital del muñón, y con diferentes parámetros se ajusta el posicionamiento de la guía y su volumen según las indicaciones del técnico.</p> <p>Con ejercicios booleanos de sustracción se restará el volumen de la guía al modelo para definir las regiones de presión y con ejercicios de unión se adiciona el volumen para la definición de regiones de liberación.</p>
<p><b>Manufactura digital</b></p>	<p>El método de impresión 3D mediante deposición fundida y el uso de materiales convencionales como PLA y ABS carecen de las propiedades mecánicas necesarias para resistir el impacto de la marcha en la prótesis. Las uniones entre las capas de filamento fundido son susceptibles a fallos bajo esfuerzos cortantes.</p> <p>La técnica digital se ve restringida por el tipo de interfaz utilizado (blanda o forro de silicona). Cuando se emplea un forro blando, no es factible fabricar el socket diseñado debido a la necesidad de producir también su interfaz. Actualmente, no se dispone de un material funcional que pueda replicar el forro realizado de forma convencional.</p>	<p>Para construir un socket funcional mediante este método se necesita de manufactura flexible como un refuerzo en fibra de carbono en los sockets impresos o utilizar impresiones que cuenten con este material como el filamento de nylon y fibra de carbono.</p>

*Tabla 30 Diagnostico del algoritmo.*

### **11.7 Guías de rectificado para las modificaciones al modelo digital**

Cómo se identificó en el diagnóstico del algoritmo uno de los desafíos respecto a emular la técnica es imitar las operaciones que involucran moldear agregando o reduciendo el yeso positivo en áreas específicas para configurar zonas de presión y liberación, no desde el ejercicio de la habilidad manual, ya que las herramientas digitales de esculpido permiten imitar con facilidad e intuitivamente las operaciones de moldeo. Si no que la complejidad está en la dimensión de geometría de la zona modificada, ya que esta depende del estado o anatomía del muñón, tipo de suspensión de la prótesis, medidas de la pierna sana y de la personalización al paciente, estos factores influyen en la toma de decisiones que el técnico realiza junto con la observación y tacto del muñón. determinando la forma y la profundidad para las cavidades en las zonas de presión o que tan prominente debe ser la liberación en las regiones específicas

del molde. Además, los técnicos no cuentan con una medida específica para determinar la profundidad o prominencia de las geometrías de las rectificaciones, estas se realizan en base a su experiencia y considerando los factores mencionados.

Para afrontar esta adversidad se proponen guías de rectificado paramétrico las cuales son volúmenes que se superponen en el modelo digital del muñón y en una operación booleana de unión o sustracción se imita el agregar o retirar yeso en el molde positivo para formar la rectificación. Y con la parametrización la forma de estos volúmenes puede variarse en función de las indicaciones del técnico. Se espera que en este ejercicio el conocimiento tácito de toma de decisiones y habilidades de moldeo pase al medio digital traducido en las dimensiones que configuran el volumen de la guía paramétrica.

Una vez retirado o agregado volumen en el modelo digital es posible verificar esta tarea al tomar la medida de la sección donde se realizó la rectificación y compararla con la medida inicial, de manera similar al método convencional, en el cual las medidas de las secciones tomadas al muñón sirven de guía para que el técnico controle la profundidad de una cavidad o el aumento de una zona de liberación, al medir a la altura de la misma sección y comparar las medidas antes y después de la rectificación. Finalmente, una vez realizados estas rectificaciones en un siguiente paso se suavizará la forma de las regiones con las herramientas de esculpido digital.

### **11.7.1 Diseño de las guías**

La construcción de las guías se realizó con dos herramientas del software CAD Rhinoceros®: Grasshopper y Gumball. Grasshopper es un lenguaje de programación visual que permite el diseño de formas con parámetros que pueden variarse según el algoritmo programado. Por otro lado, Gumball es una herramienta de referencia a objeto que posiciona vectores en los ejes X,Y,Z referentes a las dimensiones ancho, profundidad y altura respectivamente; también es posible modificar un objeto como escalar su tamaño en función de estas dimensiones principales, esta herramienta utiliza estos vectores para orientar

un objeto o partes de este y realizar dichas transformaciones. Con Grasshopper, se diseñó un algoritmo que ajusta los parámetros a variables utilizadas por los técnicos de manera similar al método convencional mientras que la herramienta Gumball se utilizó para el posicionamiento de las guías sobre el modelo digital del muñón. A continuación, se describe cada guía diseñada.

**Guía de rectificado fosa poplítea.** La rectificación de la fosa poplítea implica que el técnico la realice desde el molde negativo al presionar las vendas de yeso en la pared posterior, a la altura del tendón patelar y en el molde positivo esta concavidad se acentúa retirando material, formando una frontera con una figura similar a una gota. Para su construcción, se han definido parámetros de altura, ancho y profundidad de la concavidad, los cuales se basan en una curva 2D que representa la frontera de la forma de gota. Estos parámetros pueden ajustarse modificando los valores en barras construidas en la interfaz de Grasshopper. La figura 35 detalla la construcción de la guía de la fosa poplítea.

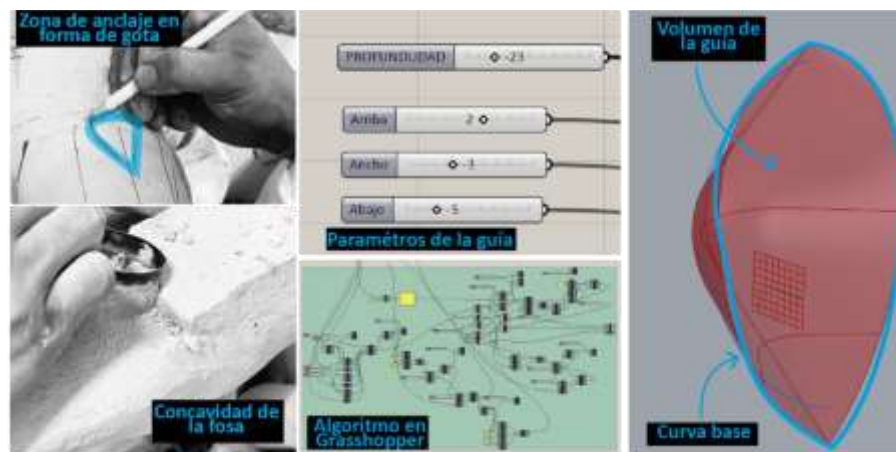


Figura 35 Guía de rectificado fosa poplítea. Derecha construcción convencional de la rectificación. Centro parámetros de la guía y algoritmo en Grasshopper. Derecha Volumen de la guía con curva base.

**Posicionamiento de la guía.** En la parte superior de la pared posterior del volumen de la guía se encuentra un marcador esférico de 5 mm de diámetro, el cual debe ubicarse en la fosa poplítea del

modelo digital. El marcador debe penetrar hasta la mitad de la esfera en el volumen del modelo. Para realizar esta ubicación se utiliza el Gumball, desde la vista posterior (atrás) de la interface de Rhinoceros se sobrepone el marcador de la guía con el marcador anatómico de la fosa poplítea que se marcó previamente y desde la vista lateral con la ayuda del gumball se ubica el marcador asegurando que penetre hasta su mitad en el modelo digital. Una vez posicionado el marcador se ajustan los parámetros de altura, ancho y profundidad según las indicaciones del técnico y se realiza la diferencia booleana para restar el volumen de la guía la modelo digital. La figura 36 detalla el posicionamiento.

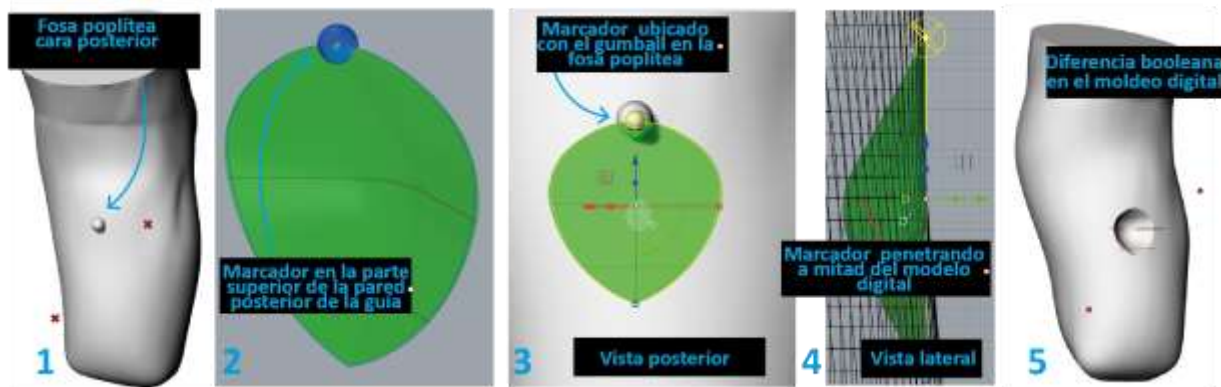


Figura 36 Posicionamiento de la guía fosa poplítea. 1 marcador de la fosa en el modelo digital del muñón. 2 marcador esférico en la curva base de la guía. 3 detalle vista posterior ubicación del a guía con el gumball marcador al nivel de la fosa. 4 detalle vista lateral marcador entrando a mitad del modelo digital. 5 diferencia booleana del volumen de la guía en el modelo digital.

Las demás guías se encuentran en el anexo 3 guías paramétricas, las cuales tienen una estructura similar pero aplicada a otras rectificaciones tomadas del molde positivo.

### 11.8 Diagrama de flujo del proceso digital

Con la inclusión de las guías de modificación los pasos del algoritmo de digitalización de la técnica cambian en las etapas de modelado CAD; a continuación, se definió el diagrama de flujo del algoritmo en 5 etapas:

**1 obtención de la geometría del muñón; 2 alineación del modelo digital del muñón; 3 Rectificaciones de presión y liberación; 4 zona proximal; 5 Manufactura digital.** A continuación, en la figura 37 se muestra

los diagramas para las etapas 1 y 2 donde se detalla el rol del modelador CAD y Técnico. En la etapa 1 el

técnico identifica y toma mediciones del muñón. A la vez, el modelador actúa como observador, y ejecuta la tarea de escanear el muñón. En la etapa 2 El modelador CAD se encarga de corregir y alinear la malla del modelo digital del muñón, mientras que el técnico verifica la alineación respecto a los planos principales.

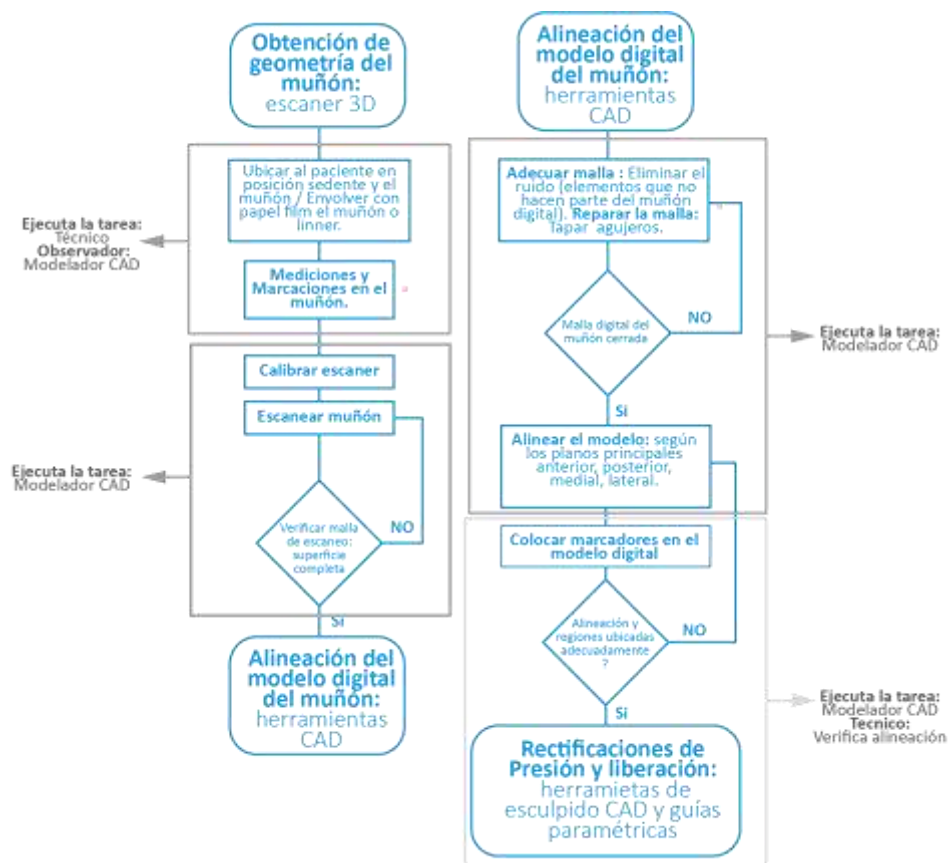


Figura 37 Diagrama de flujo algoritmo digital. Izquierda Obtención de la geometría. Derecha Alineación modelo digital.

En la etapa 3 se trazan y miden las secciones tomadas a las alturas de la medición análoga, se realizan las rectificaciones de presión con las guías paramétricas, se vuelve a medir las secciones en el modelo rectificado, para verificar si las reducciones son adecuadas. Y después se realizan las rectificaciones de liberación. El modelador CAD ejecuta la tarea y el técnico la verifica como se muestra en la figura 38. Y en la etapa 4 se realiza el corte proximal que es ejecutado por el modelador y ejecutado por el técnico.

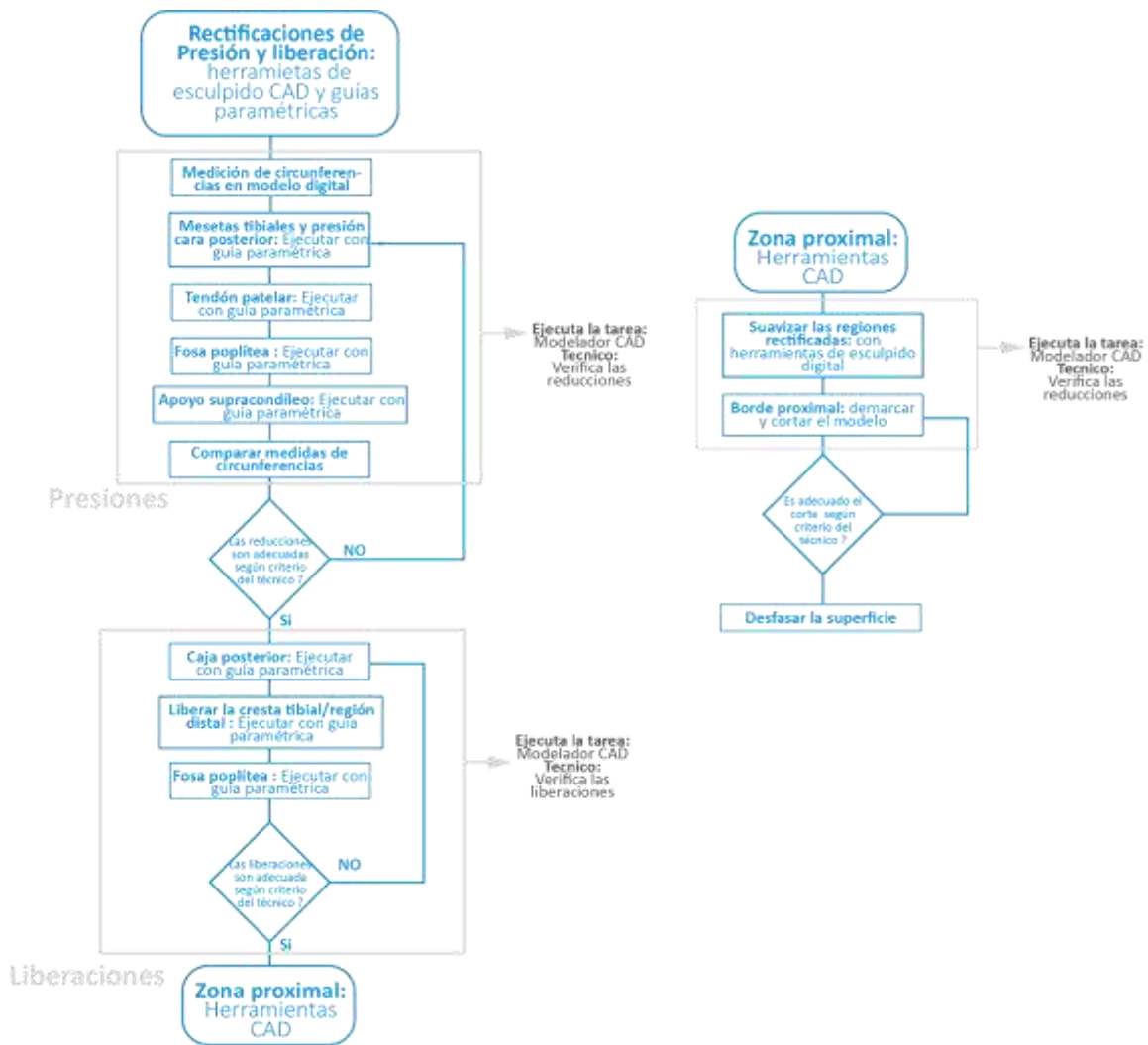


Figura 38 Diagrama de flujo 3 Rectificaciones de presión y liberación. Y zona proximal.

## 11.9 Aplicación del algoritmo

El algoritmo corregido se aplicó al caso **P2**, es un paciente de amputación derecha transtibial con una interfaz blanda; a continuación, se muestra de forma general el desarrollo del socket en la figura 39 y el detalle se encuentra en el anexo 4 aplicación del algoritmo.

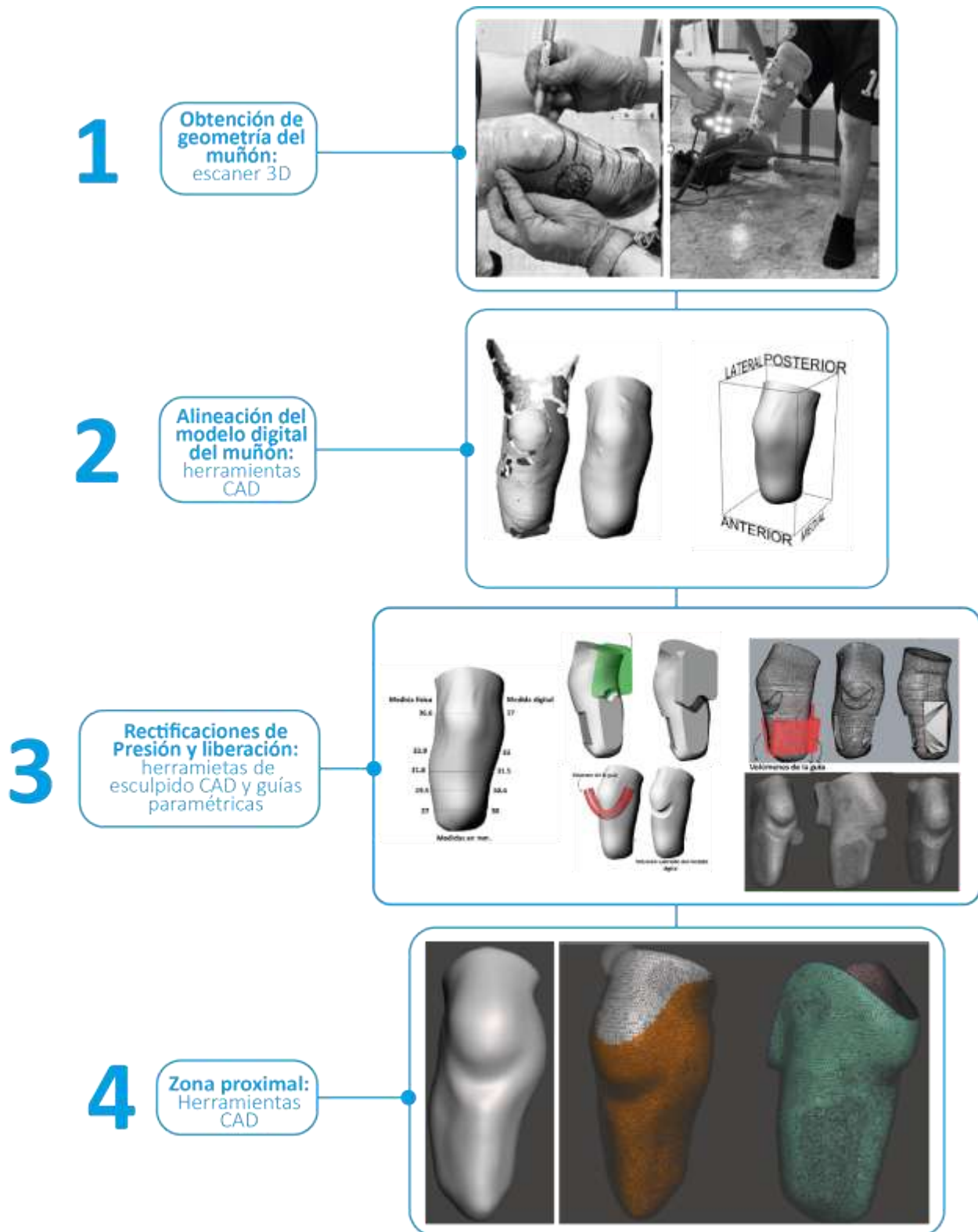
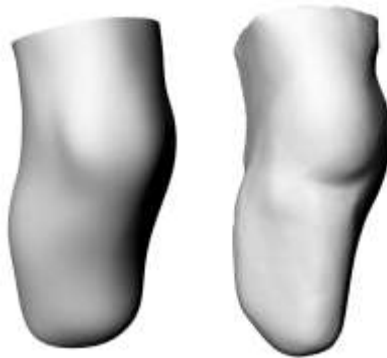


Figura 39 Desarrollo del socket aplicado al cado de estudio del a observación de campo C.

## 12 FASE 4 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO DIGITAL PARA EL METODO DE FABRICACIÓN DE SOCKETS

### 12.1 Diseño de la prueba

Se propone para la prueba de diseño socket, el caso **P2**, paciente transtibial derecho con interfaz blanda. Se elige este participante ya que se cuenta con el molde positivo en modelo digital por reconstrucción, y su socket laminado por método tradicional validado con el paciente. La geometría digital del muñón será la entrada de datos para el inicio de la prueba, y la geometría del molde positivo se utilizará como control para comparar superficies. La figura 40 muestra las superficies.



*Figura 40 Muñón y molde positivo para la prueba de diseño de socket. Izquierda muñón. Derecha molde.*

### 12.2 Pasos del modelado CAD

El modelado del socket digital inició desde las rectificaciones al modelo digital, se tomó desde esta actividad, ya que son las que más esfuerzo cognitivo requieren según el análisis comparativo de los pasos convencionales y digitales de la técnica descrita en la figura 31. Se dividió la prueba en 6 tareas como se muestra en la tabla 31. Para las instrucciones de las tareas se realizó una descripción en detalle que se muestra en el anexo 5 instrucciones de la prueba. En esta prueba los atributos tácitos de **“toma de decisiones”** y **“verificaciones”** se ven representados en las descripciones de las tareas, junto con

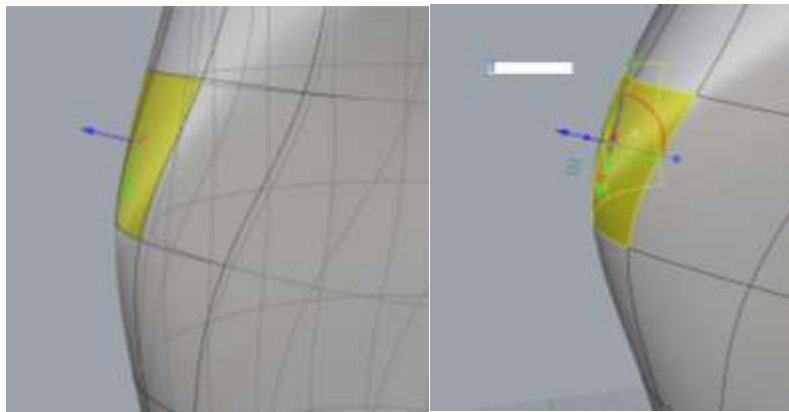
marcadores, marcaciones, superficies guía, y volúmenes paramétricos. Estos elementos son en parte traducción del conocimiento tácito, y funcionan como guía para la correcta ejecución de las actividades, ya que durante la prueba no fue posible contar con un técnico orto protesista que asista durante el modelado del socket.

Tarea	Objetivo	Guías construidas a partir de los atributos tácitos
<b>1 rectificación de las mesetas tibiales y pared posterior.</b>	Reducir el volumen del modelo del muñón, guiado por las medidas de las secciones tomadas a mano.	Marcadores digitales a altura de cada sección.  Valor de la medida inicial y el valor al cual se debe reducir en cada circunferencia.  Descripción de la tarea. Detallando que se deben respetar las áreas marcadas como regiones de protuberancias óseas y llevando las secciones a formas triangulares.
<b>2 apoyo supra condíleo</b>	Formar los apoyos en la parte superior de los cóndilos.	Marcaciones sobre el muñón. Valor aproximado en milímetros de la presión a generar.  Superficie guía que indica la forma y límite de la reducción.  Descripción de la tarea.
<b>3 liberación cresta tibial y base distal</b>	Construir el colchón para la tibia remanente.	Descripción de la tarea.  Superficie guía que guía la forma y límite de la liberación
<b>4 liberación protuberancia ósea</b>	Liberar la protuberancia ósea en el costado izquierdo.	Descripción de la tarea.  Marcación sobre la superficie del muñón.  Valor aproximado de la liberación
<b>5 presión del tendón patelar</b>	Realizar la presión a nivel del tendón patelar	Descripción de la tarea.  Volumen paramétrico  Valor aproximado de la reducción
<b>6 caja posterior</b>	Construir la caja posterior a nivel de los tendones flexores	Descripción de la tarea.  Volumen paramétrico  Marcadores de posición de tendones

*Tabla 31 Tareas de la prueba Diseño de socket*

### 12.3 Mecánica de herramienta de esculpido digital

En la prueba las herramientas que imitan el esculpido digital no se realizaron con los pinceles de meshmixer<sup>®</sup>, para evitar mudar de software, se trabajó con la herramienta subdivisiones de la interfaz Rhinoceros<sup>®</sup>, la cual permite mover de forma libre y controlada regiones en la superficie virtual del muñón y además facilita la medición de las circunferencias al no tener que cambiar de aplicativo CAD. La figura 41. Muestra la mecánica de las subdivisiones.



*Figura 41 Mecánica de herramienta subdivisiones para esculpido digital.*

#### **12.4 Participantes**

Se seleccionó como participantes de la prueba a estudiantes de diseño industrial de la universidad industrial de Santander que estuvieron finalizando el curso de diseño digital o ya lo hubiesen cursado, en dicho curso los estudiantes obtienen bases fuertes en el uso de herramientas generales CAD y familiarizados con la interfaz de Rhinoceros<sup>®</sup>.

Antes de iniciar la prueba, se capacitó brevemente a los participantes para contextualizar en la fabricación de sockets, de forma general el método convencional y digital. Esta capacitación corresponde a la fase de transferencia de conocimiento, basada en el modelo de gestión del conocimiento de Magnier et al 2008. Y su alcance no buscó que los participantes aprendan a modelar un socket por si solos, se intentó explicar y aplicar el algoritmo propuesto en condiciones controladas. Una vez se realizó esta contextualización se iniciará la prueba.

## 12.5 Análisis de datos

En el análisis de datos se tienen dos variables a medir la calidad del resultado y el esfuerzo cognitivo de las tareas a ejecutar, este esfuerzo cognitivo está definido por su componente procedural del desarrollo CAD, y se divide en tres partes: tiempo, número de iteraciones y complejidad de la tarea como se muestra en la tabla 32. Para la recopilación de estos datos se cuenta con el anexo 6 control de la prueba de socket.

	Calidad del resultado	Esfuerzo cognitivo		
	Superficie digital del socket	Tiempo de modelado	Número de iteraciones por tarea	Nivel de complejidad en de la tarea
<b>Descripción</b>	Exactitud de las rectificaciones realizadas al modelo digital del muñón.	El tiempo que toma ejecutar la tarea.	El número de intentos necesarios para realizar la tarea.	Percepción del participante de la complejidad de la tarea
<b>Herramienta de medición</b>	Comparación de superficies digitales: Superposición de los volúmenes molde positivo y socket modelado por participante. Se mide la diferencia entre las distancias de las superficies identificando las regiones que más se acercan y alejan a la superficie control.	Tiempo en minutos de las 6 tareas por separado de la prueba.	Registro de la cantidad de intentos por actividad.	En una escala de Likert los participantes describen la complejidad de la tarea, siendo 1 muy fácil y 5 muy complejo.

*Tabla 32 Variables de la prueba de diseño de socket*

## 12.6 Resultados

### 12.6.1 Calidad de la reconstrucción.

Se utilizó el software CloudCompare® para la comparación de superficies, con el objetivo de analizar la proximidad de distancias entre los puntos de las superficies de los modelos comparados. En la Figura 42 (parte derecha), se presenta un diagrama de barras con tonalidades que corresponden al modelo del participante 1 P1. Los colores fríos indican un desfase negativo, es decir, puntos que se encuentran hacia el interior de la superficie. Por otro lado, los colores cálidos representan un desfase positivo, indicando puntos desplazados hacia el exterior de la superficie. Los colores intermedios, que varían entre amarillo ocre y verde, indican las áreas con mayor proximidad, donde la diferencia de distancias tiende a ser

cercana a 0. En la Figura 42 (costado izquierdo), se muestra la representación de estas tonalidades directamente sobre el modelo digital del socket, señalando visualmente las regiones con mayor precisión y aquellas con mayores desviaciones en comparación con el molde positivo de control.

Además, se realizó una comparación mediante secciones transversales en Rhinoceros®. Para ello, se seccionaron tanto la superficie modelada por el participante como la superficie de control, midiendo las diferencias significativas entre ambas curvas. La Figura 43 presenta las mediciones correspondientes al participante 1, expresadas en milímetros. Los detalles completos de las comparaciones de las superficies de cada participante se encuentran en el anexo 7 comparación de superficies prueba de socket.

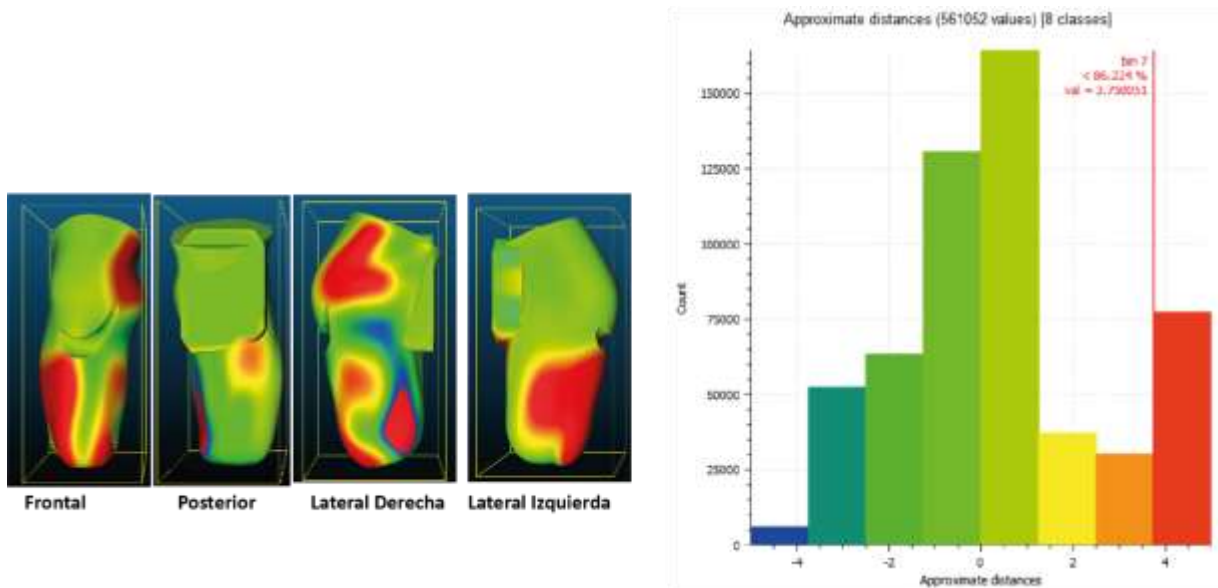
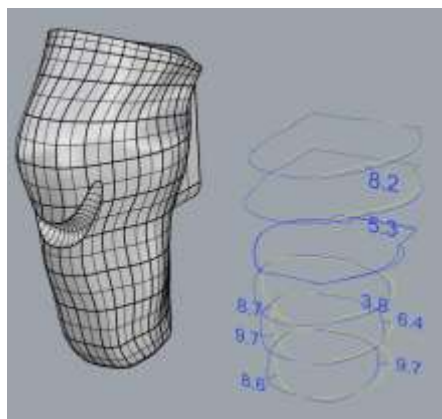


Figura 42 Comparación de superficies de la prueba de modelado. Izquierdas vistas principales en franja de colores. Derecha diagrama de distancias aproximadas con la descripción en barras de tonalidades.



*Figura 43 Diferencias significativas entre las secciones de la superficie control y socket modelado del participante 1. Azul sección del socket, amarillo sección de la superficie control. Medidas en milímetros.*

El análisis de la comparación entre las superficies modeladas del socket y la malla del molde positivo digital reveló que las mayores diferencias de distancia se encuentran en la meseta tibial izquierda y la región supra condilar derecha. En contraste, las áreas con mayor coincidencia en las distancias se localizan en la parte frontal, específicamente en la zona de liberación de la cresta tibial, en la presión del tendón patelar, en la presión de la pared posterior y en la construcción de la caja posterior. Este patrón se repite en todos los participantes, excepto en el caso de P5, quien no completó la tarea de construcción de la caja posterior. Por esta razón, dicha región aparece destacada en rojo en el diagrama comparativo. La Figura 44 muestra la vista frontal y La figura 45 la vista posterior de los modelos de cada participante resaltando las regiones mencionadas.

Vista frontal de los modelos de cada participante

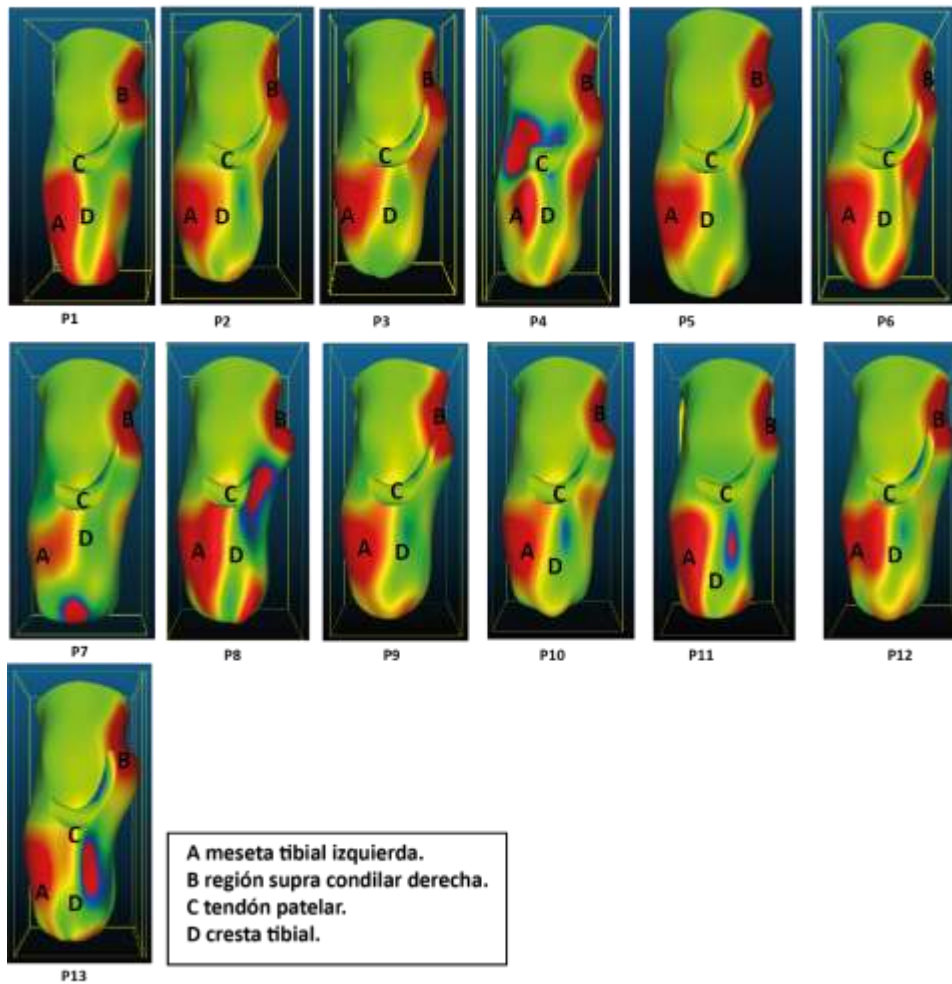


Figura 44 Vista frontal de la comparación de superficies en los modelados de participantes. En tonalidades las regiones con mayor y menor coincidencia respecto a la superficie control.

Vista posterior de los modelos de cada participante

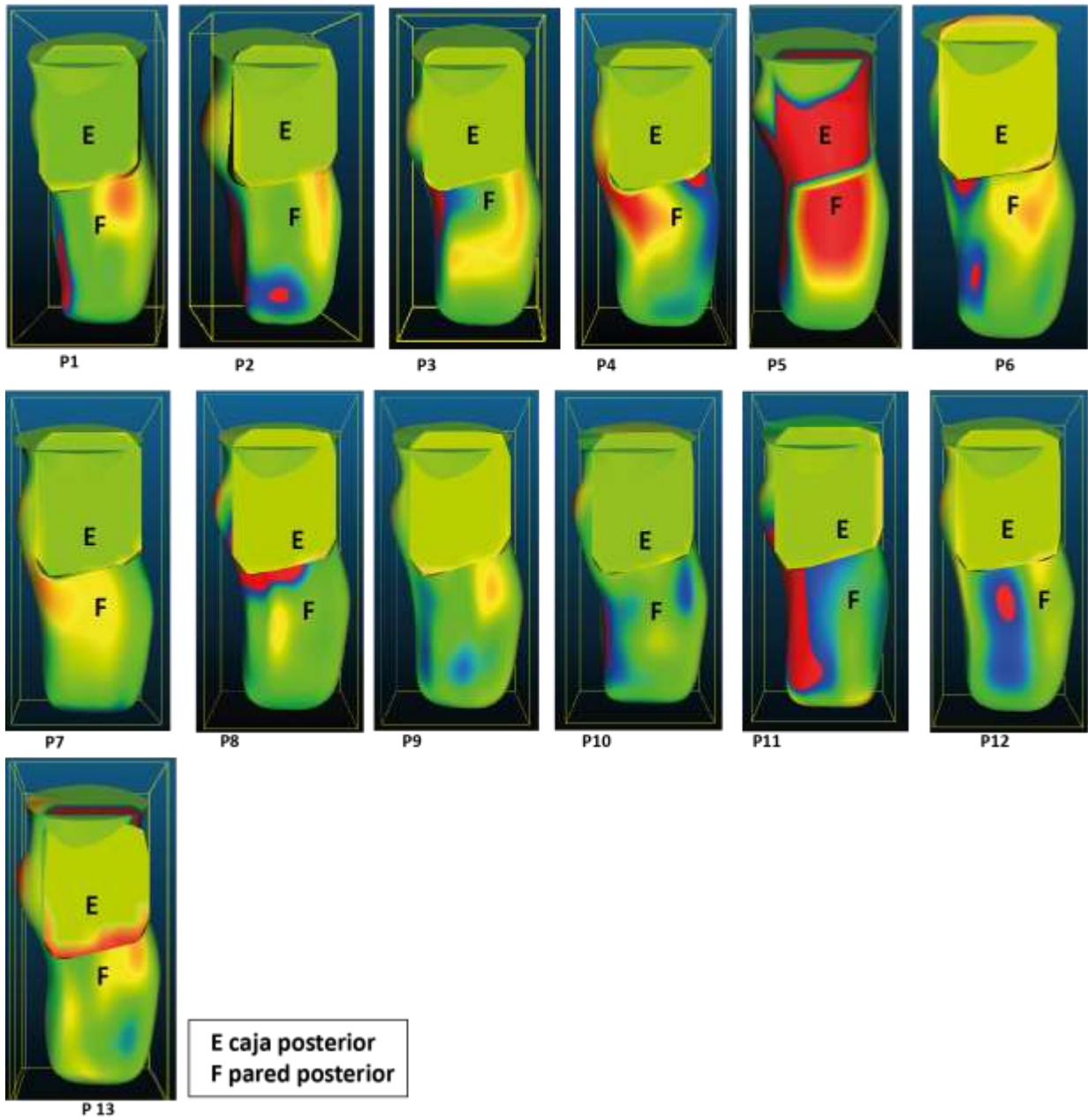
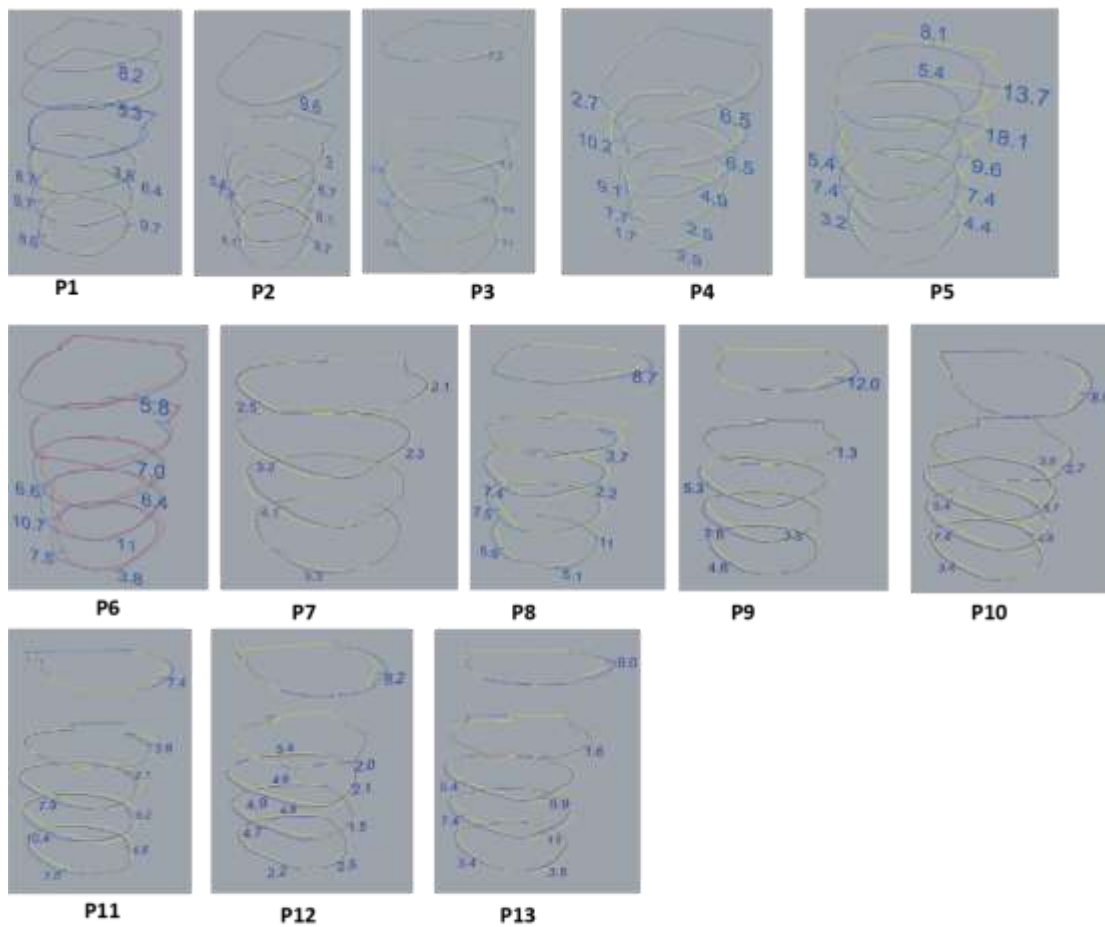


Figura 45 Vista posterior de la comparación de superficies en los modelados de participantes. En tonalidades las regiones con mayor y menor coincidencia respecto a la superficie control.

Respecto a las áreas con mayor diferencia entre distancias meseta tibial y presión supra condilar derecha, se comparó la diferencia de distancia en milímetros de las secciones en esas regiones como se muestra en la figura 46.

**Comparación entre distancias de las secciones transversales de los sockets**



**Diferencia máxima y mínima meseta tibial derecha: 10.4 mm / 3.2 mm**  
**Diferencia máxima y mínima región supracondilar derecha : 13.7 mm / 2.1 mm**  
**Amarillo sección superficie control, Azul sección superficie del socket**

*Figura 46 Diferencias máximas y mínimas entre secciones de las regiones críticas identificadas*

### 12.6.2 Esfuerzo cognitivo

Para el análisis del esfuerzo, se realizaron las siguientes tablas: Tabla 33 Agrupación de los promedios por participante y tabla 34 Agrupación de promedios por tarea. En la tabla de tareas, se ordenaron las actividades de menor a mayor grado de complejidad, tomando en cuenta las variables analizadas: tiempo, número de iteraciones y percepción de la dificultad. En el anexo 8 datos esfuerzo cognitivo de cada participante, se muestran los datos por cada participante.

Participante	Promedio de Tiempo minutos	Promedio de Iteraciones	Promedio de Dificultad
1	9.83	16.00	1.17
2	11.00	14.50	1.50
3	7.17	1.17	2.00
4	10.00	1.17	2.50
5	18.33	24.67	1.33
6	7.00	5.67	2.00
7	11.50	1.83	2.00
8	8.67	2.17	2.17
9	9.50	7.33	2.00
10	15.83	14.83	2.50
11	18.33	48.50	2.17
12	5.00	10.83	1.50
13	4.50	6.50	1.50

*Tabla 33 Agrupación promedios por participante.*

Tarea	Promedio de Tiempo	Promedio de Iteraciones	Promedio de Dificultad
Tarea 4	6.15	1.08	1.00
Tarea 5	4.69	4.31	1.54
Tarea 2	7.77	10.46	1.92
Tarea 6	6.46	7.31	2.00
Tarea 3	8.46	16.00	2.08
Tarea 1	29.54	32.46	2.62

*Tabla 34 Promedio de dificultad de las tareas ordenadas de menor a mayor grado de complejidad*

La Tarea 1 presentó un tiempo significativamente mayor que las demás, lo cual es indicativo de la curva de aprendizaje inicial. Este tiempo prolongado se debe a que los participantes necesitaron familiarizarse con el proceso y las herramientas de modelado de esculpido por subdivisiones. A medida que avanzaron en las tareas, el tiempo requerido disminuyó, lo que sugiere que el aprendizaje adquirido durante la primera tarea permitió una ejecución más eficiente de las siguientes. Este patrón muestra cómo las habilidades desarrolladas en las primeras etapas contribuyen a la mejora del desempeño en las tareas posteriores.

En cuanto a las Tareas 6, esta se realizó con una guía paramétrica, cuyo objetivo es reducir el esfuerzo cognitivo involucrado en la actividad. Sin embargo, a pesar de contar con esta herramienta de apoyo, los participantes percibieron estas tareas como las de mayor complejidad. Esto sugiere que, aunque la guía paramétrica facilita ciertos aspectos del proceso, otros factores, como la naturaleza de las tareas o la familiarización con los conceptos, influyen en la percepción de dificultad. La figura 47 muestra los resultados de manera gráfica.

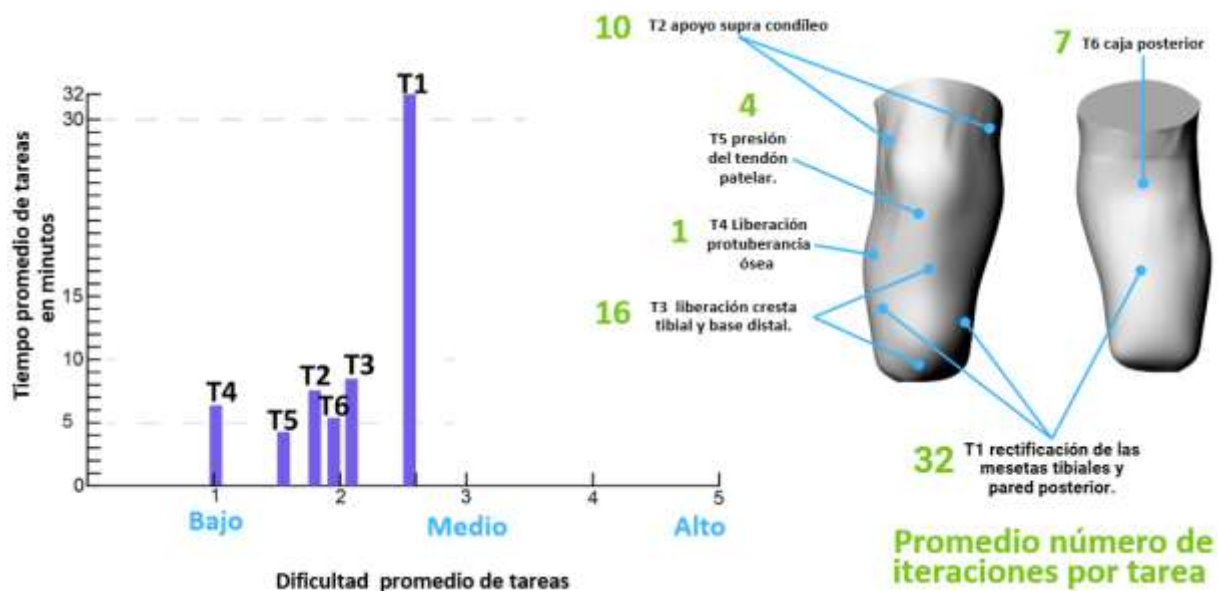


Figura 47 Resultados del esfuerzo cognitivo. Izquierda diagrama de barras del tiempo la dificultad promedio de la tarea. Derecha cantidad promedio de iteraciones de la tarea en las zonas específicas del modelo.

### 13 CONCLUSIONES

- El desarrollo de este proyecto muestra que es posible realizar una intervención digital a las técnicas de base manual como lo es la manufactura de sockets, al indagar sobre el conocimiento tácito, se tienen en cuenta sus atributos principalmente las habilidades, toma de decisiones, y verificaciones, en estos se encuentra la experiencia que permite una transformación adecuada de la forma del artefacto asegurando su fiabilidad; que en el caso de estudio de sockets se encuentran en las modificaciones a su geometría para que sea posible la marcha y uso de la prótesis.
- Las intervenciones con tecnologías CAD/CAM desde un enfoque del conocimiento tácito no buscan sistematizar o hacer explícito este conocimiento, por el contrario, buscan un medio en el cual los atributos tácitos de toma de decisiones y verificaciones puedan desarrollarse con fluidez, en el cambio a las nuevas tareas con las herramientas digitales, manteniendo los conocimientos adquiridos bajo la experiencia de una persona experta.
- Los resultados de la prueba de socket muestran, que, si bien los modelos construidos por los participantes tienen un grado alto de calidad en su geometría, ya que la mayoría de las distancias analizadas son cercanas a 0 frente a la superficie de control, como se evidencia en el 7 anexo comparación de superficies prueba de socket, no están aún listos para ser impresos y utilizados por el paciente. Debido a que las diferencias de las regiones de presión en la meseta tibial izquierda y presión supracondilar derecha son significativas y podrían lastimar al paciente, sin embargo, durante la prueba se tuvo la limitante de la verificación del técnico, actividad que se definió en el algoritmo de la técnica y que se ratifica como una tarea clave necesaria.

- El resultado final de la geometría de los sockets modelados evidencia que no todo el conocimiento tácito puede ser llevado de manera explícita en las técnicas de base manual, si bien las instrucciones, guías paramétricas y guías de superficie ayudan a traducir este conocimiento en la geometría del socket, será necesario el criterio de un técnico experto quien bajo su experiencia puede corregir o verificar los ajustes menores, que en el caso de los modelos de la prueba se requieren para tener una superficie del socket totalmente adecuada.
- Los resultados del esfuerzo cognitivo en la prueba de diseño de socket muestran una percepción baja en el nivel de dificultad ya que en promedio se calificó con un nivel de 2.62 en una escala de 1 a 5 donde 5 es la mayor dificultad. Se evidencia que el algoritmo propuesto tendría el potencial para ser utilizado con facilidad con modeladores CAD. Y en el caso que se requiera una capacitación a estas tecnologías a los técnicos ortoprotésistas, se tendría la ventaja de que las operaciones de modelado son de baja complejidad.
- El número de iteraciones y tiempos altos en la mayoría de las tareas contrasta con el nivel bajo asignado a la dificultad de la tarea dado por los participantes, lo que indica que estas no son necesariamente complejas, sino que tienden a ser repetitivas y extensas. Además, desde la finalización de la tarea 1 la cual fue la que más tiempo les tomo a los participantes, se tiende a reducir el tiempo de ejecución, esto probablemente a la curva de aprendizaje adquirida para las herramientas de **esculpido CAD**, ya que ninguno de los participantes estaba familiarizado con ese tipo de herramienta.

- Finalmente, se concluye que el protocolo de digitalización propuesto es viable, siempre y cuando se garantice la participación de los expertos durante las etapas de diseño, validación y ajuste. La aceptación del método digital por parte de los técnicos es clave para su implementación exitosa y su integración en contextos productivos reales.
- El protocolo de intervención digital muestra que es posible obtener geometrías digitales fieles a la técnica convencional, con el enfoque del conocimiento tácito. Esto permite un potencial para innovar en los procesos de manufactura de base manual, con la posibilidad de replicar los procesos manuales para la mejora de sus tareas. En el caso de la fabricación de sockets un proceso menos invasivo en los pacientes, una manufactura más amigable con el medio ambiente al sustituirlos moldes de yeso. Y de cara al diseño con la aplicación de mejoras directas al artefacto desde la parte CAD e impresión digital, como la posibilidad de socket que sean adaptables a los cambios de volumen que sufre el muñón del paciente, o como se observó en la revisión de literatura una prótesis que permita la integración de todos los componentes en un solo artefacto.

#### **14 RECOMENDACIONES**

- Para profundizar en la validación final se recomienda una prueba de diseño de socket que cuente con la asistencia de técnicos orto protesistas durante el desarrollo para las etapas de verificación de las superficies por inspección visual, de tal forma que se espere que el resultado final del modelado del socket sea más aproximado a las superficies control que la que se obtuvo en la validación final del presente proyecto. O que sirva de base para contrastar con este estudio que tan acertado se pudo llegar con esa verificación de expertos.

- Realizar pruebas de validación participativa con pacientes que utilizan los sockets. La retroalimentación directa del usuario final permitirá: Evaluar el ajuste y la comodidad del socket fabricado con el proceso digital; detectar posibles diferencias entre el proceso manual y digital desde la perspectiva del usuario; mejorar las etapas de rectificación del modelo digital.
- Se proponen futuros estudios respecto a intervenciones digitales de técnicas de base manual, similares al caso de estudio como lo pueden ser los variados tipos de órtesis que se requieren la toma de moldes por yeso, como los descritos en la revisión de literatura. Con el objetivo de profundizar en el enfoque del conocimiento tácito y contrastar los resultados con la investigación realizada.
- Respecto al caso de estudio de sockets, se recomienda indagar en un modelado CAD de la técnica, con tecnologías inmersivas como las gafas de realidad virtual y dispositivos hápticos, para evaluar si el uso de estas tecnologías simulando la forma en que los técnicos esculpen el yeso puede tener mejores resultados, y la posibilidad de que los técnicos expertos se acerquen con mayor naturalidad a los medios digitales para hacer este tipo de desarrollos.
- Explorar el uso de algoritmos de machine learning para identificar patrones en los ajustes realizados por expertos durante la fabricación de sockets. La IA podría: predecir ajustes en regiones críticas del molde digital; optimizar tareas repetitivas en el modelado CAD mediante automatización guiada; generar recomendaciones de diseño basadas en datos previos de casos similares.

## 15 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alavi, M., & Leidner, D. E. (2001). Knowledge management and knowledge management systems: conceptual foundations and research issues. *Management Information Systems Quarterly*, 107136.
- Alexandre, C. B., Gomez, E. A., & Valente, A. C. (2015). Interdisciplinary Relationship between Designer and Craftsman Based on Integrated Craft Manufacturing Systems. *Procedia Engineering*, 1089–1095.
- Alexandre, Salguero, Peralta, & Ares. (2017). New design and manufacturing technologies for craft products. *Procedia Manufacturing*, 1284-1291.
- Allee, V. (1997). *The Knowledge Evolution: Expanding Organizational Intelligence*. Boston: ButterworthHeinemann.
- Altay, C., & Öz, G. (2019). Dialogic weaving: a favorable tension between design and craft. *Digital Creativity*, 39-55.
- Amrutsagar, L., Parit, G., Ghyyar, R., & Bhallamudi, R. (2020). Parametric Design and Hybrid Fabrication of Above-Knee Prosthesis. *Indian Journal of Orthopaedics*, 381-390.
- Asociación Colombiana de medicina física y rehabilitación. (16 de 07 de 2018). *Asociación Colombiana de medicina física y rehabilitación*. Obtenido de <https://www.acmfr.org/>
- Autodesk. (27 de 05 de 2021). Autodesk. Obtenido de About Creating 3D Meshes: <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/AutoCAD-Core/files/GUID-A6232957-5039-4AB7-8B1D-8FD0AD98F77B-htm.html#:~:text=A%20mesh%20model%20consists%20of,mesh%20has%20no%20mass%20properties.&text=You%20c>
- Aytekin, B. A., & Rizvanoğlu, K. (2019). Creating learning bridges through participatory design and technology to achieve sustainability in local crafts: a participatory model to enable the transfer of tacit knowledge and experience between the traditional craftsmanship and academic education. *International Journal of Technology and Design Education*, 603-632.
- Balconi, M. (2002). Tacitness, codification of technological knowledge and the organisation of industry. *Research Policy*, 357-379.
- Ballit, A., Mougharbel, I., Ghaziri, & Dao, T. T. (2020). Fast Soft Tissue Deformation and Stump-Socket Interaction Toward a Computer-Aided Design System for Lower Limb Prostheses. *Irbm*, 1-10.
- Beamer, L., & Varner, I. (2001). *Intercultural Communication in the Global Workplace*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Bernabei, R., & Power, J. (2018). Hybrid design: Combining craft and digital practice. *Craft Research*, 119134.
- Bhallamudi., L. A. (2020). Parametric Design and Hybrid Fabrication of Above-Knee Prosthesis. *Indian Journal of Orthopaedics*, 381-390.
- Bofylatos, S., & Spyrou, T. (2017). Meaning, knowledge and artifacts, giving a voice to tacit knowledge. *Design Journal*, S4422-S4433.

- Bonfanti, A., Del Giudice, M., & Papa, A. (2018). Italian Craft Firms Between Digital Manufacturing, Open Innovation, and Servitization. *Journal of the Knowledge Economy*, 136-149.
- Braganca, S., Arezes, P., & Carvalho, M. (2015). An overview of the current three-dimensional body scanners for anthropometric data collection. *Occup Saf Hyg III*, 149–153, 149–153.
- Brown, T. (2018). Design Thinking. Harvard Business Review.
- Chan, P. K. (2015). A Collaborative Design Curriculum for Reviving Sheet Metal Handicraft. *International Journal of Art and Design Education*, 369-377.
- Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, J. G., & Thiede, S. (2015). Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*, 615–625.
- Chen, Heyer, Ibbotson, Salonitis, K., Steingrímsson, & Thiede. (2015). Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*, 615–625.
- Clark, R. (2014). Cognitive Task Analysis for Expert-Based Instruction in Healthcare. Handbook of Research on Educational Communications and Technology: Fourth Edition. 541–551.
- Colombo, G., Facoetti, G., Rizzi, C., & Vitali, A. (2015). Low Cost Hand-Tracking Devices to Design Customized Medical Devices. *International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality*.
- Colombo, G., Filippi, S., Rizzi, C., & Rotini, F. (2010). A new design paradigm for the development of custom-fit soft sockets for lower limb prostheses. *Computers in Industry*, 513-523.
- Colombo, G., Rizzi, Caterina, R., Daniele, & Vitali, A. (2018). 3D interactive environment for the design of medical devices. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 699-715.
- Comotti, C., Regazzoni, D., Rizzi, C., & Vitali, A. (2015). Multi-material design and 3D printing method of lower limb prosthetic sockets. In: Proceedings of the 3rd 2015 Workshop on ICTs for improving Patients Rehabilitation Research Techniques. *REHAB '15*.
- Coons, G., & Ratto, M. (2015). Grease pencils and the persistence of individuality in computationally produced custom objects. *Design Studies*, 126-136.
- Cowan, R., & Foray, D. (1996). "The changing economics of technological learning", in Metcalfe et Vence *Wealth from Diversity*, Kluwe.
- Cross, N. (1999). Design Research: A Disciplined Conversation. *Design Issues*, 5-10.
- Dalkir, k. (2005). *Knowledge Management in Theory and Practice*. Montreal: McGill University.
- Di Roma, A. (2017). Footwear Design. The paradox of "tailored shoe" in the contemporary digital manufacturing systems. *Design Journal*, S2689-S2699.
- Facoetti, G., Vitali, A., Colombo, G., & Rizzi Caterina. (2014). A Low Cost Haptic Mouse for Prosthetic Socket. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 508-515.
- Fatone, S., & Caldwell. (2017). , R. Northwestern University Flexible Subischial Vacuum Socket for persons with transfemoral amputation-Part 1: Description of technique. *Prosthetics and Orthotics International*, 237–245.

- FEINGLASS, Joe, et al . (1999). Rates of lower-extremity amputation and arterial reconstruction in the United States, 1979 to 1996. *Journal of Public Health*, 1222-1227.
- Fernandez, E. (15 de 05 de 2021). *Autodesk Meshmixer: Herramienta gratuita para modelado en 3D*. Obtenido de NeoTeo : <https://www.neoteo.com/autodesk-meshmixer-herramienta-gratuita-para-modelado-en-3d/#:~:text=Autodesk%20Meshmixer%3A%20Herramienta%20gratuita%20para%20modelado%20en%203D,-por%20Edgardo%20Fernandez&text=Meshmixer%20es%20una%20aplicaci%C3%B3n%20de,di se%C3%B1>
- Gabbiadini., R. B. (2012). 3D modelling and knowledge: Tools to automate prosthesis development process. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 41-53.
- Ganzaroli, A., De Noni, I., Orsi, L., & Belussi, F. (2016). The combined effect of technological relatedness and knowledge utilization on explorative and exploitative invention performance post-M&A. . *European Journal of Innovation Management*, , 167-18.
- Georgiou, O. (2011). *Performance Based Interactive Analysis (Computational Design Modeling: Proceedings of the Design Modeling Symposium Berlin*. Berlin: Springer.
- Gould, L. (15 de 05 de 2021). *Automotive, design and production* . Obtenido de 3D Modeling and Rendering for the Rest of Us: <https://web.archive.org/web/20090709092144/http://www.autofieldguide.com/articles/090409.html>
- Graham, Z. (2008). Estimating the prevalence of limb loss in the United States: 2005 to 2050. *Arch. Phys. Med. Rehabil*, 422–429.
- Gunkel, A., Freysinger, W., & Thumfart, W. (2000). Experience with various 3-dimensional. *Archives of Otolaryngology – Head and Neck*, 390-395.
- Hanafizadeh, P., & Ghamkhari, F. (2019). Elicitation of Tacit Knowledge Using Soft Systems Methodology. In *Systemic Practice and Action Research* (Vol. 32, Issue 5). *Systemic Practice and Action Research*.
- Harlow, H. (2008). The effect of tacit knowledge on firm performance. 148–163.
- Health Organisation World. (2017). Standards for Prosthetics and Orthotics.
- Hebert, K., Keen, R. K., D.R., & Shady, S. (2016). Gait-Monitoring wearable technology for transtibial prosthetics. *Biomedical and Biotechnology Engineering, ASME*.
- Herbert, N. (2005). A preliminary investigation into the development of 3-D printing of prosthetic sockets. *J Rehabil Res Dev*, 141 — 146.
- Herbert, N., Simpson, D., William, S., & Ion, W. (2005). A preliminary investigation into the development of 3-D printing of prosthetic sockets. *journal of rehabilitation research and development* .
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. *Technische universität Dortmund*.
- Herschel. (2001). Tacit to explicit knowledge conversion: knowledge exchange protocols. 107-116.
- Herschel, R. N. (2001). Tacit to explicit knowledge conversion: knowledge exchange protocols. 107-116.
- Hodson, H. (2013). Leap motion hacks show potential of new gesture tech. *New Sci*.

- Hodson, H. (2013). Leap motion hacks show potential of new gesture tech. *New Sci.*
- Hsu, T. Y., & Wu, H. J. (2020). . Developing Knowledge Management System for Supporting Learning Activity in the Ceramics Craft Education. . 1339–1343.
- Ismail, H., Reid, I., Mooney, J., Poolton, J., & Arokiam, I. (2007). How small and medium enterprises effectively participate in the mass customization game. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 86-87.
- Jayawickrama, H. M. (2016). Dharmawardana, M., Kulatunga, A. K., Karunarathna, K. G. S. P., & Osadith, S. A. U. (2016). Enhancement of Productivity of Traditional Brass Manufacturing Industry Using Sustainable Manufacturing Concept. *Procedia CIRP*, 40, 562–567.
- Joan E. Sanders, J. B. (2016). Technical note: Computer-manufactured inserts for prosthetic sockets. *Medical Engineering & Physics*, 801-806.
- Kinfu, P. M. (2012). an open source implementation of Kinect Fusion + case study : implementing a 3D scanner with PCL.
- KUCKLICK, T. (2006). REVERSE ENGINEERING IN MEDICAL DEVICE DESIGN. 161-192.
- Kumar, A., & Ganesh, L. (2009). Research on knowledge transfer in organizations: a morphology. *Journal of Knowledge Management*, 161-174.
- Laguado, L., & Olivella, L. (2015). Design and manufacturing of a geometric - parametric based. *Iconofacto*, 213-227.
- Laing, S., Lee, P., & Go, H. (2011). Engineering a trans-tibial prosthetic socket for the lower limb amputee. *Annals of the Academy of Medicine Singapore*, 252-259.
- Lin, H. F. (2007). A stage model of knowledge management: an empirical investigation of process and effectiveness. *Journal of Information Science*, 643-659.
- Loh, P., Burry, J., & Wagenfeld, M. (2016). Reconsidering pye’s theory of making through digital craft practice: A theoretical framework towards continuous designing. *Craft Research*, 187-206.
- Magnier-Watanabe, R., & Senoo, D. (2008). Organizational characteristics as prescriptive factors of knowledge management initiatives. . *Journal of Knowledge Management*, 21–36.
- Mak et al. (2001). State-of-the-art research in lower-limb prosthetic biomechanics-socket interface: A review. *J. Rehabil. Res. Develop*, 161–174.
- Marino, et al . (2015). . Access to prosthetic devices in developing countries: Pathways and challenges. *in Proc. IEEE Annu. Global Humanitarian Technol. Conf*, 45–55.
- Marzano. (2010). When Practice Makes Perfect...Sense. Art & Science of Teaching. *Educational Leadership*.
- Messenì Petruzzelli, A., & Albino, V. (2012). *When Tradition Turns into Innovation. How Firms Can Create and Appropriate Value through Tradition*. Oxford: Woodhead Publishing Limited.
- Milton, A., & Roger, P. (2013). *Metodos de investigación para el diseño de producto*. Barcelona: Blume.
- Milton. (2007). *Knowledge Acquisition in practice a step-by-step guide*. London: Springer-Verlag.
- Nonaka, I., & Konno, N. (1998). The Concept of “Ba”: Building a Foundation for Knowledge Creation. . *California Review Management*, 40–53(3).

- O'Connor, E. (2017). Touching tacit knowledge: handwork as ethnographic method in a glassblowing studio. *Qualitative Research*, 217–230.
- Ojha, S. P., & Yammiyavar, P. (2019). A fuzzy-based approach to identify tacit knowledge in craft objects. *Smart Innovation. Systems and Technologies*, 197–210.
- Oldfrey, B., Miodownik, M., Barbareschi, G., Williams, R., & Holloway, C. (2020). Fabrication of Lower Limb Prosthetic Sockets . *AT2030 Innovation Insights*.
- Otálora, Y. (2019). El Análisis Cognitivo de Tareas como estrategia metodológica para comprender y explicar la cognición humana. *Universitas Psychologica* , 1–12.
- Paternò, L., Ibrahimi, M., Gruppioni, E., Menciaschi, A., & Ricotti, L. (2018). Sockets for limb prostheses: A review of existing technologies and open challenges. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1996–2010.
- Pirttimaa, M., Husu, J., & Metsärinne, M. (2017). Uncovering procedural knowledge in craft, design, and technology education: a case of hands-on activities in electronics. *International Journal of Technology and Design Education*, 215-231.
- Polanyi, M. (1966). *The tacit dimension*. Garden . City: NJ: Doubleday.
- Pye, D. (2010). The Nature and Art of Workmanship. *The Craft Reader*, by Adamson, Glenn. *Berg Publishers*, 341-353.
- Regazzoni, D. (20019). *A virtual platform for lower limb prosthesis design and assessment*. In *DHM and Posturography*. Elsevier Inc.
- Regazzoni, D., Vitali, A., Rizzi, C., & Colombo, G. (2019). A virtual platform for lower limb prosthesis design and assessment. In *DHM and Posturography*. *Elsevier Inc*.
- Reubens, R. (20010). Bamboo canopy: Creating new reference-points for the craft of the Kotwalia community in India through sustainability. *Craft Research*, 11–38.
- Risatti, H. (2007). *A theory of craft. Function and aesthetic expression*. The University of North Carolina: Chapel Hill.
- Sampieri, H. (2014). *Metodologia de la invstigación* . Mexico : McGrawHill.
- Sengeh, D., & Herr, H. (2013). A Variable-Impedance prosthetic socket for a transtibial amputee designed from magnetic resonance imaging data. *Prosthet. Orthot*, 129–137.
- Shadbolt NR, B. A. (2005). *Eliciting Expertise*. In: *Wilson JR, Corlett N (eds) Evaluation of Human Work*. CRC Press: Boca Raton.
- Shaukat, S., & Bhiva, A. (2018). Using GRBL-Arduino-based controller to run a two-axis computerized numerical control machine. *International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET)*.
- Shils, E. (1981). *Tradition*. Chicago : University of Chicago Press.
- SHUXIAN, Zheng, et al. (2005). Reconstruction of the structure of a residual limb for customising the design of a prosthetic socket. *Medical Engineering and Physics*, 67-74.
- Siu, N. W., & Dilnot, C. (2001). The challenge of the codification of tacit knowledge in designing and making: A case study of CAD systems in the Hong Kong jewellery industry. *Automation in Construction*, 701–714.

- Suib, S. S., Van Engelen, J. M., & Crul, M. R. (2020). Enhancing knowledge exchange and collaboration between craftspeople and designers using the concept of boundary objects. *International Journal of Design*, 113-133.
- Suib, S., Engelen, V., & Crul, M. (2020). Enhancing knowledge exchange and collaboration between craftspeople and designers using the concept of boundary objects. *International Journal of Design*, 113-133.
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 22–37.
- VINESH. Raja, et al. . (2008). *Reverse Engineering An Industrial Perspective*. Springer-Verlag : London.
- Wiig, K. (1997). *Roles of Knowledge-Based System in Support of Knowledge*. . New York, NY: C.R.C Press,.
- Wood, N., Rust, C., & Horne, G. (2009). A tacit understanding: The designer's role in capturing and passing on the skilled knowledge of master craftsmen. *International Journal of Design*, 65-78.
- Zack, M. H. (1999). Managing codified knowledge. *Sloan Management Review*, 45-48.
- Zheng, S., Wanhua, Z., & Bingheng, L. (2005). 3D reconstruction of the structure of a residual limb for customising the design of a prosthetic socket. *Medical Engineering & Physics*, 67-74.
- Zoran. (2013). Hybrid Basketry: Interweaving digital practice within contemporary craft. *Leonardo*, 324331.
- Zoran, A. (2015). Hybrid Craft: Showcase of Physical and Digital Integration of Design and Craft Skills. *Leonardo*, 384-398.
- Zoran, A., & Buechley, L. (2013). Hybrid reassemblage: An exploration of craft, digital fabrication and artifact uniqueness. *Leonardo*, 5-10.