

**Diseño de Marcos de Lentes Personalizables Por Medio de Tecnologías de Reconstrucción
Facial 3D**

Natalia Marlen Carrillo Quintero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Diseñadora Industrial

Directora

D.I Clara Isabel López Gualdrón

Ph.D (c) Ingeniería Área Gestión Tecnológica

Magister en Ingeniería de Materiales

Codirector

D.I Luis Eduardo Bautista

Ph.D (c) Ingeniería en Ciencias de la Computación

Magister en Ingeniería de Sistemas e Informática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Diseño Industrial

Bucaramanga

2018

Agradecimientos

A mis directores Clara López y Luis Eduardo Bautista por todas sus enseñanzas y aportes brindados no solo durante el desarrollo de este proyecto, también durante toda mi carrera universitaria.

A los señores Silvia y Yobany, dueños de la óptica visión puntual por el interés y la colaboración brindada durante el desarrollo del proyecto

A la empresa Jade 3D, en especial a Efrain quien me guio en el aprendizaje de las herramientas de modelado tridimensional utilizadas para la realización del proyecto

A la escuela de diseño industrial por facilitar las tecnologías y brindarme las herramientas que permitieron dar vida a este proyecto

A los voluntarios por su tiempo y participación desinteresada

A mis padres por su apoyo incondicional, sus consejos, su fe en mí y la constante motivación que me brindan para alcanzar mis metas

A todos mis amigos y compañeros con quienes viví esta experiencia

Tabla de Contenido

introducción	14
1 Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2 Marco Teórico	18
2.1 Diseño Paramétrico.....	18
2.1.1 Grasshopper.....	18
2.2 Ingeniería Inversa	20
2.2.1 Escáner 3d	21
2.3 Impresión 3d	22
2.4 Rostro Humano	22
2.4.1 Relación Marco-Rostro	24
2.5 Variaciones Anatómicas de La Sección Media Del Rostro.....	26
2.5.1 Ojos.....	26
2.5.2 Nariz	26
2.6 Anomalías Faciales	27
2.6.1 Asimetría Facial.....	28
2.7 Partes y Tamaños de Las Gafas	30
2.8 Benchmarking.....	31
3 Metodología.....	33
3.1 Desarrollo Objetivo 1.....	33
3.2 Desarrollo Objetivo 2.....	34
3.2.1 Fase 1: Desarrollar el Algoritmo de Diseño Paramétrico.....	34
3.2.2 Fase 2: Impresión 3d	34
3.2.3 Fase 3: Selección de la Tecnología de Escaneo	35
3.3 Desarrollo Objetivo 3.....	35
3.3.1 Procedimiento Prueba Casos de Estudio	35

3.3.2 Procedimiento de Prueba Del Proceso de Adaptación	36
4 Desarrollo Objetivo 1: Determinación de Los Puntos Del Rostro	37
4.1 Variaciones Anatómicas y Anomalías de la Sección Media Del Rostro	37
4.2 Entrevista a Expertos (Requerimientos Optométricos)	38
4.2.1 Fórmula Medica.....	38
4.2.2 Plaquetas.....	38
4.2.3 Ángulo Pantoscópico.....	39
4.3 Resumen de Los Resultados Del Objetivo Número Uno	39
4.3.1 Parámetros de Personalización	39
5 Desarrollo Objetivo 2: Modelo Paramétrico	42
5.1 Fase 1: Programación en Grasshopper.....	43
5.1.1 Frente.....	43
5.1.2 Varillas	49
5.2 Fase 2: Pruebas de Impresión y Modificación Del Modelado.....	52
5.2.1 Ensamble y Articulación Del Marco	54
5.2.2 Modelo Final	56
5.2.3 Análisis de Esfuerzos	56
5.3 Fase 3: Toma de Datos.....	62
5.3.1 Selección Del Escáner	62
5.3.2 Protocolo de Escaneo	63
5.3.3 Preparación de La Malla.....	65
5.4 Diagramas de Proceso.....	66
5.4.1 Proceso General.....	67
5.4.2 Proceso de Escaneo	67
5.4.3 Proceso Preparación de La Malla	68
5.4.4 Proceso Adaptación de Los Marco.....	68
6 Desarrollo Objetivo 3: Evaluación Del Modelo	70

6.1 Casos de Estudio.....	70
6.1.1 Proceso de Manufactura Digital Etapa Uno	73
6.1.2 Proceso de Manufactura Digital Fase 2.....	80
6.1.3 Encuesta.....	84
6.2 Prueba Proceso de Adaptación	85
6.2.1 Resultado	85
7 Conclusiones.....	86
Referencias.....	88
Apéndices.....	90

Lista de Tablas

Tabla 1 Abreviaturas de las medidas antropométricas del rostro	24
Tabla 2 Medidas fundamentales del rostro relacionados con los marcos	25
Tabla 3 Malformaciones y deformaciones de la sección media del rostro	28
Tabla 4 Benchmarking.....	31
Tabla 5 Variaciones anatómicas y anomalías faciales consideradas para la adaptación de los marcos	37
Tabla 6 Aspectos de la geometría de los marcos a modificar según los parámetros escogidos ...	42
Tabla 7 Descripción y ejemplos de las variables modificadoras del frente del marco	48
Tabla 8 Procedimiento de programación. Varillas	50
Tabla 9 Ejemplos de las variables modificadoras de las varillas.....	52
Tabla 10 Propiedades mecánicas del filamento PLA (Ácido poliláctico)	57
Tabla 11 Proceso de simulación por elementos finitos aplicando una fuerza de 10 Newton [N]	59
Tabla 12 Proceso de simulación por elementos finitos aplicando una fuerza de 1.75 Newton [N]	60
Tabla 13 Proceso de preparación de la malla registrada utilizando Geomagic	65
Tabla 14 Descripción etapas del proceso de manufactura digital propuesto	71
Tabla 15 Etapa uno del proceso de manufactura digital para el voluntario 1	73
Tabla 16 Etapa uno del proceso de manufactura digital para el voluntario 2.....	75
Tabla 17 Etapa uno del proceso de manufactura digital para el voluntario 3.....	76
Tabla 18 Etapa uno del proceso de manufactura digital para el voluntario 4.....	77
Tabla 19 Etapa uno del proceso de manufactura digital para el voluntario 5.....	79
Tabla 20 Tiempo de impresión de los marcos adaptados para los voluntario 1 a 5	80
Tabla 21 Resultados encuesta realizada a voluntarios durante la comprobación física del marco	84
Tabla 22 Resultados prueba del proceso de adaptación de los marcos.....	85

Lista de Figuras

Figura 1. Visualización de los componentes de Grasshopper.....	19
Figura 2. Puntos característicos para estudio antropométrico vista frontal.	23
Figura 3. Puntos característicos para estudio antropométrico vista lateral.	23
Figura 4. Esquema medidas y puntos del rostro relacionados con los marcos	24
Figura 5. Morfología nasal.....	27
Figura 6. Tallas de los marcos comerciales	30
Figura 7. Partes de los marcos.....	30
Figura 8.Ángulo panorámico de las gafas, vista superior.	31
Figura 9. Ángulo pantoscópico (figura de la izquierda), ángulo de talón $\leq 95^\circ$ (figura de la derecha).	31
Figura 10. Parámetros faciales escogidos para el diseño.	40
Figura 11. Parámetros optométricos escogidos para el diseño.	41
Figura 12. Esquema conceptual de programación en Grasshopper, frente.....	43
Figura 13. Vista general explicada de la programación en Grasshopper, frente.	44
Figura 14. Puntos que describen contorno externo de marco.	45
Figura 15. Relaciones de posición que describe el contorno externo de marco.	45
Figura 16. Superficie generada por curvas y ángulo panorámico del marco.....	46
Figura 17. Grosor del marco de las gafas.	46
Figura 18. Puntos que describen la sustracción para los lentes.	47
Figura 19. Riel de posicionamiento de lentes.	47
Figura 20.Posicionamiento de plaquetas.....	48
Figura 21. Esquema conceptual de programación en Grasshopper, varillas.	49
Figura 22. Vista general de programación en Grasshopper, varillas.	50
Figura 23. Parámetros empleados para creación de las varillas de las gafas.	51
Figura 24. Primera impresión y montaje de lentes, frente de las gafas.	53
Figura 25. Varilla impresa de forma individual, ruptura.	53
Figura 26. Comparación grosor inicial y final de varilla.	54
Figura 27. Ensamble con cola de milano como principio de unión.....	54
Figura 28. Pruebas de impresión unión cola de milano.	55
Figura 29. Diseño de bisagras sobre el frente de las gafas y varilla, vista en perspectiva y lateral.	56
Figura 30. Modelo final ensamblado.	56
Figura 31. A) Inclusión de lentes en modelo creado b) puntos de apoyo de gafas, simulación. ..	58
Figura 32. Factor de seguridad calculado (10 [N]), simulación.	60
Figura 33. Factor de seguridad calculado (1.75 [N]), simulación.	62
Figura 34. Proceso de toma de datos de un usuario en orden desde la izq. Toma de datos: con calibrador, Go! Scan, Sens y Kinect. Adaptado de Calderon, Camargo, y Lopez (2017).	63
Figura 35. Valores preestablecido de VXelements para la toma de datos.....	64
Figura 36. Ubicación de los targets para la toma de datos.....	65
Figura 37. Proceso general de la personalización de marcos.....	67
Figura 38. Proceso de escaneo del modelo de referencia.	68

Figura 39. Proceso de preparación de la malla para la adaptación de marco.	68
Figura 40. Proceso de adaptación de los marcos al modelo de referencia digital.	69
Figura 41. Proceso de manufactura digital.	71
Figura 42. Verificación física voluntario 1.	81
Figura 43. Verificación física voluntario 2.	82
Figura 44. Verificación física voluntario 3.	82
Figura 45. Imágenes comparativas verificación física voluntario 4.	83
Figura 46. Verificación física voluntario 5.	84

Lista de Apéndices

Apéndice A. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 6	90
Apéndice B. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 7.....	90
Apéndice C. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 8.....	91
Apéndice D. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 9	92
Apéndice E. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 10.....	93
Apéndice F. Valores parámetros de los marcos adaptados de todos los voluntarios.....	94
Apéndice G. Manual para las pruebas del proceso de adaptación.....	94
Apéndice H. Encuesta aplicada durante la verificación física del marco.	100
Apéndice I. Encuesta realizada a voluntarios de la prueba de adaptación.....	101
Apéndice J. Pruebas de impresión en estereolitografía	103

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE MARCOS DE LENTES PERSONALIZABLES POR MEDIO DE TECNOLOGÍAS DE RECONSTRUCCIÓN FACIAL 3D*

AUTOR: NATALIA MARLEN CARRILLO QUINTERO**

PALABRAS CALVE: DISEÑO POR ALGORITMOS, MONTURAS PERSONALIZADAS, RECONSTRUCCIÓN FACIAL, GAFAS A MEDIDA

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado surge como respuesta a la necesidad de ciertos grupos poblacionales frente a la escasas de alternativas la hora de adquirir marcos para lentes que se adapten correctamente a su anatomía facial, ya que el uso de marcos inadecuados puede llegar a generar incomodidades, disminución del campo visual, laceraciones y posibles deformaciones del rostro.

Por lo anteriormente mencionado el proyecto tiene como propósito desarrollar un modelo para la personalización de marcos para lentes, empleando para su diseño el software CAD Rhinoceros y su herramientas de modelado paramétrico Grasshopper; también se emplean métodos de ingeniería inversa aplicados a reconstrucción facial para la captura de la imagen de referencia del paciente y se implementa la tecnología de prototipado rápido para realizar la materialización de los marcos adaptados.

Con la implementación de estas tecnologías, fue posible generar un modelo de marcos para lentes ajustables a la geometría específica del rostro de cualquier usuario y se logró determinar por medio de experimentación y un análisis básico de elementos finitos que las cualidades del producto final generado a partir de prototipado rápido en PLA los hace aptos para el uso con lentes; adicionalmente se realizó la verificación de los marcos con los voluntario para determinar el nivel de mejora que experimentaron al momento del uso de un marco personalizado.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Diseño Industrial. Directora: Ph.D(c). MSc. D.I Clara Isabel López Gualdrón. Codirector: Ph.D(c). MSc. D.I Luis Eduardo Bautista

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF CUSTOMIZABLE GLASSES FRAME USING 3D FACIAL RECONSTRUCTION TECHNOLOGIES*.

AUTHOR: NATALIA MARLEN CARRILLO QUINTERO**.

KEYWORDS: ALGORITHMIC DESIGN, CUSTOMIZABLE GLASSES FRAME, FACIAL RECONSTRUCTION, CUSTOMIZED GLASSES.

DESCRIPTION:

The present grade work appear in response to the need of certain population groups due to the shortage of alternatives at the time of acquiring glasses frames that adapt correctly to their facial anatomy, taking into account that the use of inadequate frames could generate discomfort, decreased visual field, lacerations and possible deformations of the face.

Therefore, the purpose of the project is to develop a model that allows the customization of glasses frames using as a tool the 3D software Rhinoceros and the parametric modeling plug-in Grasshopper. Reverse engineering methods applied to facial reconstruction are also used to capture the patient's reference image and 3D printing technology is implemented to realize the materialization of the adapted frames.

With the implementation of these technologies was possible to generate a model of frames that adapt to the specific geometry of the face of any user. By the use of experimentation and a basic analysis of finite elements, was possible to determine that the qualities of the final product generated from 3D printing in PLA makes them suitable for use with lenses. Additionally, the verification of the frames was carried out with volunteers to determine the level of improvement they experienced with the use of a custom glasses frame.

* Thesis Work

** Faculty of Physical-Mechanics Engineering. School of Industrial Design. Thesis Director: Ph.D(c). MSc. D.I Clara Isabel López Gualdrón. Thesis Codirector: Ph.D(c). MSc. D.I Luis Eduardo Bautista.

Introducción

Según cifras de la OMS (2018) en el mundo hay aproximadamente 217 millones de personas con baja visión de las cuales el 53% de estas son causadas por problemas de refracción como miopía, astigmatismo e hipermetropía, enfermedades corregibles por medio del uso de gafas. No obstante las gafas en la actualidad no se perciben únicamente como elementos correctivos, se han convertido en un importante accesorio facial, un elemento estético, con el cual se expresa la individualidad y personalidad incluso en personas que no presentan ningún problema visual (Huang, Yang, & Chu, 2012).

Es por lo anteriormente mencionado que la demanda de gafas es particularmente alta y variada, a esta necesidad responden unas pocas empresas principalmente europeas que poseen el control de la industria, dichas empresas emplean métodos de diseño enmarcados en la producción masiva, los cuales buscan ofrecer estéticas, precios y funciones diversas en sus productos, esta diversidad se consigue a través de las diferentes marcas pertenecientes a una misma compañía, cada una de las marcas posee un perfil de usuario fuertemente definido para el cual se diseña, estos diseños están restringidos por requerimientos y necesidades basadas en el perfil del usuario como la edad, estrato social, actividades del usuario, entre otros.

Este concepto de producción masiva ha cambiado, nos encontramos en una nueva era de producción donde los consumidores son más demandantes, esperan mayor variedad, tienen mayor poder de decisión al momento de escoger los productos y esperan una alta velocidad de adquisición (Fralix, 2001). La industria óptica se ha venido adaptando a la personalización masiva ofreciendo a sus compradores gran variedad de opciones en su productos y la posibilidad de personalizar ciertos atributos para lograr una aceptación total del aspecto estético de las gafas por parte del comprador; un claro ejemplo de esto se encuentra en la compañía **Ray-Ban®**, que ofrece a sus

clientes la posibilidad de escoger el color del marco, el material en el cual está hecho, el tamaño (entre dos tallas) y se ofrece también la posibilidad de realizar un grabado de una palabra o frase en la varilla.

Sin embargo esta personalización ofrecida por las grandes ópticas no solventa uno de los mayores problemas de los usuarios de gafas, el cual es encontrar un marco que se adapte a sus necesidades físicas. En el mercado cada modelo de montura posee dimensiones únicas o en dado caso dos tallas (Martínez, et al., 2013), esto hace que la selección de monturas sea tediosa y compleja, ya que muchos modelos que cumplen con los requerimientos estéticos del usuario no se adaptan a su rostro, siendo descartadas o en ciertos casos adquiridas y generando incomodidades o laceraciones al rostro de la persona al momento del uso. Esta problemática se debe a la gran cantidad de variables anatómicas que definen la estructura del rostro humano, pues cada rostro es diferente y sus proporciones cambian dependiendo de la raza, la edad, el género, la altura y las anomalías faciales que puedan presentarse en las personas como son las malformaciones o deformaciones. Sin embargo las proporciones de los marcos en el mercado actual están concebidos principalmente para personas con rasgos caucásicos, pues las empresas que las fabrican son en su mayoría europeas y no contemplan en su diseño (pues son estandarizados) las posibles anomalías faciales que puedan entorpecer el uso adecuado de las gafas o en ocasiones imposibilitarlo por completo.

Es de vital importancia tener en cuenta la anatomía del usuario al momento de diseñar una montura para lentes, pues es un elemento correctivo de uso personal que estará en contacto directo con el usuario durante periodos prolongados de tiempo. Es necesario buscar una estrategia que permita personalizar los marcos de lentes a la anatomía específica de cada usuario.

De esta forma satisfacer necesidades puntuales a grupos específicos de personas, a través del diseño, es un proceso que requiere un análisis más profundo, dado que no es posible estipular

patrones generalizados, estandarizar o categorizar utilizando métodos convencionales (Caladerón, Camargo, & Lopez, 2017). En las últimas décadas los procesos de innovación en la industria han abierto el camino para proporcionar soluciones a grupos específicos de usuarios que presentan inconformidades ya que los diseños no se ajustan a sus necesidades. Dentro de estos procesos de innovación se encuentra el proceso de desarrollo de nuevos productos conocido como New Product Development (NPD) y uno de sus enfoques busca generar soluciones orientadas a la personalización para poblaciones en particular o usuarios con necesidades específicas, esto se logra a través de procesos que buscan abarcar y dar solución a la mayor cantidad de necesidades posibles de dichos grupo o usuarios (Bai, Feng, Yue, & Feng, 2017), dicho esto, para atacar esta problemática la concepción de estos productos requiere la implementación de técnicas y tecnologías que ayuden a dar una solución óptima generando nuevos procesos.

En este orden de ideas la personalización de los marcos se plantea lograr empleando tres técnicas y tecnologías no convencionales en esta área del diseño, las cuales son: la ingeniería inversa, la cual utiliza sistemas de adquisición de imágenes tridimensionales como el escáner 3D, los sistemas CAD para el desarrollo y concepción del diseño, y el prototipado rápido para la visualización y manufactura del elemento final; de esta forma se busca abarcar las necesidades específicas de cada usuario al momento de adquirir un marco para lentes y hacerlo de una forma precisa y rápida.

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un modelo de diseño paramétrico de monturas para lentes, basado en la anatomía facial del usuario, la cual se registra por medio de tecnologías de escaneo 3D, logrando así generar un modelo de gafas que se adapte con un alto grado de precisión a las medidas del rostro del usuario, generando un elemento estético, funcional y comfortable.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Crear un modelo de parametrización digital 3D de monturas para lentes utilizando métodos de ingeniería inversa aplicada a reconstrucción facial, logrando así que las monturas se adapten a la geometría específica del rostro del usuario.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar las geometrías y puntos específicos del rostro pertinentes para la creación y estructuración de las monturas.
- Proponer un modelo paramétrico que facilite el ajuste de las medidas de las monturas con las medidas tomadas del rostro del usuario empleando tecnologías de reconstrucción 3D.
- Evaluar el modelo propuesto por medio de estudios de caso.

2 Marco Teórico

2.1 Diseño paramétrico

También conocido como diseño por algoritmos o modelado paramétrico. Es un diseño asistido por computadora basado en algoritmos, es decir, un conjunto ordenado y finito de operaciones que permiten hallar la solución a un problema (Pérez, 2015).

La intención del diseño generativo es descubrir las relaciones y reglas, que rigen, los objetos concebidos a través de un proceso de diseño y establecer estas reglas como un algoritmo de diseño que sea capaz de generar productos de diseño (Khabazi, 2012). Un algoritmo toma información, procesa los datos de una forma ordenada y genera un resultado, por tanto para configurar un algoritmo de diseño el primer paso es proveer los datos requeridos en un lenguaje comprensible para un computador, dichos datos se entienden como un parámetro, estos parámetros pueden ser números, geometrías, textos o imágenes.

2.1.1 Grasshopper

David Rutten es el creador de esta herramienta de diseño con algoritmos:

“Para los diseñadores que están explorando nuevas formas utilizando algoritmos generativos, Grasshopper® es un editor de algoritmos gráficos estrechamente integrado con las herramientas de modelado 3D de Rhino” (Davidson , 2013).

Grasshopper es una herramienta ampliamente utilizada por poseer un lenguaje de programación gráfico, esto quiere decir que los usuarios no necesitan conocimiento previo de programación con código o script (National Instruments Corporation, 2018).

Los programas o definiciones generadas con Grasshopper se crean arrastrando los componentes (nodos), representados por cajas, en el área de trabajo, estos componentes tienen salidas y entradas,

las cuales se deben alimentar y conectar por medio de cables, esto hace que la principal herramienta para programar sea el mouse. Estos componentes o cajas se conectan en el orden en el cual se desea que la tarea sea desarrollada y se obtenga el resultado, por tanto el diseño con grasshopper se crea por múltiples componentes que están conectados de forma lógica (Khabazi, 2012).

2.1.1.1 Objetos de Grasshopper

Las definiciones de Grasshopper están compuestas de forma básica por dos clases de objetos: parámetros y componentes.

Los parámetros contienen datos, es decir almacenan información, los componentes contienen acciones, es decir realizan tareas.

- Componentes

Un componente se puede interpretar como una de las herramientas de Rhinoceros, es la acción o el proceso que se va a llevar a cabo, como por ejemplo, crear un punto, una línea, extrudir una superficie, etc. Para que un componente funcione es necesario alimentar los datos que necesite este componente, darle la información básica para que pueda realizar su acción; es por esto que los componentes tienen una serie de parámetros intrínsecos llamados input y output o parámetros de entrada y salida (Payne & Issa, 2009). Como se muestra en la figura 1

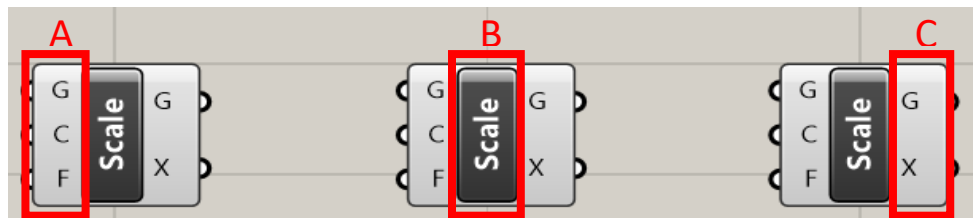


Figura 1. Visualización de los componentes de Grasshopper.

- A) En esta zona se ubican los tres parámetros de entrada del componente escalar, los nombres de los parámetros se muestran con la primera letra.
 - B) En esta sección se muestra el nombre del componente abreviado, también se puede visualizar como la imagen asociada al componente o se puede modificar a gusto el nombre del componente.
 - C) En esta zona se ubican los 2 parámetros de salida del componente escalar.
- Parámetros: Tipos de datos

En Grasshopper los parámetros se utilizan para almacenar información necesaria para realizar la tarea deseada, la mayoría de ellos pueden almacenar dos tipos de datos, los cuales son: datos volátiles y datos persistente (Payne & Issa, 2009). Los datos volátiles se alimentan de una o más fuentes, y son redefinidos al momento de generarse una nueva solución en el algoritmo, por otro lado los parámetros persistentes son valores que han sido especificados por el usuario.

Con la asesoría de la empresa jade3D en la capacitación del uso del software de modelado 3D Rhinoceros se consiguió adquirir las bases de conocimiento para el uso de la herramienta Grasshopper y de esta manera desarrollar el diseño por algoritmos del marco de lentes con las variables necesarias para la adecuación en el rostro.

2.2 Ingeniería inversa

La ingeniería inversa es una metodología que busca obtener información de un objeto, como características, propiedades o funciones; esto se logra generando un modelo de referencia a través de la captura de formas, componentes y superficies de dicho objeto (SOMIM, 2008).

Este proceso de captura en la ingeniería inversa se conoce como digitalización 3D y al procesamiento de estos datos se le conoce como reconstrucción de superficies; la reconstrucción

toma la información 3D y por medio de herramientas CAD se genera un modelo computacional que puede ser manipulado (Betancour, 2011). Esta posibilidad de manipulación del elemento tiene como finalidad la obtención de componentes formales, la modificación o la replicación del objeto de estudio.

2.2.1 Escáner 3D

Los escáneres 3D son herramientas que se han desarrollado para facilitar el proceso de ingeniería inversa al captar la información necesaria y traducirla en una malla editable de una forma rápida y fácil. De acuerdo a su grado de precisión el escáner 3D permiten captar las geometrías de productos que poseen formas, perfiles o contornos complejos, como piezas mecánicas, moldes, objetos ergonómicos o estéticos y formas aerodinámicas. También son utilizados para capturar objetos orgánicos.

Los sistemas de escaneo actual más precisos son los escáneres sin contacto, que funcionan por medio de triangulación, estos son utilizados para impresión 3D ya que generan una nube de puntos que puede ser fácilmente traducida en una malla y modificada por medio de herramientas CAD.

Actualmente la escuela de Diseño Industrial de la Universidad Industrial de Santander, cuenta con tres herramientas de escaneo 3D de captura por nube de puntos, los cuales hacen parte del laboratorio de tecnologías:

- Sense 3D Scanner
- Go! SCAN 3D
- Kinect 3D Scanner

2.3 Impresión 3D

La impresión 3D o manufactura por adición es el proceso de crear un objeto empleando capas de material, estas capas se ubican utilizando como referencia un modelo digital, por ende para llegar a generar un objeto físico empleando esta tecnología es necesario que el software, el hardware y el material trabajen en conjunto (Autodesk Inc, 2018). Existen tres tecnologías comunes para la impresión:

- Fabricación con filamento fundido (FFF) o modelado por deposición fundida (MDF), este método emplea filamento plástico el cual es calentado y extruido para formar las capas, este método es el más común y económico del mercado.
- Estereolitografía (SLA) este método emplea resina fotosensible la cual es curada o endurecida utilizando luz UV para formar las capas, este método posee una alta resolución pero se hace más costoso por la resina.
- Sinterizado selectivo por láser (SLS) este es un método muy común en manufactura industrial ya que emplea material pulverizado, que puede ser plástico, metálico o cerámico, el material se fusiona empleando un láser y así crear las capas, esta es la tecnología más costosa.
- La escuela de diseño industrial UIS cuenta con las tres tecnologías anteriormente mencionadas, las cuales se encuentran en el laboratorio de tecnologías 3D.

2.4 Rostro humano

El rostro humano posee diversos puntos que se usan para su caracterización, estos puntos internos y externos describen la estructura general del rostro humano (Prieto, 2008).

Visto de frente los puntos característicos para el estudio antropométrico son: Eurión (eu), Cigión (zy), Nasión (n), Gnatión (gn), Subnasal (sn), Alar (al), Queilión (ch), Estomión (sto), Endocanto (en), Exocanto (ex), Labiale Superius (ls) y Labiale Inferius (li); ver figura 2.

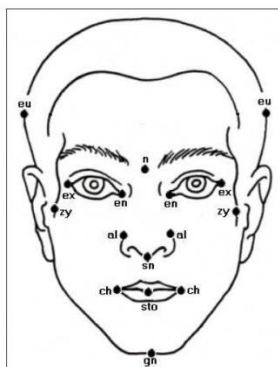


Figura 2. Puntos característicos para estudio antropométrico vista frontal. Adaptado de Prieto (2008).

En la vista lateral los puntos son: Glabela (g), Opistocráneo (op), Vértex (v), Preaural (pra), Postaural (pa), Supraauricular (sa), Subauricular (sba), Punta Nasal (prn), Sellión (m) y Pogonión (pg); ver figura 3.

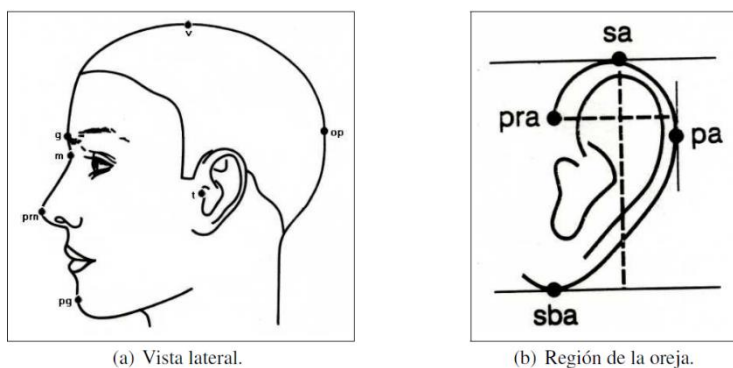


Figura 3. Puntos característicos para estudio antropométrico vista lateral. Tomado de Prieto (2008).

En la tabla 1 se definen los nombres de las abreviaturas de los puntos característicos del rostro para el estudio antropométrico utilizados en las figuras 2 y 3.

Tabla 1
Abreviaturas de las medidas antropométricas del rostro

Región	Nombre de la medida y abreviatura
Cabeza	Anchura de la cabeza (eu-eu), longitud de la cabeza (g-op), altura de la cabeza (v-n)
Cara	Anchura facial (zy-zy), altura facial (n-gn)
Ojos	Anchura interocular (en-en), anchura biocular (ex-ex), longitud de las fisuras palpebrales derecha e izquierda (ex-en).
Nariz	Anchura de la nariz (al-al), altura de la nariz (n-sn), protrusión de la punta nasal (sn-prn).
Labios y boca	Altura del labio superior (ls-sto), altura del labio inferior (sto-il), anchura de la boca (ch-ch).
Orejas	Anchura de las orejas izquierda y derecha (para-para), longitud de las orejas izquierda y derecha (sa-sba)

2.4.1 Relación marco-rostro

Para esta relación se evalúa un esquema del rostro humano el cual busca unificar y estandarizar las medidas faciales asociadas con los marcos (Caum Aregay, et al., 2000). El esquema facial se obtiene al adaptar el plano de la montura sobre el rostro, es decir, se adquieren las medidas y los puntos del rostro pertinentes para el diseño y adaptación de una montura nueva; ver figura 4.

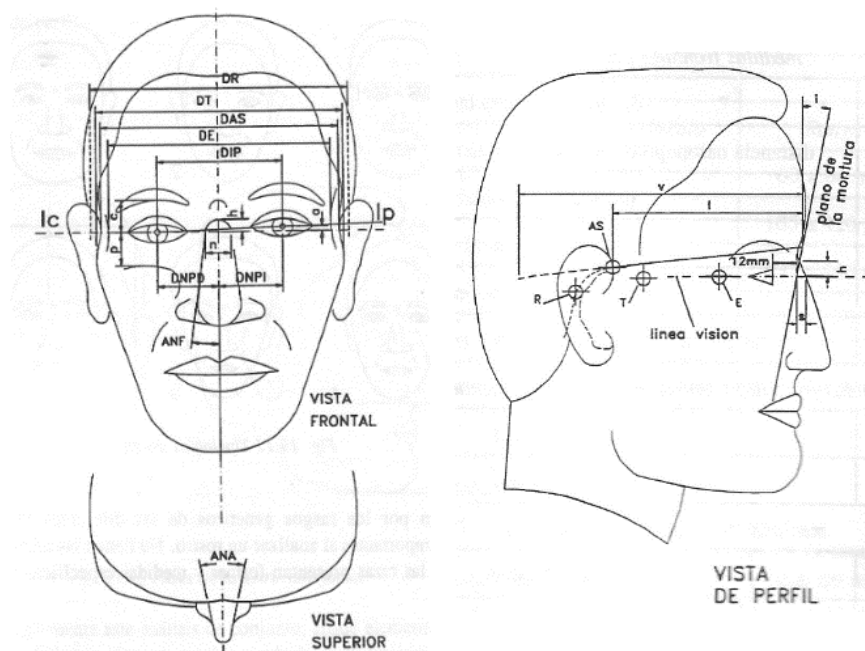


Figura 4. Esquema medidas y puntos del rostro relacionados con los marcos. Fuente: Caum Aregay, et al. (2000).

En la tabla 2 se registra los nombres de las abreviaturas utilizadas en la figura 3 para describir las medidas y puntos del rostro relacionados con los marcos.

Tabla 2

Medidas fundamentales del rostro relacionados con los marcos

Medidas frontales principales	
DIP	distancia interpupilar
DNP	distancia nasopupilar (derecha e izquierda, DNPD y DNPI)
DE	distancia esfenoidal
DT	distancia temporal
DAS	distancia auricular superior
ANF	ángulo nasal frontal (derecho e izquierdo, D/I)
Medidas frontales relativas al plano de la montura	
n	ancho nasal
h	altura nasal
Medidas frontales complementarias	
LP	línea pupilar
LC	línea de cantus
a	altura de la pupila (derecha e izquierda (D/I)
c	altura de cejas (derecha e izquierda (D/I)
p	altura de pómulos, negativa (derecha e izquierda (D/I)
DR	distancia entre peñascos
ANA	ángulo nasal de apertura o de ataque (derecho e izquierdo D/I)
Medidas de perfil	
i	ángulo de inclinación del plano de la montura
s	saliente nasal
l	longitud de la varilla
v	longitud total de la varilla (nominal)
R	Punto de peñasco
AS	Punto auricular superior
T	Apófisis temporal

2.5 Variaciones anatómicas de la sección media del rostro

2.5.1 Ojos

El tamaño, la profundidad y la forma de las cavidades orbitales determinan la conformación ósea de la región ocular. Así, los mongoloides con pómulos sobresalientes poseen órbitas altas, acompañadas de una gran anchura facial. Los australianos y en general los negroides poseen la menor altura orbital influidas por un fuerte desarrollo de los arcos superciliares y un descenso suave en la raíz nasal.

En lo que respecta al espacio inter-orbital o ángulo ocular, los caucasoides poseen las menores distancias, 15-26 mm, seguidos por los mongoloides y finalmente los negroides con distancias de 22- 26 mm. En todos los grupos étnicos las mujeres presentan distancias menores que los hombres (Cuenca, 2004), estas medidas se interpretan en el ancho de la raíz de la nariz.

2.5.2 Nariz

La morfología nasal, como se muestra en la figura 5, es muy variable y obedece a factores ontogénicos, sexuales y poblacionales, el aspecto formal de la nariz se compone de raíz, perfil del dorso, punta y orificios nasales.

- Las raíces en mongoloides sobresalen muy poco, en negroides son deprimidas y en caucasoides sobresalen, especialmente en mediterráneos.
- El perfil del dorso puede ser: cóncavo, recto, convexo o sinuoso

- La forma de la base nasal las narices sobresalientes son características de los caucasoides, los mongoloides presentan narices pequeñas y los negriodes aplastadas.

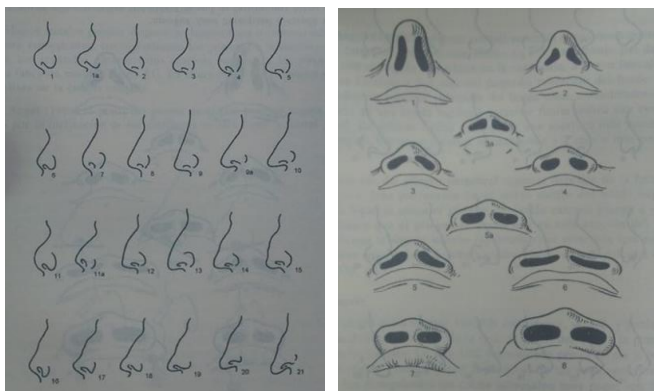


Figura 5. Morfología nasal. Adaptado de Cuenca (2004).

2.6 Anomalías faciales

Las anomalías craneofaciales ("CFA", por sus siglas en inglés) son un conjunto de diversas deformidades y malformaciones que se presentan en el desarrollo de los huesos faciales y de la cabeza. El término médico anomalía significa "irregularidad" o "diferente de lo normal" (Stanford Children's Health, 2018).

- Malformación: anomalía *intrínseca* en la morfología de un órgano, parte del mismo, o de una estructura anatómica, producida por un desarrollo anormal del mismo. Suele producirse durante las primeras 8 semanas de vida intrauterina (organogénesis) y la mayoría es de causa genética. Ejemplos: labio leporino (Ramos Fuentes, Ramos Cáceres, & Ribate Molina, 2014).
- Deformación: anomalía en la forma o posición de un órgano, parte del mismo, o de una estructura anatómica normalmente formada, producida por una causa mecánica (extrínseca) que actúa de forma prolongada tras finalizar el periodo de organogénesis

embrionaria. En los casos pertinentes, la mayoría son susceptibles de corrección con medidas ortopédicas. Ejemplo: plagiocefalia (Ramos Fuentes et al., 2014).

2.6.1 Asimetría facial

Los humanos presentan variaciones bilaterales tanto funcionales como morfológicas dado que en la naturaleza no existe una simetría bilateral perfecta; la asimetría facial en un bajo grado es una característica identificadora y se observa comúnmente en toda la población. No obstante en ciertos individuos se puede presentar una variación clínicamente significativa de las dos mitades del rostro que puede generar preocupación al individuo y a su vez puede ser cuantificada por un médico (Srivastava, et al., 2017).


Esta asimetría puede incidir en mayor o menor grado en:

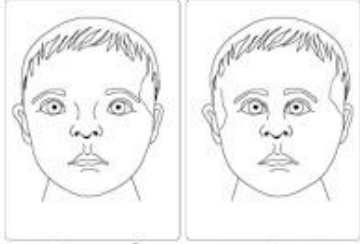


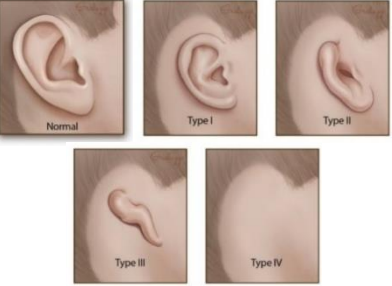
- Orejas: Tamaño y posicionamiento, la distancia con respecto al plano frontal del rostro y la altura con respecto al plano horizontal del rostro.
- Ojos: tamaño, distancia horizontal y altura de las cuencas oculares.
- Nariz: prominencia y amplitud de las fosas nasales.

En la tabla 3 se describen otros tipos de malformaciones y deformaciones que afectan la sección media del rostro

Tabla 3

Malformaciones y deformaciones de la sección media del rostro

MALFORMACIONES Y DEFOMACIONES	DESCRIPCIÓN	TIPOLOGÍA
Hipertelorismo ocular Ramos Fuentes et al. (2014)	Malformación: es un incremento de la distancia inter orbital o distancia entre las pupilas	

<p>Hipotelorismo ocular Fuente: http://meucraniobaby.blogspot.com/2015/10/hipotelorismo.html</p>	<p>Malformación: al contrario del hipertelorismo es una disminución del espacio interorbital.</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Normal</i> <i>Hipotelorismo</i></p>
<p>Displasia forntonasal adaptado de Carlson (2000)</p>	<p>Malformación: produce un puente nasal muy ancho por exceso de tejido y por ende un hipertelorismo ocular marcado, en casos graves se puede presentar una separación de las dos narinas (CARLSON, 2000)</p>	
<p>Desviación del tabique nasal Fuente: http://dermaplastica.wixsite.com/dermayplastica/single-post/2017/04/05/Desviaci%C3%B3n-del-tabique-nasal</p>	<p>Deformación: se produce por compresiones en el rostro del feto durante su gestación, también se puede generar por golpes y fracturas durante el crecimiento de la persona</p>	
<p>Microtia Fuente: https://med.stanford.edu/ohns/healthcare/earinstitute/health-info/conditions/microtia.html</p>	<p>Malformación: se produce por un desarrollo incompleto del cartílago de las orejas, dándole a estas tamaños reducidos y formas variadas, en los casos más severos se evidencia un pequeño trozo de cartílago cubierto de piel que indica el inicio del conducto auditivo interno, la microtia puede ser tanto unilateral como bilateral.</p>	

2.7 Partes y tamaños de las gafas

Tallas: Las medidas que varían dependiendo de la talla son la longitud de las varillas, el ancho del puente y el calibre; en dichas tallas se aumentan o se disminuyen estas tres medidas conjuntamente ver figura 6.

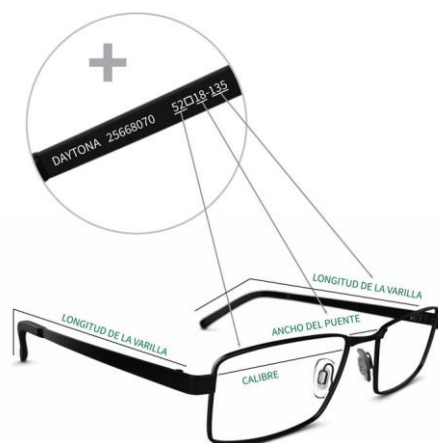


Figura 6. Tallas de los marcos comerciales. Fuente: <https://www.specsavers.es/gafas/guia-del-comprador/tamano-de-la-montura>.

En la figura 7 se muestran las partes que componen el marco

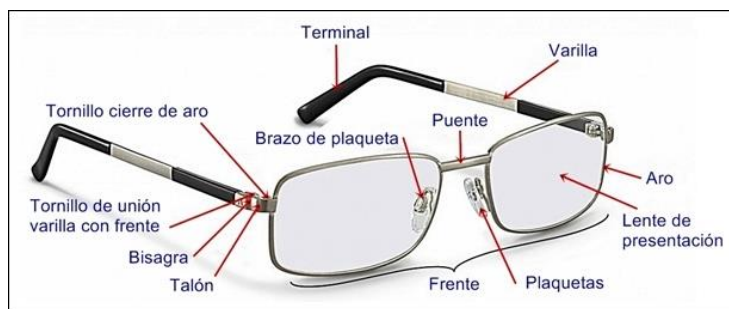


Figura 7. Partes de los marcos. Adaptado de <https://histoptica.com/apuntes-de-optica/monturas/introduccion-a-las-monturas/fases-y-procesos/>.

Dentro de los atributos funcionales de las gafas se encuentran el ángulo panorámico, el ángulo pantoscópico y el ángulo del talón, los cuales se muestran en las figuras 8 y 9.

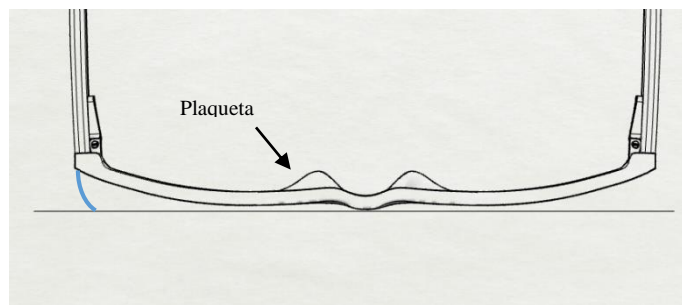


Figura 8. Ángulo panorámico de las gafas, vista superior.

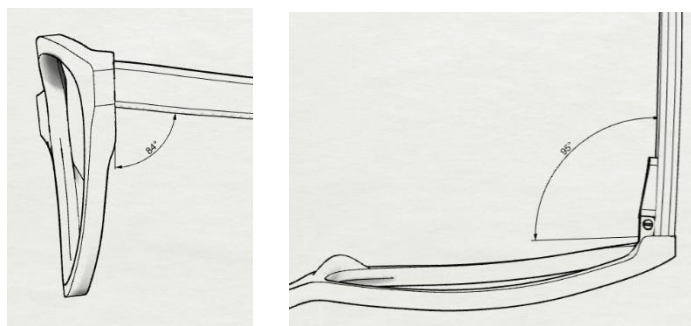


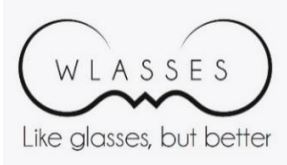
Figura 9. Ángulo pantoscópico (figura de la izquierda), ángulo de talón $\leq 95^\circ$ (figura de la derecha).

2.8 Benchmarking

A nivel global algunas empresas se han propuesto implementar tecnologías de escaneo y prototipado 3D en el diseño y concepción de las monturas para lentes, ver tabla 4.

Tabla 4
Benchmarking

Empresa	Propietarios y región	Medidas del marco	Registro del paciente	manufactura	precio
MADE 4U CONCEPT	Europa	Adaptación Al rostro	fotogrametría	Sinterizado Por laser	
MIMIC EYEWEAR	Óptica 2000 España	Adaptación al rostro	fotogrametría	Sinterizado Por laser	339 €

	Alberto Hernández Fernando César España	tallas	Sinterizado Por laser	179 €
---	---	--------	--------------------------	-------

- **MADE4U**

El IBV (instituto biomédico de valencia) junto con 13 socios de ocho países europeos desarrolló el proyecto made4u se trata de gafas completamente personalizadas, el sistema de escaneo facial esa basados en técnicas de fotogrametría y visión artificial, desarrollo de técnicas de fabricación rápida, entorno de codiseño para que el usuario modifique a gusto los marcos y un probador virtual, el sistema fue probado y acogido con éxito en Portugal y Francia.

- **Wlasses 2016**

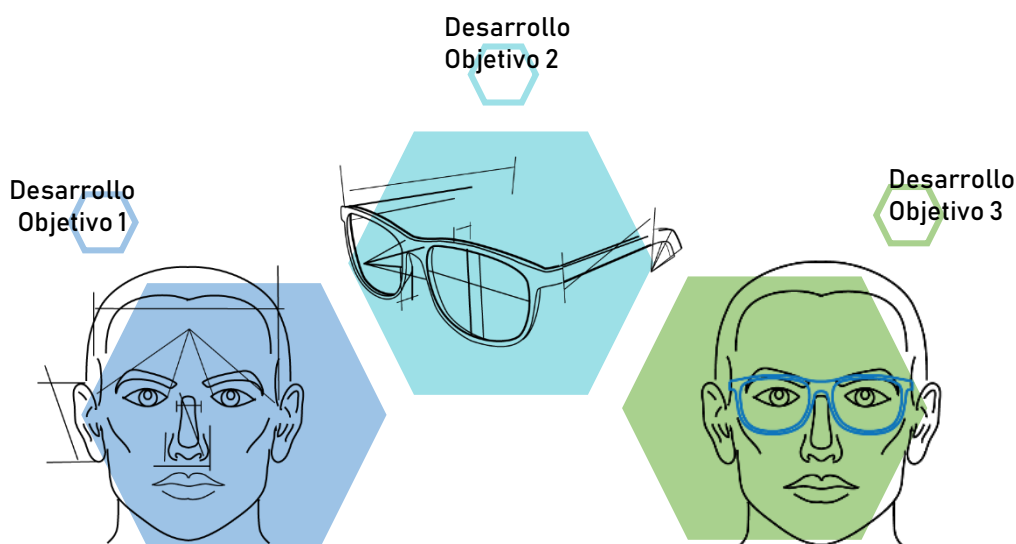
Es una marca española creada por los jóvenes Alberto Hernández y Fernando César. Wlasses se caracteriza por ofrecer un catálogo de gafas diseñadas por completo por sus creadores y sus partes se imprimen en una prototipadora 3D utilizando nylon como materia prima, la impresión se realiza en estados unidos y el ensamblaje de forma artesanal en España, la marca maneja tres tallas de monturas. El costo individual es de 179 euros.

- **Mimic eyewear 2017**

Óptica 2000; reconocida óptica española lanzó al mercado su nueva línea mimic eyewear, gafas hechas a medida mediante escaneo facial por fotogrametría y utilizando la impresión 3D para su materialización, se adapta el marco de las gafas sobre el modelo tridimensional del rostro del cliente. El costo de las monturas es de 339 euros.

3 Metodología

Las técnicas empleadas en el desarrollo de este proyecto están basadas en métodos de indagación, inspección, evaluación y diseño bajo el enfoque de manufactura digital. La metodología que se siguió para el desarrollo del proyecto se plantea mediante el cumplimiento de cada uno de los tres objetivos específicos definidos para el proyecto, siguiendo una línea lógica de análisis y resultados. A continuación se enuncian los procedimientos utilizados para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos específicos.



3.1 Desarrollo objetivo 1

Determinar las geometrías y puntos específicos del rostro pertinentes para la creación y estructuración de las monturas.

Para cumplir con este objetivo se utilizaron las siguientes técnicas de recopilación de datos a fin de conocer mejor el rostro humano y su relación con las monturas de lentes.

- Análisis de fuentes literarias
- Investigación de fuentes por internet

- Entrevista a expertos (contactos directos)

Se determinaron cuatro campos de investigación a definir:

- Antropometría facial
- Variaciones anatómicas de la sección media del rostro (ojos nariz y orejas)
- Malformaciones o anomalías faciales relacionadas con la sección media del rostro
- Estructuración y diseño de monturas para lentes

A partir de esta información se determinan las medidas faciales más relevantes para una acertada adaptación de los marcos al rostro de cualquier usuario.

3.2 Desarrollo objetivo 2

Proponer un modelo paramétrico que facilite el ajuste de las medidas de las monturas con las medidas tomadas del rostro del usuario empleando tecnologías de reconstrucción 3D.

Para el cumplimiento de este objetivo se dividió en tres fases el desarrollo de este.

3.2.1 Fase 1: desarrollar el algoritmo de diseño paramétrico

Empleando el lenguaje de programación visual grasshopper se busca establecer el algoritmo de diseño basado en los parámetros previamente definidos para la adaptación de los marcos al rostro.

3.2.2 Fase 2: Impresión 3D

Se definirán las especificaciones técnicas del producto críticas para el desarrollo del mismo, como la articulación del marco y la sujeción del lente con el marco, se obtendrá la información de la resistencia del producto a través de simulación estática por elementos finitos en impresión 3D en PLA.

3.2.3 Fase 3: selección de la tecnología de escaneo

Con base en un experimento previamente realizado por el semillero de interfaz se estudiaron los resultados con el fin de determinar si es posible seleccionar una tecnología low cost para la toma de datos.

3.3 Desarrollo objetivo 3

Evaluar el modelo propuesto por medio de casos de estudio.

Finalmente, para evaluar la exactitud del modelo se usa el método de casos de estudio a cinco voluntarios, con los cuales se desarrolló el proceso de diseño y se validaron los resultados con el producto final en prototipado rápido, adicionalmente se realizó la adaptación de 5 voluntarios más, dejando un total de 10 casos de estudio de la adaptación digital de los marcos.

Así mismo se evaluó el proceso de adaptación de los marcos con 5 participantes capacitados en el uso del programa de modelado tridimensional Rhinoceros. La prueba se llevó a cabo empleado un manual donde se explica el proceso de adaptación sobre el escaneo de un voluntario en el entorno de rhinoceros. Para esto se emplea la definición de Grasshopper previamente diseñada.

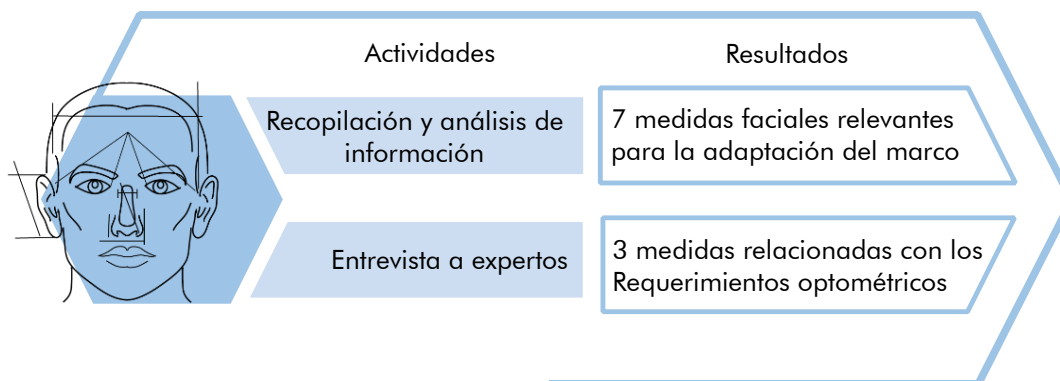
3.3.1 Procedimiento prueba casos de estudio

Se realizó la toma de datos a los voluntarios con el escáner 3D previamente seleccionado, con esta información se realizó la adaptación de las monturas empleando el modelo de diseño paramétrico, se generó el modelo digital de los marcos para su posterior impresión en PLA y finalmente se entregó el marco a los voluntarios para que dieran sus comentarios sobre el producto y respondieran una encuesta para determinar el nivel de comodidad que experimentaron con los marcos adaptados.

3.3.2 Procedimiento de prueba del proceso de adaptación

Empleando una encuesta se determinó el nivel de conocimiento de la herramienta Rhinoceros que posee el participante. Para el desarrollo de la prueba se le proporcionó la siguiente información: el manual, la definición de Grasshopper, el archivo de Rhinoceros y el escaneo del rostro para el que se realizó la adaptación. Finalmente el participante realizó la adaptación, se registró el tiempo que tardó en esta tarea y se hizo una evaluación de la complejidad del proceso por medio de una encuesta.

4 Desarrollo objetivo 1: Determinación de los puntos del rostro



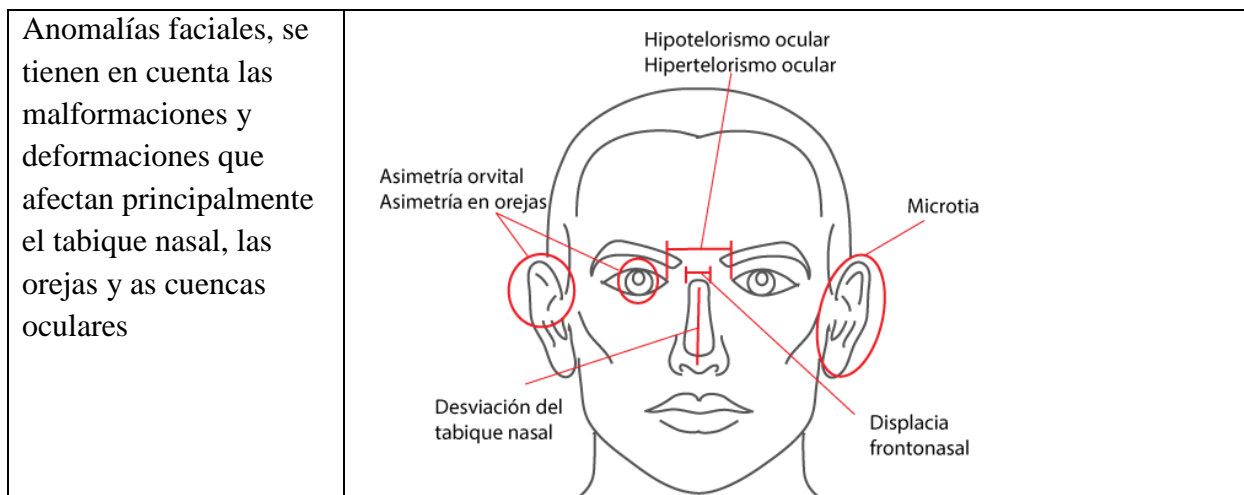
4.1 Variaciones anatómicas y anomalías de la sección media del rostro

Se realizó un análisis de la información obtenida acerca de las malformaciones, deformaciones y variaciones anatómicas de la sección media del rostro para comprender su influencia en la adaptación de las monturas para lentes a la anatomía facial, en la tabla 5 se muestran un resumen de la información analizada.

Tabla 5

Variaciones anatómicas y anomalías faciales consideradas para la adaptación de los marcos

Tipo de variación anatómica y anomalía	Descripción de la variación
<p>se tienen en cuenta las variaciones anatómicas que obedecen a factores ontogénicos, sexuales y poblacionales, que afectan las zonas de las cuencas oculares y el tabique nasal</p>	<p>El diagrama ilustra mediciones faciales clave. En la vista frontal, se muestran: 'anchura facial' (línea horizontal superior), 'espacio interorvital' (línea horizontal entre ojos), y 'forma base nasal' (línea horizontal inferior). En la vista lateral, se muestran: 'altura raíz nasal' (línea vertical desde la raíz de la nariz) y 'perfil de dorso' (línea que define el puente de la nariz).</p>



4.2 Entrevista a expertos (requerimientos optométricos)

En reuniones realizadas con los señores Silvia Perdomo y Yovany Mateus propietarios de la óptica Visión Puntual, expertos en optometría y colaboradores del proyecto, se discutió acerca de las propiedades de los marcos y sobre su experiencias en materia de selección de marcos para los clientes, se profundizó en los factores que se deben tener en cuenta para escoger una montura adecuada desde un enfoque tanto funcional como estético.

4.2.1 Fórmula médica

Una de las consideraciones para escoger un marco, es la fórmula médica del paciente, dado que el grosor del lente es directamente proporcional a ésta, por lo tanto, al momento de elegir un marco se debe tener en cuenta que este debe cubrir por completo el borde del lente para brindar protección y una apariencia limpia a las gafas; adicionalmente el riel donde encaja el lente debe tener también un espesor acorde al grosor del lente.

4.2.2 Plaquetas

Las plaquetas en monturas plásticas sobresalen del marco con una altura estándar, cuando en el paciente el perfil nasal sobresale muy poco y la raíz nasal es deprimida, dicha altura de las

plaquetas interfiere con la adaptación del marco pues las plaquetas en contacto con la zona de los pómulos y no permite acercar las gafas al rostro limitando el área de visión.

También en los casos donde el tabique nasal del paciente es muy delgado las plaquetas no cumplen su función y el marco se resbala del rostro. Se presenta la solución de adaptar unos adhesivos de silicona a las plaquetas para reducir el espacio entre estas y prevenir así el deslizamiento; dichos adhesivos deben ser cambiados con cierta frecuencia dependiendo del uso.

4.2.3 Ángulo pantoscópico

Dependiendo de los requerimientos visuales del paciente se hace necesario variar el ángulo pantoscópico; por ejemplo, en pacientes que necesiten lentes bifocales se hace necesario tener un ángulo más cerrado para generar un espacio de visión mayor en la zona inferior del lente y así hacer uso del enfoque cercano solo con bajar la mirada, de otro modo el paciente baja las gafas hasta la punta de la nariz para poder ampliar dicho rango de visión.

4.3 Resumen de los resultados del objetivo número uno

Con base en la revisión realizada a la literatura de las principales variaciones anatómicas y anomalías faciales que presenta el ser humano en la zona media del rostro se establecieron siete (7) medidas y puntos faciales como parámetros a la hora de realizar el diseño del marco de las gafas; adicionalmente tras la entrevista con expertos se identificaron tres (3) variables necesarias para una adaptación correcta a las necesidades ópticas del paciente y correcto montaje de los lentes formulados. Estos resultados se explican a continuación.

4.3.1 Parámetros de personalización

A continuación se especifican los parámetros seleccionados para la personalización del marco de las gafas.

4.3.1.1 Medidas faciales

En la figura 10 se localizaron los principales parámetros faciales para la definición de la geometría de un marco de gafas. De acuerdo con la imagen: **DA** es la Distancia auricular superior; **n** el ancho nasal; **ANF** Ángulo nasal frontal; **s** Saliente nasal; **L** Longitud de la varilla; **AS** Punto auricular superior y **P** Punto de peñasco.

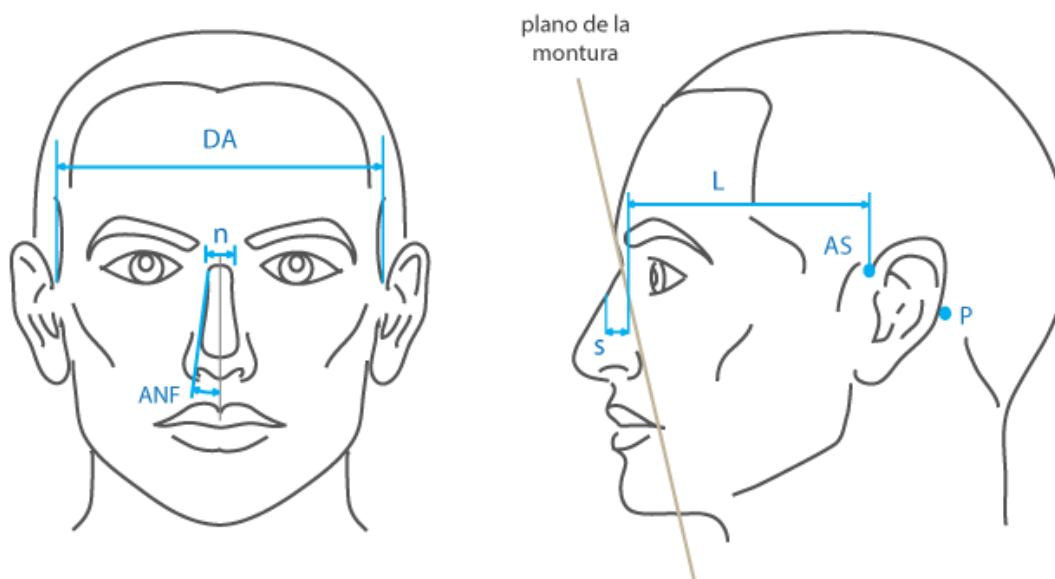


Figura 10. Parámetros faciales escogidos para el diseño.

4.3.1.2 Medidas relacionadas con los requerimientos optométricos

En la figura 11 se localizan los parámetros de modificación de los marcos relacionados con los requerimientos optométricos de las monturas. De acuerdo con la imagen: **r** es el espesor del riel; **E** el espesor de la montura y **AP** el ángulo pantoscópico.

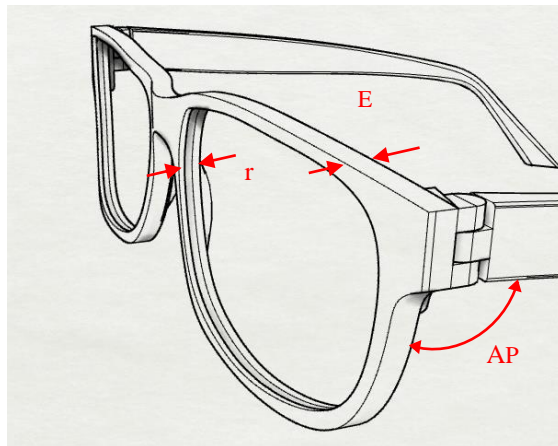
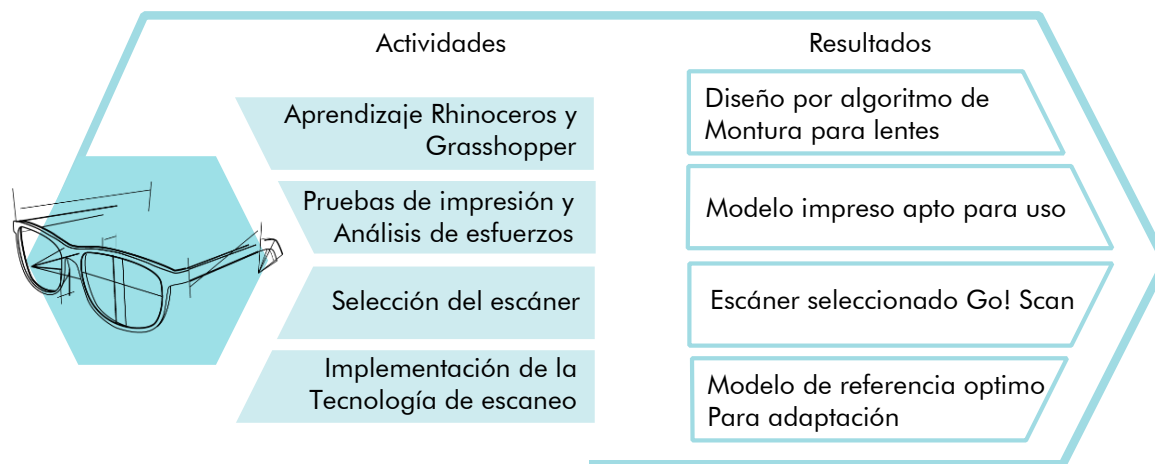


Figura 11. Parámetros optométricos escogidos para el diseño.

5 Desarrollo objetivo 2: Modelo paramétrico



Es necesario definir qué variaciones en la geometría de los marcos permitirá la adaptación de estos al rostro humano teniendo en cuenta los parámetros previamente definidos. En la tabla 6 se muestran estas relaciones.

Tabla 6

Aspectos de la geometría de los marcos a modificar según los parámetros escogidos

Parámetros definidos	Variaciones en la geometría del marco
Distancia auricular superior	Ancho de la sección del aro
Ancho nasal	Tamaño del puente nasal
Ángulo nasal frontal	Ángulo de la sección de las plaquetas
Saliente nasal	Altura de plaquetas
Longitud de la varilla	Longitud de la varilla
Punto auricular superior	Longitud de varilla y Angulo de salida de varilla
Punto de peñasco	Forma de la varilla
Espesor del riel	Diámetro del riel
Espesor de la montura	Extrusión de la montura
Ángulo pantoscópico	Ángulo de salida de la varilla

5.1 Fase 1: Programación en Grasshopper

5.1.1 Frente

A continuación se presenta el esquema conceptual del proceso de programación realizado en Grasshopper para la creación del frente de las gafas:

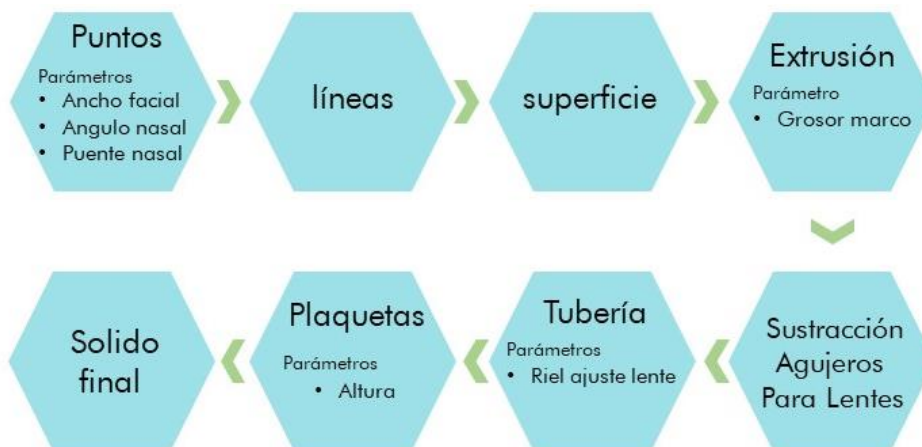


Figura 12. Esquema conceptual de programación en Grasshopper, frente.

En la figura 13 se muestra la vista general de la programación de Grasshopper donde se pueden evidenciar las diferentes secciones en las cuales se distribuyen los elementos que definen el frente del marco, estas secciones hacen referencia a los puntos, líneas, superficies y operaciones en general que se llevan a cabo de una manera secuencial para crear la definición utilizada, los

componentes y creación de estas estas secciones serán explicados a continuación en el apartado 5.1.1.1 procedimiento.

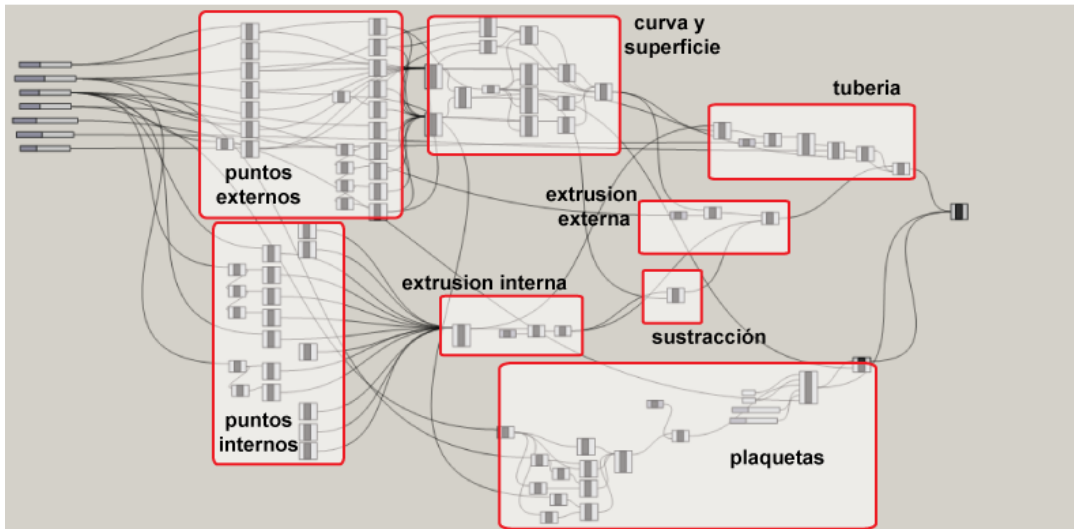


Figura 13. Vista general explicada de la programación en Grasshopper, frente.

5.1.1.1 Procedimiento

Los componentes empleados en el desarrollo del algoritmo se nombraran en inglés entre los siguientes símbolos < > por ejemplo en componente escalar se nombrará <Scale>

Se establece una secuencia de 17 puntos <Construct Point> que describe el contorno externo del marco con sus atributos formal-esteticos, a su vez dichos puntos son la base de la adaptación del marco al rostro, definiendo con estos los parámetros de: ancho total del marco, ángulo del tabique nasal y ancho del puente nasal, estos parámetros se definieron de la siguiente manera como se observa en la figura 14.

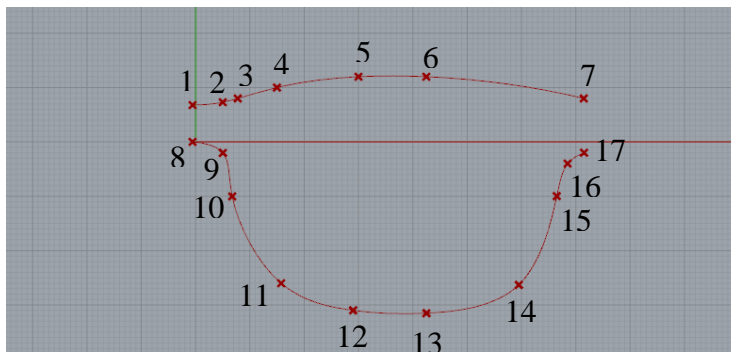


Figura 14. Puntos que describen contorno externo de marco.

Ancho total del marco: en los puntos 6 y 13 se establece como variable el valor que tomaran en el eje x <Number Slider>, dado que estos puntos se pueden mover con cierta libertad en x para preservar la forma del marco los valores en x de los puntos 7, 14, 15, 16 y 17 serán directamente proporcionales a los valores que tomen 6 y 13 <Adittion>.

Angulo del tabique nasal: se establecen como variable la posición en el eje x de los puntos 10 y 11, con el aumento o disminución de dicho valor se logra disminuir o aumentar el ángulo del tabique nasal.

Ancho del puente nasal: en los puntos 1 y 8 se establece como variable el valor que puedan tomar en el eje x , al tener fijos los puntos 2 y 9 esto da como resultado el aumentar o disminuir el ancho del puente nasal. Ver figura 15 de descripción del contorno paramétrico basado en localización de puntos

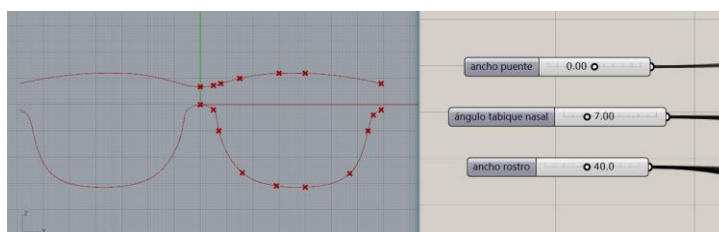


Figura 15. Relaciones de posición que describe el contorno externo de marco.

A continuación se interpolan los puntos <Interpolate> para generar las curvas que describen el marco, se crea una superficie <Network Surface> partiendo de la red que crean dichas curvas. Adicionalmente al definir los puntos estos se posicionan de tal manera que la geometría inicial cuente con el atributo del ángulo panorámico, como se observa en la figura 16 la vista frontal y superior, de modo que se pueda respetar los ángulos de visión adecuados para el usuario.

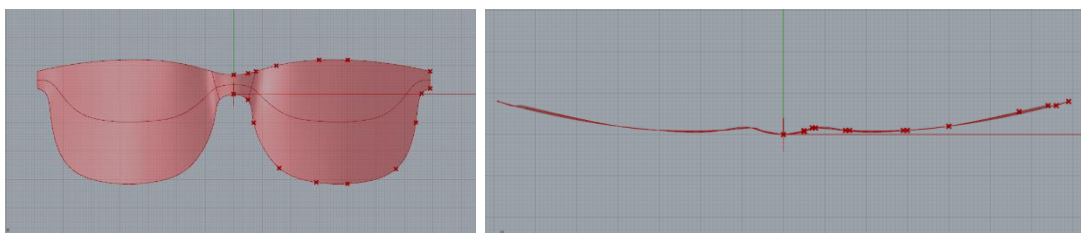


Figura 16. Superficie generada por curvas y ángulo panorámico del marco.

Se genera una extrusión de la superficie para crear un sólido <Extrude>, la magnitud de la extrusión en el eje y se establece como variable <Number Slider> para así modificar el grosor del marco el cual es uno de los parámetros previamente definidos. Ver figura 17

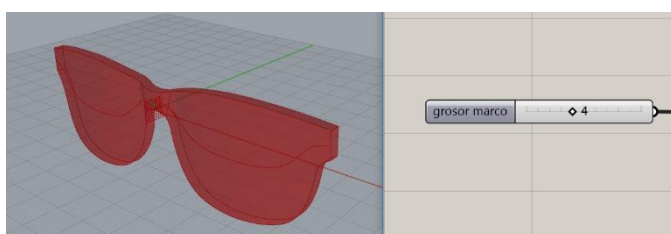


Figura 17. Grosor del marco de las gafas.

Posteriormente se describe a través de puntos <Construct Point> (figura 18) la sustracción de material en la cual se insertarán los lentes, estos puntos que definen el sólido a sustraer poseen las mismas variables mencionadas anteriormente para los puntos que describen el contorno externo, respetando los parámetros previamente definidos los puntos se modifican en conjunto.

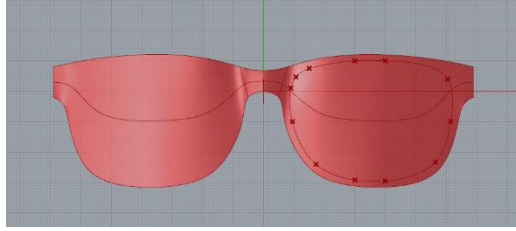


Figura 18. Puntos que describen la sustracción para los lentes.

Realizada la sustracción, se genera el riel para el posicionamiento y sujeción de los lentes. Este riel se define tomando la línea elaborada <Project> para la sustracción y generando una tubería <Pipe> a través de dicha línea, el diámetro de esta tubería (riel) y la posición en el eje y de la línea (alineal riel) se toman como variables pues estos valores hacen parte de los parámetros previamente definidos. Ver figura 19.

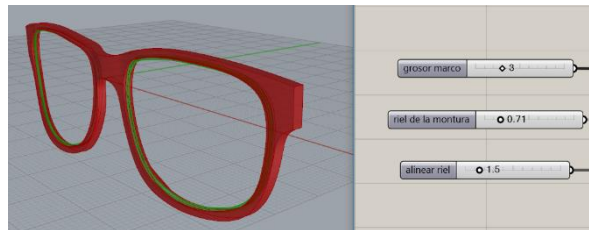


Figura 19. Riel de posicionamiento de lentes.

Las plaquetas se generan empleando una forma previamente modelada en Rhinoceros. Ver figura 20. Esta geometría fluye a través del marco empleando la operación <Surface Morph> se establece como variable el valor de W_{domine} de dicha operación para modificar la altura de las plaquetas, adicionalmente la posición de las plaquetas en y depende del valor de la variable del grosor del marco.

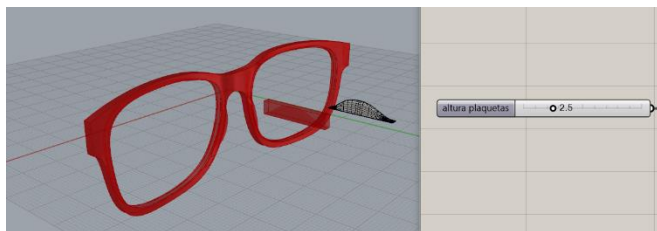


Figura 20. Posicionamiento de plaquetas.

5.1.1.2 Parámetros

A continuación se observan los diferentes parámetros que deben ser modificados para la creación del frente de las gafas, en la tabla 7 se observan las variables y ejemplos de modificación de dichas variables.

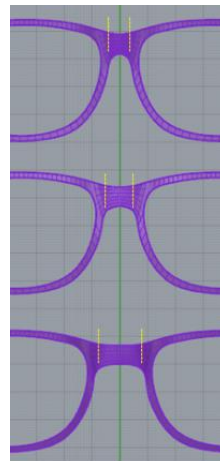
Tabla 7

Descripción y ejemplos de las variables modificadoras del frente del marco

Descripción variables y modificación	Ejemplos de modificación
<p>Sliders numéricos</p> <p>se observan los sliders numéricos con el respectivo nombre del parámetro que modifican, con esto se genera la adaptación de los marcos a las medidas específicas del rostro del usuario</p>	
<p>Modificación ancho del rostro</p> <p>esta modificación se genera aumentando el ancho del aro de la montura, para así ampliar la distancia entre varillas sin afectar las medias de la zona central del marco</p>	

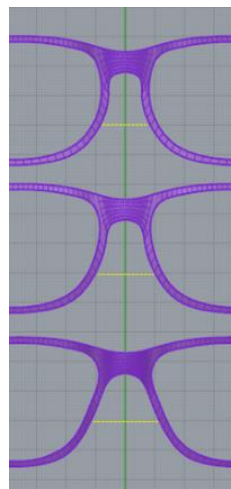
Modificación de puente nasal

Esta modificación se realiza para adaptar el puente del marco al ancho de la raíz nasal del usuario, este aumento de tamaño se genera desde el centro de la montura logrando ampliar la distancia entre los aros son modificar la forma del marco.



Modificación de ángulo nasal:

esta modificación se realiza con el fin de adaptar la zona de apoyo de los marcos en el tabique nasal, este tamaño depende de la amplitud del ángulo que va desde la raíz nasal hasta el borde externo de la fosa nasal, esta línea define el borde externo de la nariz. Para la adaptación se modifica la distancia entre los bordes internos de los aros de las monturas sin afectar el puente nasal ni el ancho de la montura.



5.1.2 Varillas

A continuación en la figura 21 se presenta el esquema conceptual de proceso de programación realizado en Grasshopper para la creación de las varillas de las gafas:



Figura 21. Esquema conceptual de programación en Grasshopper, varillas.

En la figura 22 se muestra la vista general de la programación de Grasshopper donde se pueden evidenciar las diferentes secciones que componen la definición de las varillas, en la sección derecha se encuentran los sliders numéricos para la modificación, en la sección central se ubican los plano de los que se compone la varilla y finalmente la operación de recubrir con la cual se genera el sólido, esta secuencia ordenada de pasos da como resultado el algoritmo de programación de las varillas, el cual será explicado a continuación en el apartado 5.1.2.1 procedimiento

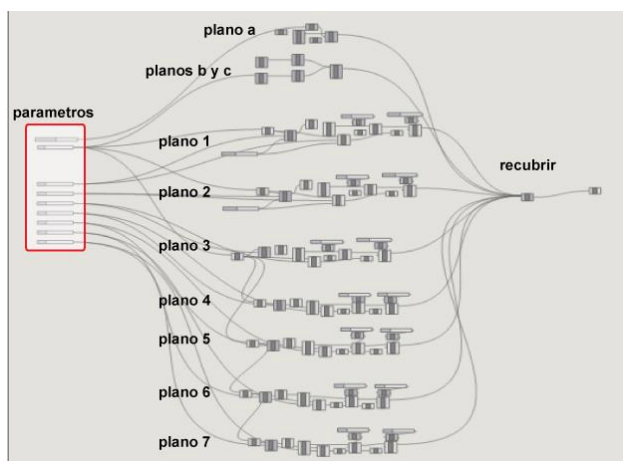


Figura 22. Vista general de programación en Grasshopper, varillas.

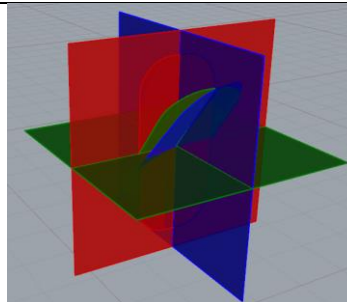
5.1.2.1 Procedimiento

En la tabla 8 se describe el procedimiento de programación llevado a cabo en Grasshopper para generar las varillas

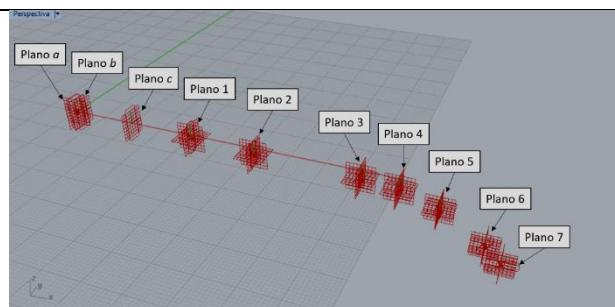
Tabla 8
Procedimiento de programación. Varillas

Procedimiento	Evidencia de la operación realizada
---------------	-------------------------------------

Empleando planos <YZ Plane> se crean los 8 perfiles <Rectangle> que definen la forma de la varilla. Los perfiles son rectángulos creados en planos, cada rectángulo posee un comando de rotación <Rotate> en cada uno de los ejes.

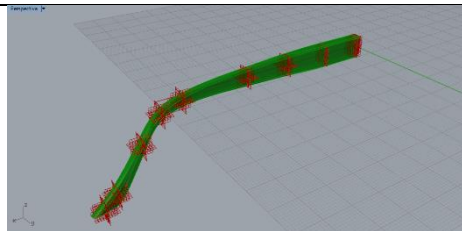


El primer perfil o rectángulo (*a*) tiene como variable la rotación en el eje *y* para crear el ángulo pantoscópico <Number Slider>, el perfil *c* tiene como variable su posición en *x* para definir con esto el largo total de la varilla, el valor en *y* de los planos 1 a 7 depende por ende del valor que este posea en el plano *c*.



Planos de la varilla

Empleando la operación <Loft> se visualiza la varilla. En los planos 1 a 7 se establece como variable la posición en *y* <Number Slider> este rango de movimiento permite adaptar las varillas a la geometría al cráneo del paciente, esta cavidad de planos permite una gran libertad para la modificación de la forma.



5.1.2.2 Parámetros

A continuación en la figura 23 se observan los diferentes parámetros que pueden ser modificadas para la creación de la varilla de las gafas, su respectivo orden y ubicación:

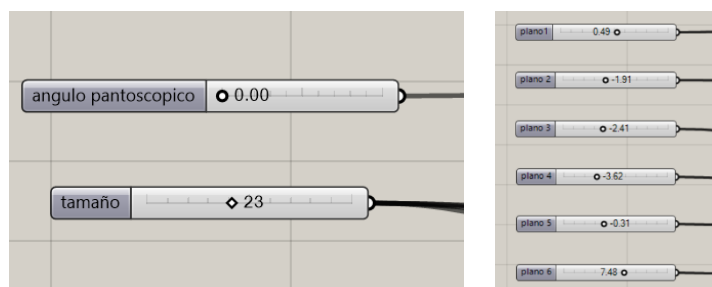
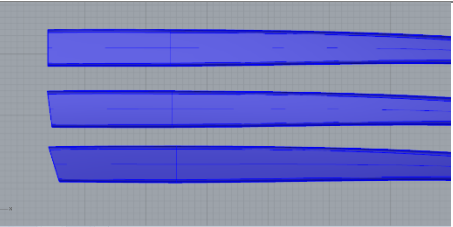
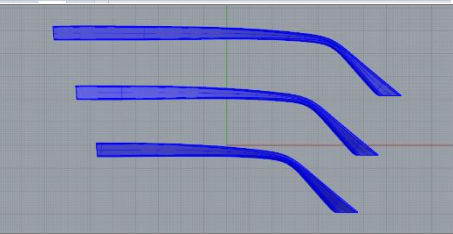
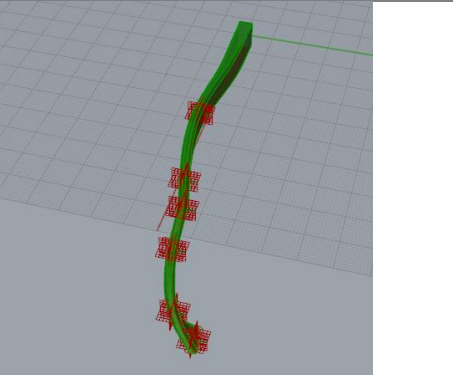


Figura 23. Parámetros empleados para creación de las varillas de las gafas.

5.1.2.3 Ejemplos de adaptación

En la tabla 9 se muestran el parámetro definido y ejemplos de adaptación de dicho parámetro

Tabla 9
Ejemplos de las variables modificadoras de las varillas

Parámetro	Ejemplo de modificación
<p>Ángulo pantoscópico Se modifica graduado el Angulo del primer plano de la varilla</p>	
<p>Longitud de la varilla Se modifica graduando la distancia entre planos</p>	
<p>Forma de la varilla Se modifica variando la distancia de los planos con respecto al eje y</p>	

5.2 Fase 2: Pruebas de impresión y modificación del modelado

Tras las pruebas de impresión se observó que el marco posee buena resistencia para el montaje de los lentes. Las varillas deben tener un grosor mayor para soportar la manipulación y lograr una articulación de mayor tamaño y por ende más resistente.

La primera prueba de impresión fue realizada en una impresora ultimaker 3 extended, las piezas fueron impresas por separado.

La impresión del marco fue realizada con éxito y se fabricaron lentes para poder realizar el montaje y comprobar la resistencia del modelo ver figura 24



Figura 24. Primera impresión y montaje de lentes, frente de las gafas.

En la figura 25 se muestra el proceso de impresión de impresión fallido de la varilla.

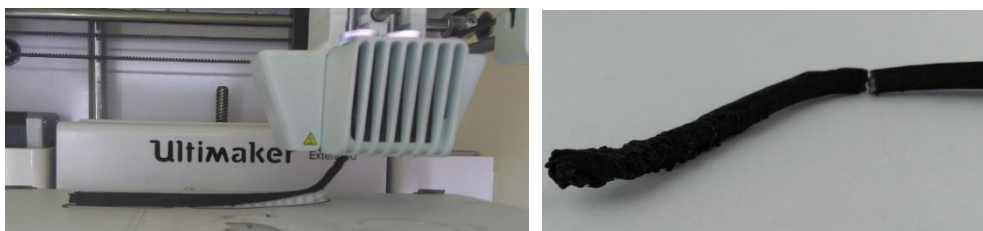


Figura 25. Varilla impresa de forma individual, ruptura.

Con la manipulación de la pieza se generó una ruptura. Esta falla se produce cuando el objeto a imprimir es delgado y alto ya que las capas de material no logran enfriarse lo suficiente para colocar la capa siguiente, por lo tanto, el material queda maleable y al pasar nuevamente la boquilla sobre el objeto tibio lo deforma y a su vez no se adhieren con suficiente fuerza.

Se realizó una modificación del grosor de la varilla para poder obtener una mayor resistencia de este elemento, esta modificación fue 1.5 veces el grosor de propuesta inicial. En la figura 26 se comparan el modelado de la varilla que sufrió la ruptura y el nuevo modelado que cuenta con un

grosor 1.5 veces mayor, se puede apreciar la diferencia en la relación del inicio de la varilla con la curva en su extremo final.

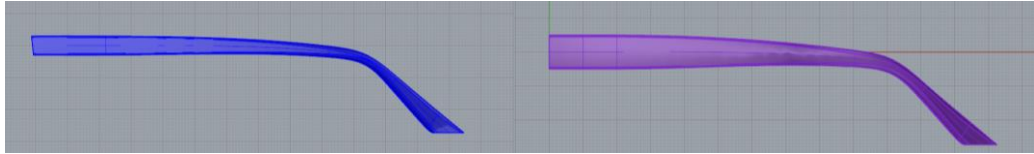


Figura 26. Comparación grosor inicial y final de varilla.

5.2.1 Ensamble y articulación del marco

5.2.1.1 Cola de milano

Para el ensamble entre el frente de las gafas y las varillas, se planteó inicialmente la cola de milano como principio de unión. Ver figura 27.

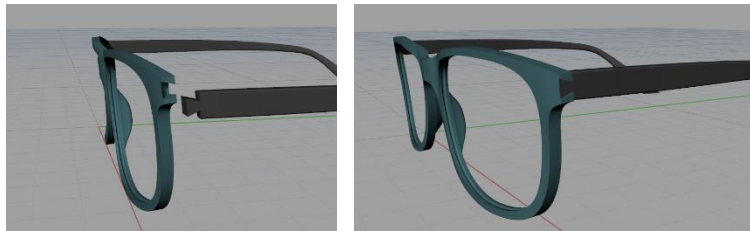


Figura 27. Ensamble con cola de milano como principio de unión.

- Pruebas de impresión

En la figura 28 se evidencia el modelado empleado para las pruebas de impresión y las imágenes de los ensambles impresos, estas pruebas de impresión se realizaron con el fin de corroborar la funcionalidad y precisión obtenida con este tipo de unión (cola de milano). Se utilizó una impresora ultimaker 3 extended y la impresora de la escuela de diseño industrial para realizar la prueba

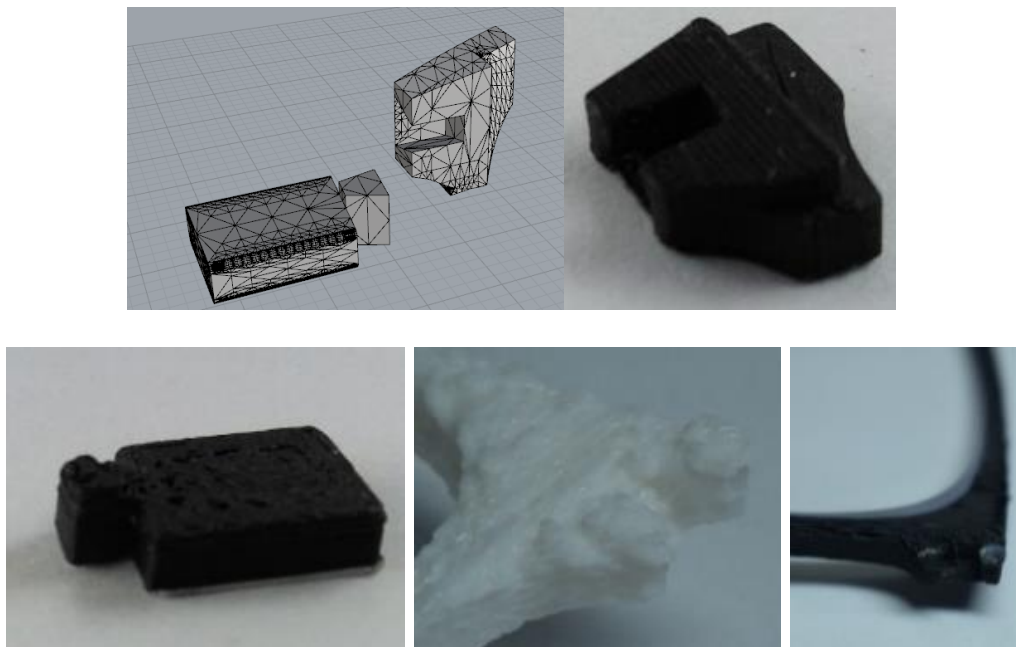


Figura 28. Pruebas de impresión unión cola de milano.

Se realizaron repetidas pruebas reduciendo el tamaño de la pieza macho para lograr su correcto ajuste, no obstante las piezas resultaban difíciles de ensamblar.

En las pruebas realizadas en la impresora de la escuela de diseño industrial UIS (EDIUIS), a raíz de la precisión de la impresión se hizo evidente que se requiere una nueva solución para la articulación puesto que la cavidad del elemento hembra presenta residuos de material que impiden el correcto ensamble y su forma en general se percibe irregular y poco funcional. Adicionalmente es un tipo de unión poco funcional para un marco pues no permite la rotación de las varillas y sería necesario guardar los elementos separados. Esta alternativa fue descartada.

5.2.1.2 Bisagra

La segunda solución planteada para la unión entre las varillas y el frente de las gafas es una bisagra de tres partes (ver figura 29), utilizada en marcos para lentes de sol los cuales poseen unas

estructuras robustas; se une por medio de un pasador (tornillo) y permite el movimiento de las varillas para cerrar el marco.

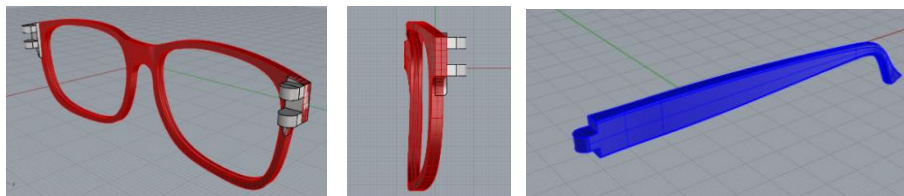


Figura 29. Diseño de bisagras sobre el frente de las gafas y varilla, vista en perspectiva y lateral.

Las bisagras son modeladas con anticipación para utilizar el mismo archivo para todas las adaptaciones con el fin de conservar las dimensiones del objeto y emplear tornillo estándar de lentes de sol para generar una articulación completamente funcional.

5.2.2 Modelo final

Teniendo en cuenta las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, se modela la versión final de cada uno de los componentes que integran las gafas y se realiza su respectivo ensamble:

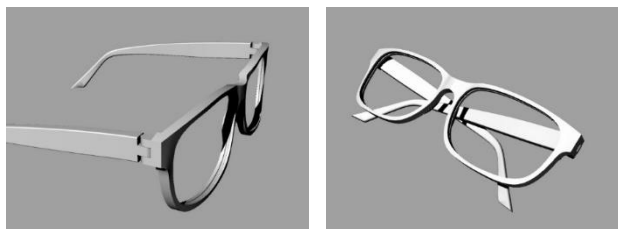


Figura 30. Modelo final ensamblado.

5.2.3 Análisis de esfuerzos

Adicional a las pruebas de impresión, se realizó un proceso de simulación conceptual estático básico del modelo creado con el fin de determinar puntos críticos y concentradores de esfuerzos presentes sobre su estructura. También se busca con esta simulación básica calcular la fuerza máxima que se le puede aplicar al modelo sin que este falle.

A continuación se detalla cómo se llevó a cabo el proceso de simulación en el programa Inventor:

- Para el proceso de simulación, inicialmente se toman las piezas previamente digitalizadas mediante Rhinoceros y se importan al Inventor; se procede a realizar un ensamble según las relaciones de posición pertinentes y posteriormente se identifica el material más idóneo, según su comportamiento, para proceder con el proceso de simulación.

Para los componentes plásticos, se implementa un Asbesto, cuyas propiedades mecánicas se asemejan mucho a las del filamento de impresión PLA (Ácido poliláctico), ver tabla 9.

Los componentes metálicos se simulan con un Acero Inox. AISI 304.

Tabla 10

Propiedades mecánicas del filamento PLA (Ácido poliláctico)

Denominación química	Ácido poliláctico
Descripción	El filamento de PLA Ultimaker ofrece una experiencia de impresión 3D sencilla gracias a su fiabilidad y buena calidad superficial. Nuestro PLA está fabricado con materiales orgánicos y renovables. Es seguro, fácil de utilizar en la impresión y se adecua a una amplia gama de aplicaciones para usuarios nuevos y experimentados.

<u>Propiedades mecánicas (+)</u>	<u>Moldeo por inyección</u>		<u>Impresión 3D</u>	
	Valor típico	Método de ensayo	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	-	-	2346,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	-	-	49,5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	-	-	45,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	-	-	3,3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	-	-	5,2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	-	-	103,0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	-	-	3150,0 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	-	-	5,1 kJ/m ²	ISO 180
Resistencia a la prueba de impacto Charpy (a 23 °C)	-	-	-	-
Dureza	-	-	83 (Shore D)	Durómetro

- Posterior a la selección del material, se procede a complementar el modelo incluyendo los lentes correspondientes (ver figura 31a) al marco creado. Estos lentes son incluidos debido a su función estructural, ya que otorgan rigidez a la estructura frontal del modelo. Para el material de los lentes, se selecciona un acrílico, cuyas propiedades se asemejan al policarbonato (material convencional para la fabricación de los lentes de las gafas).





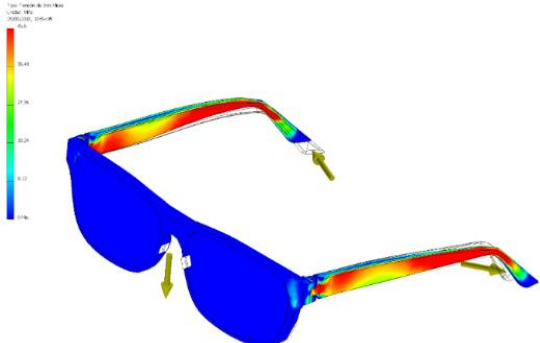
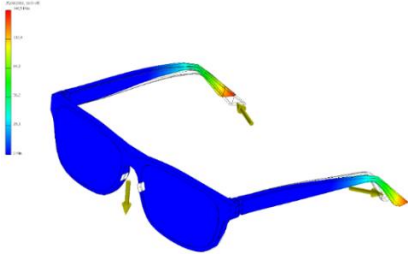
Figura 31. A) Inclusión de lentes en modelo creado b) puntos de apoyo de gafas, simulación.

- La simulación por el método de elementos finitos (FEM), se implementa suponiendo la posición de las gafas sobre su usuario, es decir, se tienen como puntos de apoyo las orejas (descanso de patas de gafas) y la nariz (descanso el puente de las gafas).
- Las zonas de apoyo de las gafas (resaltadas en azul en figura 31b) hacen referencia a los puntos de contacto del marco con respecto al usuario.

Debido a que las fuerzas están asociadas a una superficie de contacto, dentro del entorno CAD se proyectan dichas superficies y las fuerzas se aplican perpendiculares a ellas; a su vez se incluye el efecto de la gravedad. Por otro lado, se incorpora el efecto de la apertura de las patas de las gafas, como efecto de su postura en el usuario. Se plantea inicialmente realizar el proceso de simulación aplicando una fuerza de 10 Newton [N] a cada pata, es decir, aproximadamente 1 Kg fuerza. En la tabla 10 se explican las fases de la simulación realizadas empleando una fuerza de 10 [N].

Tabla 11

Proceso de simulación por elementos finitos aplicando una fuerza de 10 Newton [N]

Fases de la simulación 10N	Evidencia del proceso realizado										
<p>Se definen los apoyos y la aplicación de las fuerzas que afectan al marco</p>	 <table border="1" data-bbox="1230 457 1409 562"> <thead> <tr> <th>Tipo de carga</th> <th>Fuerza</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Magnitud</td> <td>10,000 N</td> </tr> <tr> <td>Vector X</td> <td>-9,415 N</td> </tr> <tr> <td>Vector Y</td> <td>3,292 N</td> </tr> <tr> <td>Vector Z</td> <td>0,715 N</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de carga	Fuerza	Magnitud	10,000 N	Vector X	-9,415 N	Vector Y	3,292 N	Vector Z	0,715 N
Tipo de carga	Fuerza										
Magnitud	10,000 N										
Vector X	-9,415 N										
Vector Y	3,292 N										
Vector Z	0,715 N										
<p>Se procede a definir los elementos y los nodos que los relacionan. Se tiene un total de 17065 elementos de dos tamaños (0,2 mm – elementos grandes y 0,1 mm – elementos pequeños) con distribución según la curvatura del segmento y un total de 31979 nodos.</p>	 <div data-bbox="1157 751 1401 846"> <p>Configuración de malla</p> <p>Configuración común</p> <p>Tamaño medio de elemento: 0,100 (como fracción de la longitud del cuadro delimitador)</p> <p>Tamaño mínimo de elemento: 0,200 (como fracción del tamaño medio)</p> </div>										
<p>Se ejecuta el análisis de esfuerzos equivalentes según la teoría de VonMises, a partir de la cual se tiene un valor máximo de esfuerzo de tensión de 45,6 MPa, siendo este igual al esfuerzo de deformación del material. Esta condición se ve reflejada en las varillas de las gafas, especialmente en aquellas zonas con menor espesor y en el pivote donde se une la bisagra.</p>											
<p>Se evalúa el desplazamiento máximo de los componentes, encontrando como valor máximo 140,5 mm en la zona donde se aplica la fuerza a las varillas.</p>											

Configuración de para la simulación

Esfuerzo de tensión 10 [N] simulación

Desplazamiento de las varillas con la fuerza aplicada

- El análisis de esta primera simulación permite concluir que el nivel de esfuerzos que soporta el material vs el esfuerzo máximo obtenido, presenta un factor de seguridad de 0.08, es decir, se presenta rotura del marco debido a la fuerza aplicada (factor de seguridad menor a uno, igual a rotura material).

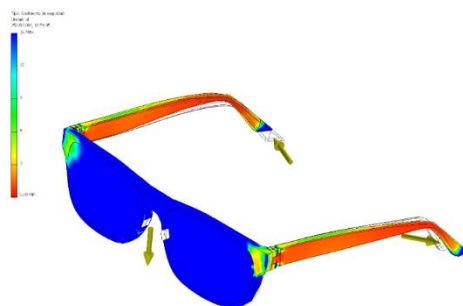


Figura 32. Factor de seguridad calculado (10 [N]), simulación.

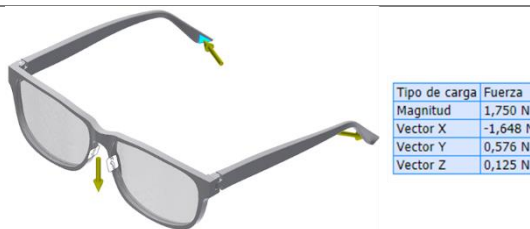
- Teniendo en cuenta que en la simulación realizada aplicando una fuerza de 10 [N] arroja que el material se rompe, se realiza nuevamente el proceso con el fin de obtener la fuerza máxima que se le puede aplicar al modelo creado sin que este falle, es decir, cuando el factor de seguridad es igual o superior a uno (1).
- Después de un realizar un proceso experimental de simulación (prueba y error), se obtiene que la fuerza máxima que se le puede aplicar al modelo creado es de 1.75 [N], es decir, aproximadamente 175 gramos fuerza. En la tabla 11 se explican las fases de la simulación realizadas empleando una fuerza de 1.75 [N].

Tabla 12

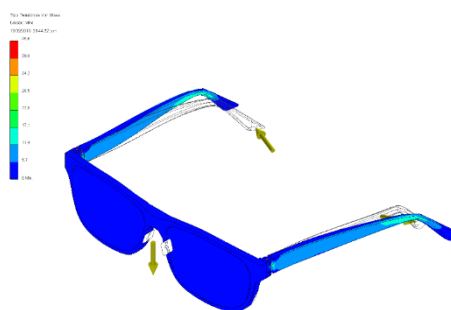
Proceso de simulación por elementos finitos aplicando una fuerza de 1.75 Newton [N]

Fases de la simulación 1.75[N]	Evidencia del proceso realizado
--------------------------------	---------------------------------

Se defienden los apoyos y la aplicación de las fuerzas que afectan al marco

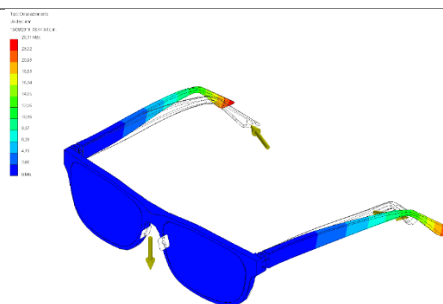


Se ejecuta el análisis de esfuerzos equivalentes según la teoría de VonMises, a partir de la cual se tiene un valor máximo de esfuerzo de tensión de 17.1 MPa, siendo este inferior al esfuerzo de deformación del material. Esta condición se ve reflejada en las varillas de las gafas, en aquellas zonas con menor espesor y en el pivote donde se une la bisagra tal como se evidenció en el caso de la aplicación de los 10 [N].



Esfuerzo de tensión 17.75 [N]

Se evalúa el desplazamiento máximo de los componentes, El valor máximo de desplazamiento encontrado fue de 25.11 mm en la zona donde se aplica la fuerza a las varillas.



Desplazamiento de las varillas

- Se concluye entonces con esta nueva simulación que el nivel de esfuerzos que soporta el material vs el esfuerzo máximo obtenido, presenta un factor de seguridad de uno (1), es decir, el material soporta una carga máxima de 1.75 [N] y se desplazará un máximo de 25.11 mm en cada una de sus patas antes de que estas fallen.

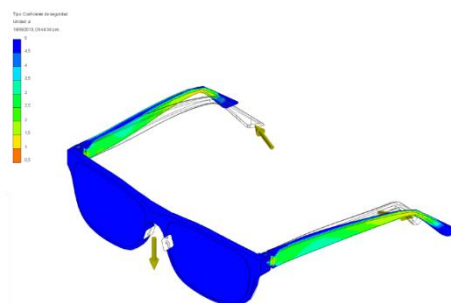


Figura 33. Factor de seguridad calculado (1.75 [N]), simulación.

5.3 Fase 3: Toma de datos

5.3.1 Selección del escáner

Se toma con base para la selección del escáner, el trabajo de investigación llevado a cabo por María f. Camargo y Sully Calderón, del semillero de investigación interfaz y bajo la dirección de la profesora Clara Isabel López Gualdrón titulado: EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA INGENIERÍA INVERSA EN RECONSTRUCCIÓN FACIAL donde se buscaba evaluar comparativamente mediante procesos de experimentación, la precisión y las condiciones requeridas para la obtención de mallas 3D virtuales de rostro humano, Los modelos realizados para esta evaluación fueron tomados con los tres tipos de tecnologías que funcionan mediante procesos de reflexión de luz generada por rayos láser (azul, verde y blanco): Go! Scan®, Sense® y Kinect. Cada voluntario fue registrado con las tres tecnologías. Ver figura 34.

Las mallas se evaluaron realizando una superposición entre ellas, midiendo la diferencia entre las longitudes correspondientes a la sección transversal de sien a sien; posteriormente fueron comparadas con dimensiones lineales tomadas mediante instrumentos de medición (calibradores).

Los resultados arrojan que la varianza entre las tecnologías es mínima en el área de las sienes, siendo este un valor confiable en la toma de datos para generar elementos que se encuentren localizados en este punto



Figura 34. Proceso de toma de datos de un usuario en orden desde la izq. Toma de datos: con calibrador, Go! Scan, Sens y Kinect. Adaptado de Calderon, Camargo, y Lopez (2017).

No obstante se percibe un adelgazamiento significativo en la zona maxilar en las tecnologías de gama más baja, de igual forma se puede apreciar un cambios significativos en la morfología de la nariz y las orejas, zonas de una gran importancia para la correcta adaptación de los marcos, por ende para efectos del desarrollo del proyecto se determina realizar la toma de datos con el escáner Go! Scan®

5.3.2 Protocolo de escaneo

Consideraciones o requerimientos para realizar un buen proceso de escaneo:

- El cabello debe ser apartado por completo de las zonas de interés para el escaneo.
- El rostro debe estar en su estado natural, sin tensiones o deformaciones externas por ende debe evitarse el uso de gorros que halen la piel del usuario.
- La identificación de los puntos auriculares superiores es vital para la correcta adaptación de la montura en el paciente; se debe apartar completamente el cabello de la zona de las orejas del usuario, para ello se pueden utilizar artículos para el cabello como pinzas, gel, balacas, ligas o moñas.

Inicio de la prueba

- El escáner estará dispuesto en la mesa y el programa de escaneo VXelements abierto y con los siguientes valores preestablecidos

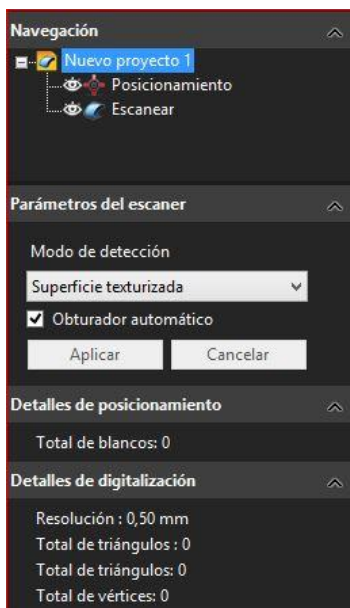


Figura 35. Valores preestablecido de VXelements para la toma de datos.

- Se sienta al voluntario en la silla donde va a ser escaneado
- Se le explicará al voluntario el procedimiento de escaneo, el funcionamiento del escáner y el tiempo aproximado que puede tomar (30 minutos).
- Se le entrega al voluntario el consentimiento informado, se pide que lo lea completamente y que firme en la parte inferior si está de acuerdo.
- Una vez autorizado el procedimiento se procede a despejar la zona de las orejas apartando por completo el cabello de todo su contorno.
- Se ubican los targets de la siguiente manera en el rostro del usuario para una mejor toma de datos.

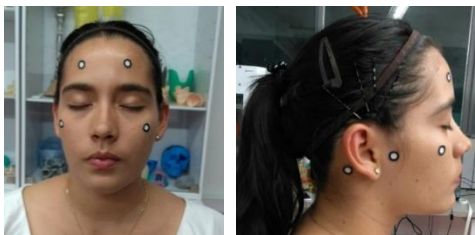


Figura 36. Ubicación de los targets para la toma de datos.

- Se le pide al usuario que se ubique en una posición recta, que cierre los ojos y permanezca quieto hasta que se le avise que ha terminado el escaneo.
- Se procede a hacer la toma de datos con el escáner 3D.
- Finalizado el escaneo se le avisa al voluntario que puede abrir los ojos y que se mantenga en la silla.
- Se guarda el escaneo, se ajusta para eliminar los elementos sueltos y se guarda con la modificación, si el proceso es satisfactorio y el escaneo es correcto se le avisa al voluntario que han terminado, de lo contrario se le comunica que es necesario hacer una nueva toma.
- Se repiten el proceso de escaneo hasta tener el resultado esperado.
- Se le comunica al usuario que el proceso ha finalizado y se procede a remover los targets y los elementos del cabello.

5.3.3 Preparación de la malla

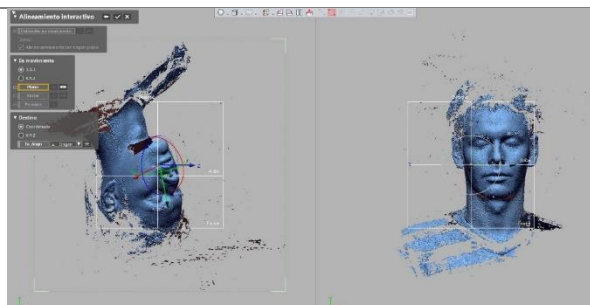
Para realizar el proceso de preparación de la malla, se utiliza el software Geomagic facilitado por la escuela de diseño industrial UIS para su uso en las instalaciones del laboratorio de tecnologías 3D. En la tabla 12 se describe el proceso a seguir para la preparación de la malla.

Tabla 13

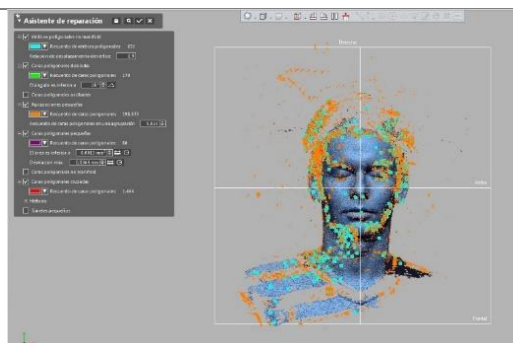
Proceso de preparación de la malla registrada utilizando Geomagic

Proceso realizado	Evidencia del proceso
-------------------	-----------------------

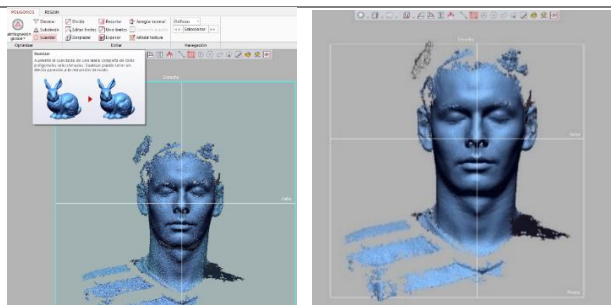
Se alinea el escaneo para ubicar el rostro en posición vertical empleando la herramienta “alineamiento interactivo”



Se retiran los elementos sueltos y las imperfecciones que se puedan haber generado durante el escaneo utilizando la herramienta “asistente de reparación”



Se suaviza la malla para una mejor visión de las formas del rostro y lograr una adaptación más precisa del marco al rostro.



Se exporta la malla reparada como un archivo STL binario para su posterior uso en la adaptación

5.4 Diagramas de proceso

Con la ayuda de la herramienta modeladora de procesos BPNM llamada Bizagi se crearon los diagramas de proceso generales y específicos de las tareas a desarrollar para la adaptación de los marcos personalizados

5.4.1 Proceso general

En figura 37 se muestra el diagrama general del proceso de desarrollo de los marcos personalizados, dos sujetos hacen parte del proceso, el cliente y el diseñador; el proceso consta de 5 etapas las cuales son: escaneo, preparación de la malla, adaptación, impresión y entrega. La toma de decisiones dentro del proceso se utilizan para la aprobación de los resultados des etapas.

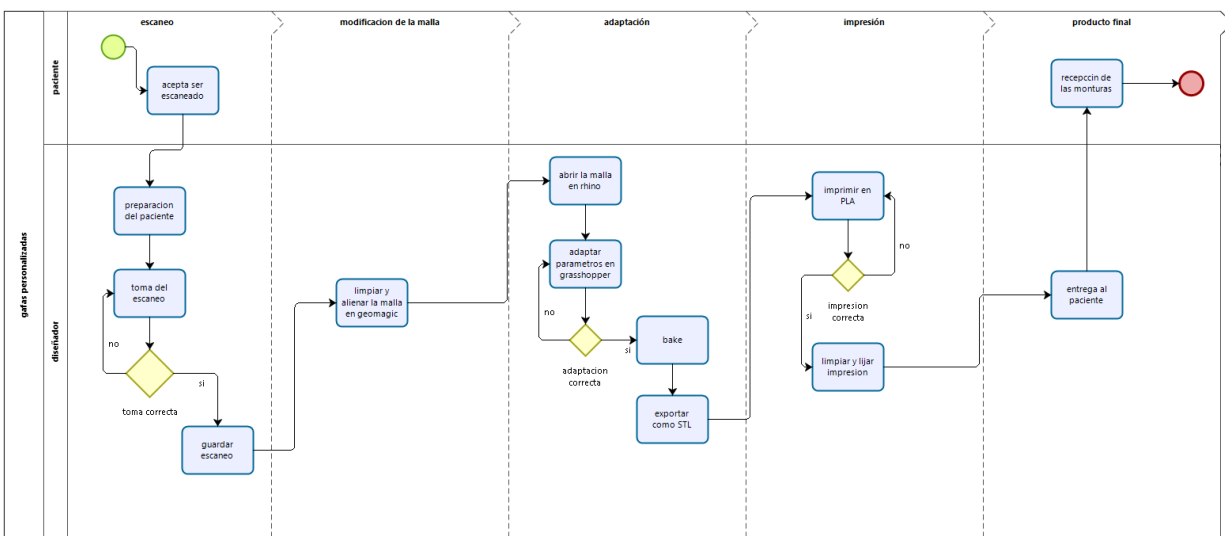


Figura 37. Proceso general de la personalización de marcos.

5.4.2 Proceso de escaneo

En la figura 38 se muestra el diagrama específico del proceso de escaneo donde se muestra el flujo de acciones necesarias para la correcta toma del modelo de referencia sobre el cual se va a realizar la adaptación de los marcos. Herramientas necesarias: Go! Scan, software VXelements.

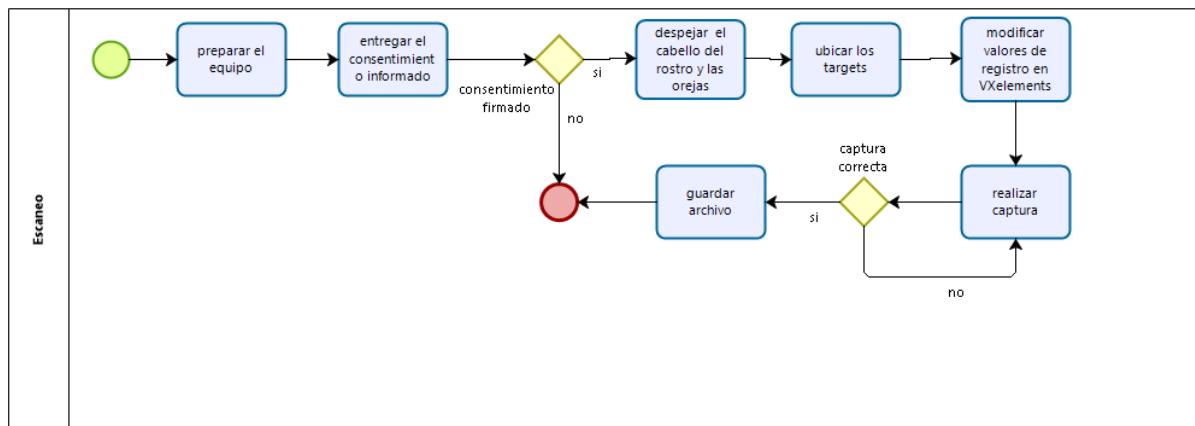


Figura 38. Proceso de escaneo del modelo de referencia.

5.4.3 Proceso preparación de la malla

En el figura 39 se muestra el proceso a seguir en el software de edición de mallas Geomagic, describiendo pasos a seguir para alinear, limpiar y suavizar la malla del escaneo previamente registrado.

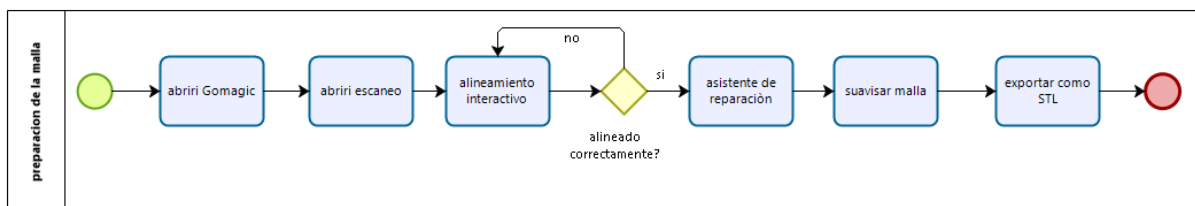


Figura 39. Proceso de preparación de la malla para la adaptación de marco.

5.4.4 Proceso adaptación de los marco

En la figura 40 se describe el proceso de adaptación de los marcos personalizados sobre el modelo de referencia. La adaptación posee tres fases principales, la adaptación del frente del marco, la adaptación de la varilla izquierda y la adaptación de la varilla de recha, las toma de decisión se emplean como herramienta para aprobar el proceso realizado: las herramientas a utilizar son Rhinoceros y el plugin Grasshopper

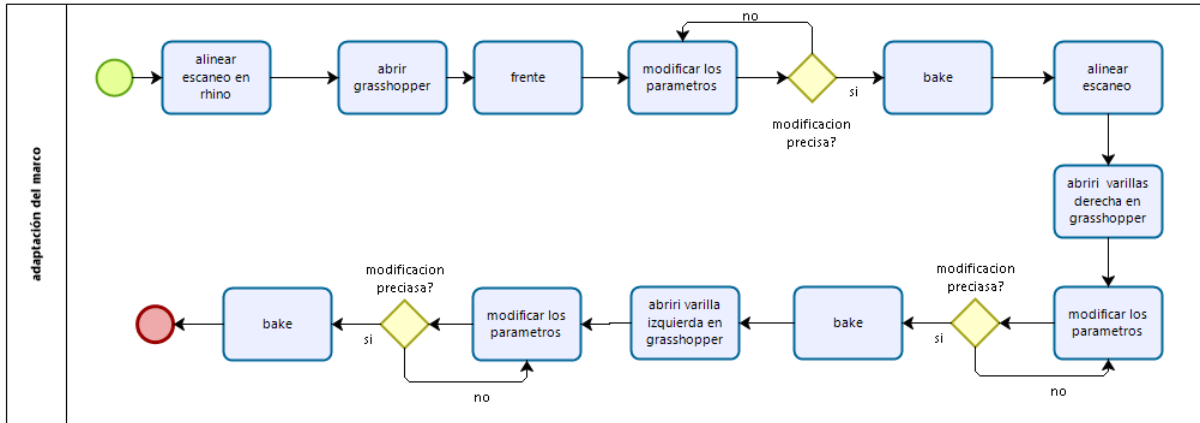
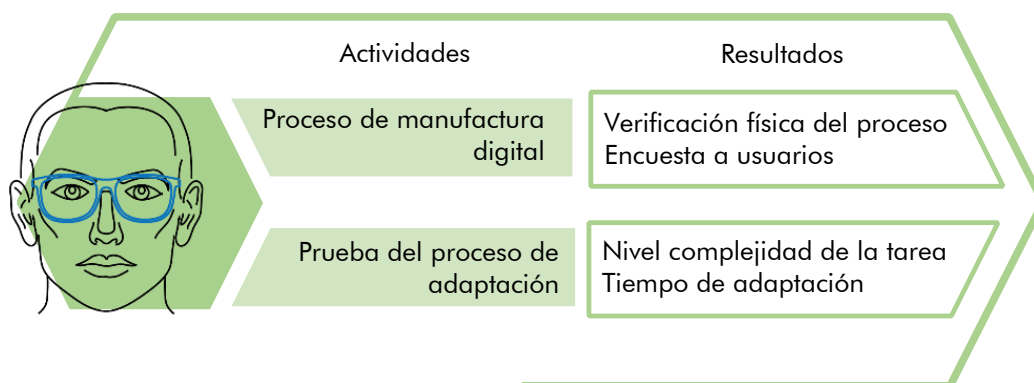


Figura 40. Proceso de adaptación de los marcos al modelo de referencia digital.

6 Desarrollo objetivo 3: Evaluación del modelo



6.1 Casos de estudio

El algoritmo de diseño del marco fue desarrollado con 10 parámetros variables con el objetivo de adaptar dicho marco a la anatomía facial de cualquier paciente. Los parámetros son: ancho del rostro, ángulo del tabique nasal, puente nasal, altura de plaquetas, ángulo pantocopiso, longitud de la varilla, forma de la varilla, grosor del marco, riel para el lente y posición del riel. Estos parámetros responden a las necesidades específicas de cualquier rostro para obtener un marco que se adapte correctamente al este.

El objetivo de evaluar el modelo mediante casos de estudio es demostrar la versatilidad y flexibilidad del algoritmo de diseño desarrollado; dado que todos los casos poseen diferentes requerimientos, esta comprobación se logra utilizando este algoritmo único, para realizar la adaptación de los marcos a la geometría específica del rostro de cada participante.

La evaluación del modelo mediante casos de estudio se realizó siguiendo el proceso de manufactura digital propuesto para este proyecto (ver figura 41).

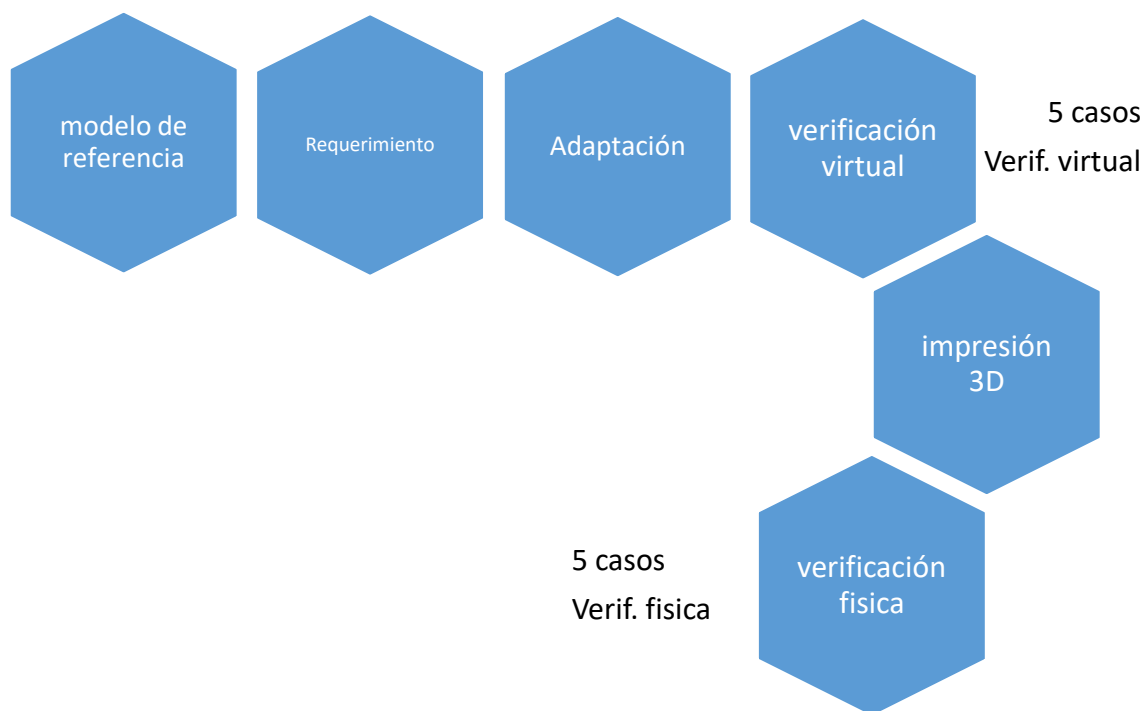


Figura 41. Proceso de manufactura digital.

A continuación se realizara una descripción del modelo de manufactura digital propuesto, ver tabla 13.

Tabla 14

Descripción etapas del proceso de manufactura digital propuesto

Etapas del proceso	Descripción
Modelo de referencia	El modelo de referencia es la malla obtenida del rostro del voluntario mediante escaneo 3D empleando el escáner Go! Scan Adicionalmente se describe el género la edad y la altura del voluntario
Requerimientos	Se hace una descripción de las características físicas del voluntario: 1) Las variaciones morfológicas que obedecen a factores raciales, ontogénicos y sexuales

	2) Las malformaciones o deformaciones que pueda llegar a presentar el voluntario
Adaptación	<p>Se traducen los requerimientos, a la geometría del marco que debe ser intervenida, mediante el algoritmo; esta intervención se realiza mediante la modificación de los valores de los parámetros del algoritmo; esta tarea se lleva a cabo directamente sobre en el modelo de referencia, es decir se moldea la montura sobre el rostro de la persona.</p> <p>En la aplicación de la prueba se resaltaré la adaptación del requerimiento más sobresaliente del paciente, aquel que le ha generado dificultades a la hora de conseguir un marco que se adecue a su rostro.</p>
Verificación virtual	<p>El marco ensamblado con las bisagras se posiciona sobre el modelo de referencia para corroborar que la adaptación cumpla con los requisitos de un marco correctamente posicionado en el rostro los cuales son</p> <ul style="list-style-type: none"> • Angulo pantoscopico entre 5 y 10 grado • Contacto del marco en 3 puntos; orejas y hueso nasal • Distancia al rostro menor a 5mm • Angulo del talón de la varilla menor o igual a 95° • Inicio de la curvatura de la varilla en el punto auricular superior
Impresión 3D	se genera el modelo a partir de la tecnología de impresión 3D por filamento, se registra el tiempo de impresión
Verificación física	Se entrega al voluntario el marco prototipado, se registran las percepción y comentarios del

voluntario durante el uso del marco personalizado, finalmente se aplicó una encuesta de satisfacción.

Se realizó la toma de datos de 10 voluntarios. Se buscó que los voluntarios fueran: usuarios de gafas permanentes, voluntarios cuyo rostro posea características raciales identificadoras o personas que contaran con una anatomía facial que dificulte el proceso de compra de gafas al no encontrar unas que se adapten correctamente a su anatomía.

El proceso de verificación se estructuró en 2 etapas: la primera con el alcance de verificación virtual y la segunda donde se realizó la impresión de los marcos, la verificación física. El proceso de verificación hasta la etapa dos, se realizó para los voluntarios 1 a 5, mientras que para los voluntarios 6 a 10 llegó hasta la etapa uno, verificación virtual.

A continuación se mostrará el proceso de manufactura digital aplicado en los casos 1 a 5 en los cuales se realizó la verificación física.

6.1.1 Proceso de manufactura digital etapa uno



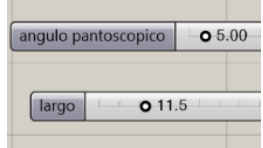
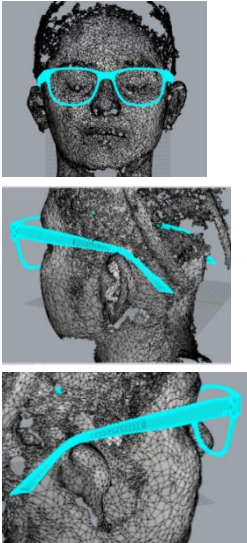
6.1.1.1 Voluntario 1

En la tabla 14 se describe la primera etapa del proceso de manufactura para el voluntario 1

Tabla 15

Etapa uno del proceso de manufactura digital para el voluntario 1


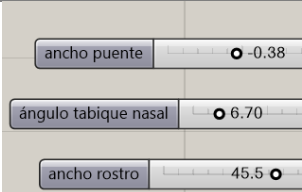

Etapa	Descripción	Evidencia del procedimiento
--------------	--------------------	------------------------------------

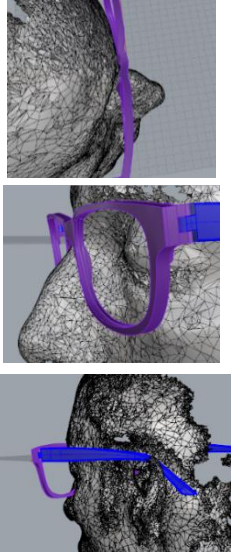
Modelo de referencia	Mujer Años: 21 Altura: 162cm altura	
Requerimientos	El voluntario 1 presenta microtia tipo II en su oreja derecha, posee una nariz pequeña y sobresaliente en su base, la raíz nasal sobresale y el dorso nasal es recto	
Adaptación	Para logara un contacto adecuado de las varillas, fue necesario prestar especial atención a la adaptación de la varilla derecha dándole un ángulo pantoscopico y una longitud, diferentes a las de la varilla izquierda Tiempo requerido para la adaptación 25,18 minutos	<p>Valores varilla derecha</p>  <p>Valores varilla izquierda</p> 
Verificación virtual	<p>Posicionamiento del marco en el rostro</p> <ul style="list-style-type: none"> • Angulo pantoscopico $>5^\circ$ • se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas • el apoyo del frente del marco se ubica en el hueso nasal • la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm • ángulo del talón = 95° • la longitud de las varillas es adecuada 	

6.1.1.2 Voluntario 2

En la tabla 15 se describe la primera etapa del proceso de manufactura para el voluntario 2

Tabla 16
 Etapa uno del proceso de manufactura digital para el voluntario 2

Etapa	Descripción	Evidencia del procedimiento
Modelo de referencia	Hombre Edad: 23 Altura: 190cm	
Requerimientos	<p>El voluntario 2 posee una nariz marcadamente caucasoide, presenta una raíz nasal sobresaliente, perfil de dorso nasal sinuoso y base nasal muy sobresaliente, como particularidad el tabique nasal del voluntario 2 es especialmente delgado.</p>	
Adaptación	<p>Se brindó una especial atención al ángulo pantoscópico y el ancho del puente nasal para lograr un apoyo adecuado del marco en el hueso nasal.</p> <p>Tiempo requerido para la adaptación 22,31 minutos</p>	 <p>Valores adaptación del frente</p>  <p>Imagen de la adaptación</p>

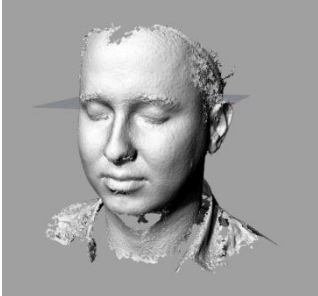
Verificación virtual	<p>Posicionamiento del marco en el rostro</p> <ul style="list-style-type: none"> • Angulo pantoscopico = 6° • se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas • el apoyo del frente del marco se ubica en el hueso nasal • la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm • ángulo del talón < 95° • la longitud de las varillas es adecuada 	
-----------------------------	--	---

6.1.1.3 Voluntario 3

En la tabla 16 se describe la primera etapa del proceso de manufactura para el voluntario 3

Tabla 17

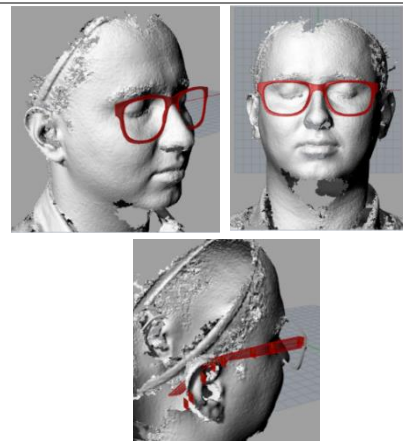
Etapas del proceso de manufactura digital para el voluntario 3

Etapas	Descripción	Evidencia del procedimiento
Modelo de referencia	<p>Hombre Edad: 28 Altura: 177cm</p>	
Requerimientos	<p>El voluntario 3 posee un perfil nasal ligeramente convexo, una base nasal poco sobresaliente, raíz nasal sobresaliente</p>	

Adaptación

El voluntario 3 no evidencia requerimientos sobresalientes que dificulten la adaptación de los marcos comerciales a su rostro, se busca hacer por ende una adaptación precisa a la morfología facial con el fin generar un mayor confort al momento del uso.

Tiempo requerido para la adaptación 19,47 minutos

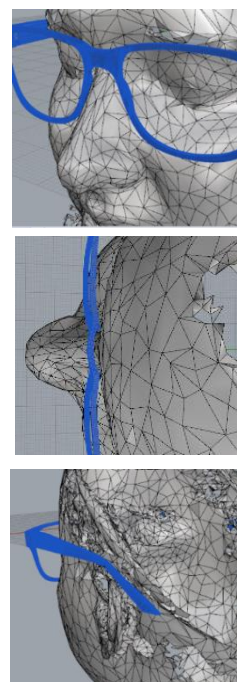


Imágenes de la adaptación

Verificación virtual

Posicionamiento del marco en el rostro

- Angulo pantoscopico = 6°
- se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas
- en el apoyo del frente del marco se observa un ligero aumento de la apertura del ángulo nasal, lo que puede producir deslizamiento del marco.
- Angulo del talón = 95°
- la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm
- la longitud de las varillas es adecuada




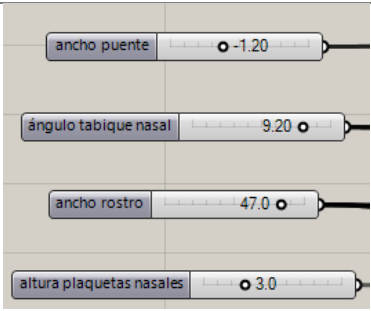
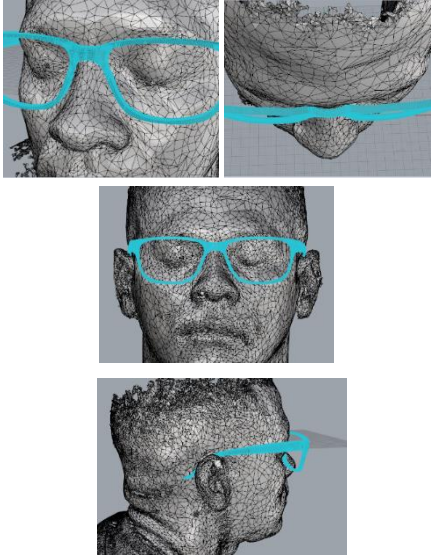
6.1.1.4 Voluntario 4

En la tabla 17 se describe la primera etapa del proceso de manufactura para el voluntario 4

Tabla 18

Etapa uno del proceso de manufactura digital para el voluntario 4

Etapa	Descripción	Evidencia del procedimiento
-------	-------------	-----------------------------

Modelo de referencia	Hombre Edad: 33 Altura: 186cm	
Requerimientos	El voluntario 4 posee rasgos negriodes, presenta una raíz nasal deprimida, una base nasal aplastada, espacio inter-orbital amplio, un perfil nasal recto y una anchura facial amplia	
Adaptación	Para la adaptación del voluntario 4 es necesario prestar especial atención al ancho del puente, el ángulo del tabique nasal y la altura de las plaquetas, con el fin de generar un apoyo correcto del marco	
	Tiempo requerido para la adaptación 19,47 minutos	Valores adaptación del frente
Verificación virtual	<p>Posicionamiento del marco en el rostro</p> <ul style="list-style-type: none"> • Angulo pantoscopico= 6° • se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas • el apoyo del frente del marco se ubica en el hueso nasal • la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm • ángulo del talón $> 95^\circ$ se debe verificar el ancho del frente de la montura. • la longitud de las varillas es adecuada 	

6.1.1.5 Voluntario 5 (infante)

En la tabla 18 se describe la primera etapa del proceso de manufactura para el voluntario 5

Tabla 19

Etapa uno del proceso de manufactura digital para el voluntario 5


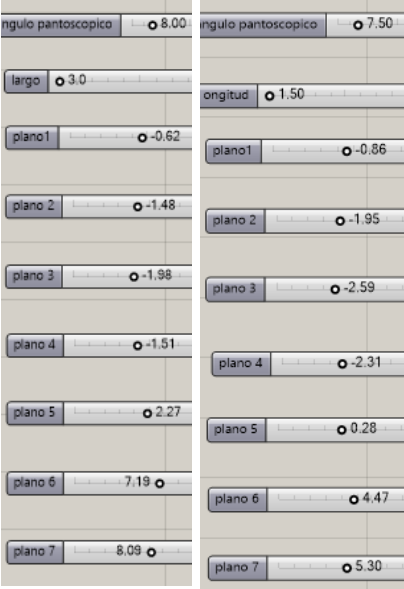
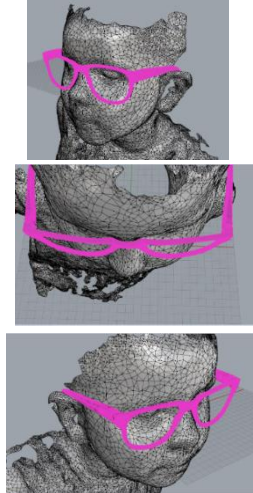
Etapa	Descripción	Evidencia del procedimiento
Modelo de referencia	niña Edad: 7 Altura: 123cm	
Requerimientos	El voluntario 5 presenta asimetría facial en sus orejas, en las cuencas oculares y una ligera desviación del tabique nasal. Por la edad del voluntario se presenta una raíz nasal deprimida, el perfil del dorso de la nariz es cóncavo y la base poco sobresaliente	
Adaptación	<p>es necesario prestar especial atención al ángulo pantoscópico y la forma de las varillas para tener contacto y sujeción adecuada del marco en la zona de las orejas</p> <p>fue necesario modificar el rango de adaptación de la longitud de la varilla</p> <p>Adicionalmente fue necesario realizar la modificación de la altura del marco, pues los aros entraban en contacto con los pómulos, esta modificación no está contemplada en los parámetros de personalización, dado que en la adaptación para personas adultas este</p>	

Imagen a

imagen b

	tamaño obedece a necesidades estéticas y no funcionales.	imagen a: valores adaptación varilla izquierda
	Tiempo requerido para la adaptación 28,46 minutos	imagen b; valores adaptación varilla derecha
Verificación virtual	Posicionamiento del marco en el rostro <ul style="list-style-type: none"> • Angulo pantoscopico $>5^\circ$ y $<10^\circ$ • se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas • el apoyo del frente del marco se ubica en el hueso nasal • la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm • ángulo del talón= 95° • la longitud de las varillas es adecuada 	



6.1.2 Proceso de manufactura digital fase 2

6.1.2.1 Impresión voluntarios 1 a 5

En la tabla 19 se muestran los tiempo de impresión y el modelo final de los marcos adaptados

Tabla 20

Tiempo de impresión de los marcos adaptados para los voluntario 1 a 5

voluntario	Tempo de impresión	Marco impreso
1	2 horas 47 minutos	
2	3horas 16 minutos	

3	2 horas 39 minutos	
4	2 horas 49 minutos	
5	1 hora 58 minutos	

6.1.2.2 Verificación física voluntario 1

El voluntario 1 expreso una gran mejora en el apoyo de las varillas en las orejas, pues los marcos normales no entran en contacto con su oreja derecha (ver figura 42), también sintió mejoría en el apoyo del marco en el tabique pues sus gafas habituales tienen un acho de puente inadecuado para su espacio inter-orbital.



Figura 42. Verificación física voluntario 1.

6.1.2.3 Verificación física voluntario 2

El usuario 2 expresó una mejoría notable en el apoyo del marco en el tabique nasal, pues por su fisionomía los marcos convencionales le quedan grandes en esta zona produciendo el deslizamiento de este, la solución a este problema es utilizar marcos metálicos con plaquetas graduables sin embargo estas plaquetas poseen una superficie de contacto muy pequeña y generan

mucha presión en la zona de apoyo generando marcas y molestias al usuario. En la figura 43 se puede ver el ajuste del marco al rostro del voluntario



Figura 43. Verificación física voluntario 2.

6.1.2.4 Verificación física voluntario 3

El usuario 3 posee proporciones faciales que le facilitan conseguir marcos comerciales que se adapten a su rostro, su marco actual tiene las proporciones adecuadas para su fisionomía (ver figura 44). Este usuario expreso inconformidad por el material, la superficie rugosa genero sensaciones de inseguridad e incomodidad en el contacto con la piel.

Como se señaló en la verificación digital el marco posee una apertura del ángulo nasal ligeramente superior a la requerida, por tanto el marco queda grande en la zona del tabique nasal y se desliza ligeramente, pese a esto el voluntario 3 expresó sensación de mejora en el apoyo del marco con la nariz



Figura 44. Verificación física voluntario 3.

6.1.2.5 Verificación física voluntario 4

El voluntario 4 fue el que experimento un mayor cambio con respecto a la ubicación del marco en su rostro, dado que su marco habitual tiene una dimensión correcta para su anchura facial pero muy reducida para el ancho del puente y el ángulo nasal produciendo que el voluntario debe utilizar el marco en la zona media de su nariz, separando los lentes del rostro lo cual produce que el peso de los lentes repose en la zona blanda de la nariz, restringiendo el paso de aire, adicionalmente este distanciamiento reduce el área de visión. El voluntario también expreso su agrado por la ligereza del marco.

En la figura 45 se muestran imágenes comparativas del voluntario utilizando su marco habitual y el marco adaptado.

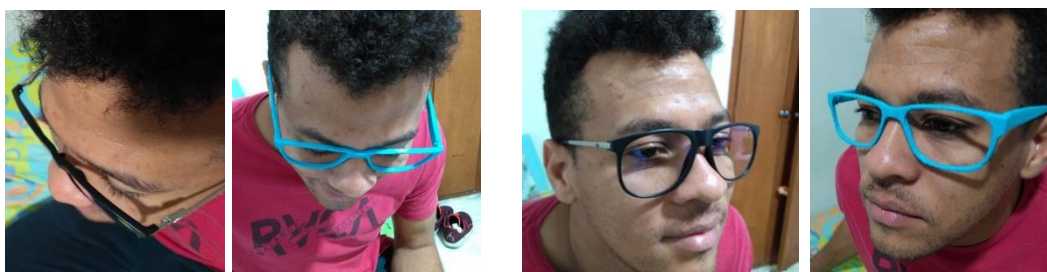


Figura 45. Imágenes comparativas verificación física voluntario 4.

6.1.2.6 Verificación física voluntario 5

El voluntario 5 mostró satisfacción con el marco, con la verificación física se corroboraron las observaciones de la verificación digital, el ajuste del marco en la zona de las orejas fue el esperado, se percibe una adaptación correcta y cómoda de la montura, en la figura 46 se muestra la adaptación del marco en el voluntario



Figura 46. Verificación física voluntario 5.

6.1.3 Encuesta

Se realizó una encuesta a los voluntarios, de forma comparativa se buscó determinar si el uso del marco personalizado generaba una respuesta positiva, teniendo como referencia el marco que utilizan regularmente, en términos generales los voluntarios sintieron mejora en el apoyo de las gafas en la nariz, el tamaño del marco fue el parámetro en el cual los usuarios notaron menor diferencia.

En tabal 20 se muestran los resultados de las encuestas aplicadas; la encuesta se dividió en dos partes, la primera parte cuenta de tres preguntas cuya respuesta puede ser afirmativa o negativa y la segunda partes consta de cuatro preguntas donde la respuesta se marca sobre una línea. Para la escala se empleó una línea de 10cm donde el extremo izquierdo (1) significa peor, el centro (5) igual y el extremo derecho (10) mejor; esta escala hacer referencia a como se siente el voluntario con las nuevas gafas comparándolas con sus gafas habituales.

Tabla 21

Resultados encuesta realizada a voluntarios durante la comprobación física del marco

voluntario	Primera parte			Segunda parte			tamaño
	¿Se siente cómodo?	¿El marco se desliza?	¿Prefiere el nuevo marco?	Apoyo en la nariz	Apoyo en orejas	Ajuste, seguridad	
1	Si	No	Si	9.8	10	9.9	5.1
2	Si	No	Si	9.6	9.5	9.7	7.6

3	Si	Si	No	6.5	5	4.9	5
4	Si	No	Si	9.7	10	9.6	9.5
5	Si	No	Si	9	9	9	9

6.2 Prueba proceso de adaptación

La prueba fue realizada con 5 participantes con conocimiento del uso de la herramienta de modelado tridimensional Rhinoceros, se realizaron preguntas para determinar el nivel de conocimiento de la herramienta, se tomó el tiempo necesario para realizar la adaptación del marco al escaneo de un rostro previamente registrado, finalmente se le pidió a los participantes que calificaran en una escala de 1 a 10, la dificultad para seguir las instrucciones del manual y la complejidad del proceso de adaptación. Se proporcionó a los voluntarios una memoria con: los archivos necesarios para la realización de la adaptación, la guía impresa y la hoja del cuestionario.

6.2.1 Resultado

En la tabla 21 se muestran los resultados de la prueba de adaptación

Tabla 22

Resultados prueba del proceso de adaptación de los marcos

Participante	edad	Nivel de conocimiento	Tiempo Minutos	Nivel de dificultad	Nivel de Complejidad
a	21	alto	41.35	5	3
b	43	alto	34.18	4	2
c	28	Medio alto	45.38	3	6
d	33	Medio bajo	48.19	6	5
e	25	bajo	56.14	7	6

7 Conclusiones

1. La aplicación de ingeniería inversa como herramienta para la reconstrucción facial, el aprendizaje de herramientas de modelado por algoritmos y la implementación de prototipado rápido contribuyó a generar un proceso de manufactura digital efectivo para suplir las necesidades de usuarios específicos al momento de buscar un marco para lentes que se ajuste a sus necesidades visuales y físicas
2. Utilizar modelos virtuales de referencia facilita el proceso de diseño personalizado pues la exactitud de la malla hace posible identificar con precisión las geometrías y dimensiones necesarias para el proceso de adaptación, generando un proceso más rápido y cómodo para el cliente
3. La aplicar el diseño por algoritmos en la concepción de un producto personalizado, permite facilita el desarrollo de una familias de objetos sin repercutir en repetición de operaciones, esto se traduce en un proceso más eficiente y rápido de adaptación.
4. La implementación de tecnologías en los procesos de manufactura digital, como la ingeniería inversa, el diseño paramétrico, el modelado CAD y la impresión 3D; permiten un desarrollo directo de las operaciones lo cual facilita el diseño y manufactura de productos complejos, logrando desarrollarse de una forma mucho más rápida y sencilla.
5. La verificación digital realizada en el proceso de manufactura digital para este proyecto es un herramienta confiable para determinar posibles errores en la adaptación del marco y realizar las correcciones pertinentes antes de pasar a la etapa de impresión 3D

6. A partir del uso de las tecnologías fue posible generar diseños de marcos para lentes ajustados a la geometría específica del rostro de cualquier usuario y se logró determinar por medio de experimentación y un análisis de elementos finitos que las cualidades del producto final en prototipado rápido en PLA los hace aptos para el uso con lentes graduados.
7. Con la comprobación física se lograron evidenciar las ventajas del uso de un marco personalizado y las dificultades que pueden encontrar ciertos individuos y grupos poblacionales al momento de buscar un marco en el mercado que se acomode a su necesidades
8. A través de la implementación de tecnologías para el desarrollo de marcos personalizados, se pueden suplir las necesidades de un grupo poblacionales desatendido, conformado por individuos que presentan anatomías faciales que les generan problemas e incomodidades al momento del uso de marcos tradicionales, dado que los estándares de producción masiva no son lo suficientemente flexibles para adecuarse a las necesidades del usuario. Con los marcos personalizados se generar una oportunidad de emprendimiento al logra dar solución de forma efectiva a esta problemática.



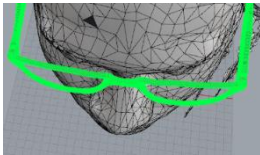

Referencias

- Autodesk Inc. (2018). Obtenido de <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>
- Bai, W., Feng, Y., Yue, Y., & Feng, L. (2017). Organizational structure, cross-functional integration and performance of new product development team. *Procedia engineering*, 174, 621-629.
- Betancur Rodríguez, M. A. (2011). *Ingeniería inversa aplicada: metodología y aplicaciones industriales* (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).
- Caladerón, S., Camargo, M., & Lopez, C. (2017). Evaluación de tecnologías para ingeniería inversa en reconstrucción facial. *Forma Habana*.
- Carlson, B. M. (2000). Sistema cardiovascular. *Embriología humana y biología del desarrollo*. 2a ed. Madrid: Ediciones Harcourt, 397-420.
- Caum Aregay, J., Fransoy Bel, M., Doménech Amigot, B., Flores Se, J. R., Guisasola Valencia, L., Hernández Poveda, C., . . . Vera Tenza, M. (2000). *Tecnología óptica. Lentes oftálmicas, diseño y adaptación*. Mexico, D.F: Alfaomega.
- Cuenca, J. V. (2004). *La antropología forense en la identificación humana*. Bogotá: Guadalupe Ltda .
- Davidson, S. (2013). Grasshopper Algorithmic Modeling for Rhino. *Lynnwood: United States*.
- Fralix, M. T. (2001). From mass production to mass customization. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management* 1 (2), 1-7.
- Huang, S.-H., Yang, Y.-I., & Chu, C.-H. (2012). Human-centric design personalization of 3D glasses frame in markerless. *Advanced Engineering Informatics* 26 (1), 35-45.
- Khabazi, Z. (2012). Generative Algorithms with Grasshopper version 2.0. *AA on-line book*.
- Mateo Martínez, B., Sellés Vizcaya, J., Fos Ros, F., Navarro Garcia, F. J., Moro Pérez, D., Parrilla Bernabé, E., ... & Moraga Maestre, R. (2013). Gafas totalmente personalizadas. In *Revista de biomecánica* (Vol. 59, pp. 55-58). Universitat Politècnica de València. Instituto de Biomecánica de Valencia.
- National Instruments Corporation (2018). *National Instruments*. Obtenido de <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/dataflow>
- Organización Mundial de Salud (2018). *Ceguera y discapacidad visual*. Obtenido de: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
- Payne, A., & Issa, R. (2009). *The Grasshoper Primer*. Second Edition. Obtenido de: <http://www.grashopper.rhino3d.com>.

- . Prieto, F. (2008). Antropometría facial a partir de múltiples vistas: una propuesta metodológica. *Trabajo presentado para optar a la categoría de Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.*
- Ramos Fuentes, F., Ramos Cáceres, M., & Ribate Molina, M. (2014). Semiología de las malformaciones y deformaciones craneofaciales. *Pediatría integral XVIII (8)*, 529-538.
- SOMIM (2008). Clasificación de programas y modelos de la ingeniería inversa: aplicaciones a un caso de estudio. En Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Puebla, Mexico.
- Srivastava, D., Singh, H., Mishra, S., Sharma, P., Kapoor, P., & Chandra, L. (2017). Facial asymmetry revisited: Part I- diagnosis and treatment planning. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 1-8.
- Stanford Children's Health (2018). Obtenido de:
<https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=descripcion-general-de-las-anomalias-craniofaciales-90-P04933>
- Pérez, R. V. (2015). *Estudio de la aplicación del diseño generativo al diseño conceptual arquitectónico* (Doctoral dissertation).



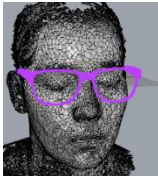
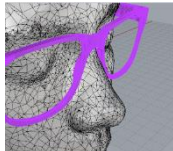
Apéndices

Apéndice A. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 6


Etapa	Descripción	Evidencia del procedimiento
Modelo de referencia	hombre Años: 26 Altura: 180cm	
Requerimientos	El voluntario 6 posee una nariz grande con dorso recto y achatada en su base, se observa también una raíz nasal deprimida y ancha, la base nasal del voluntario es particularmente ancha	
Adaptación	Se debe tener especial atención en el ángulo nasal y el ancho del puente ya que estas dos medidas son particularmente grandes, adicionalmente se debe verificar la altura de plaquetas al evidenciarse una raíz nasal deprimida. Tiempo requerido para la adaptación 15.44 minutos	
Verificación virtual	<p>Posicionamiento del marco en el rostro</p> <ul style="list-style-type: none"> • Angulo pantoscopico $>5^\circ$ • se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas • el apoyo del frente del marco se ubica en el hueso nasal • la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm • ángulo del talón = 95° • la longitud de las varillas es adecuada 	 


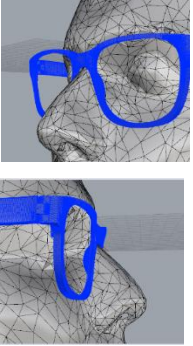
Apéndice B. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 7

Etapa	Descripción	Evidencia del procedimiento
-------	-------------	-----------------------------



Modelo de referencia	mujer Años: 23 Altura: 168cm	
Requerimientos	El voluntario 7 presenta una nariz pequeña de raíz nasal poco sobresaliente, perfil del dorso ligeramente cóncavo y base nasal sobresaliente, en esta adaptación no evidencian requerimientos destacados	
Adaptación	Se realizó la adaptación de los parámetros para correcta adaptación de las monturas al rostro del voluntario 7 Tiempo requerido para la adaptación 23.16 minutos	
Verificación virtual	Posicionamiento del marco en el rostro <ul style="list-style-type: none"> • Angulo pantoscopico $>5^\circ$ • se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas • el apoyo del frente del marco se ubica en el hueso nasal • la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm • ángulo del talón = 95° • la longitud de las varillas es adecuada 	 

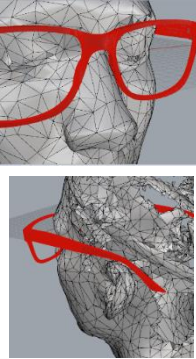
Apéndice C. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 8

Etapa	Descripción	Evidencia del procedimiento
Modelo de referencia	Hombre Años: 24 Altura: 178cm	
Requerimientos	El voluntario 8 posee un perfil de dorso convexo, raíz nasal y base nasal sobresalientes, la raíz nasal moderadamente, la dorso de la nariz es elevando	

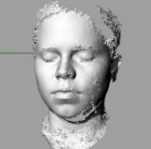

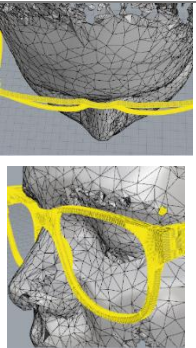
Adaptación	El dorso de la nariz del voluntario 7 es elevando así que se debe tener en cuenta la altura de las plaquetas para lograr una superficie de contacto amplia.	
	Tiempo requerido para la adaptación 24.09 minutos	
Verificación virtual	<p>Posicionamiento del marco en el rostro</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ángulo pantoscópico $>5^\circ$ • se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas • el apoyo del frente del marco se ubica en el hueso nasal • la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm • ángulo del talón $> 95^\circ$ • la longitud de las varillas es adecuada 	

Apéndice D. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 9

Etapa	Descripción	Evidencia del procedimiento
Modelo de referencia	<p>Hombre</p> <p>Años: 19</p> <p>Altura: 179cm</p>	
Requerimientos	El voluntario 9 posee una raíz nasal particularmente sobresaliente, un perfil del dorso ligeramente cóncavo y una base nasal sobresaliente y ligeramente ancha	
Adaptación	<p>Es necesario tener en cuenta la altura de las plaquetas y en ancho del puente al tener una raíz nasal elevada.</p> <p>Tiempo requerido para la adaptación 18.47 minutos</p>	

Verificación virtual	<p>Posicionamiento del marco en el rostro</p> <ul style="list-style-type: none"> • Angulo pantoscopico =6° • se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas • el apoyo del frente del marco se ubica en el hueso nasal • la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm • ángulo del talón < 95° • la longitud de las varillas es adecuada 	
-----------------------------	---	---

Apéndice E. Etapa uno proceso de manufactura digital voluntario 10

Etapa	Descripción	Evidencia del procedimiento
Modelo de referencia	<p>Mujer Años: 25 Altura: 165cm</p>	
Requerimientos	<p>El voluntario 10 posee una nariz con características marcadamente mongoloides, raíz nasal poco sobresaliente, base nasal pequeña, perfil del dorso cóncavo y un ancho de la raíz nasal ligeramente elevado</p>	
Adaptación	<p>Las consideraciones para esta adaptación son el ángulo nasal, el ancho del puente y la altura de las plaquetas.</p> <p>Tiempo requerido para la adaptación 14.21 minutos</p>	
Verificación virtual	<p>Posicionamiento del marco en el rostro</p> <ul style="list-style-type: none"> • Angulo pantoscopico =6° • se aprecia un contacto correcto de las varillas sobre ambas orejas • el apoyo del frente del marco se ubica en el hueso nasal • la distancia del marco con el rostro es inferior a 5mm • ángulo del talón = 95° • la longitud de las varillas es adecuada 	

Apéndice F. Valores parámetros de los marcos adaptados de todos los voluntarios

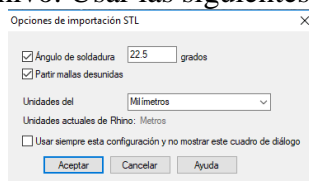
voluntario	Ancho rostro	Puente nasal	Angulo nasal	Longitud varilla D e I	Angulo pan D e I
1	41	-9.0	8.3	11.1 y 11.5	7.6 y 5
2	47	0.4	6.9	13 y 13	6 y 6
3	45	-0.5	8.2	10 y 10	6 y 6
4	47	-1.2	9.2	17 y 17.6	6 y 6
5	38	-0.1	8	1.5 y 3	7.5 y 8
6	46.8	-1.2	10.2	28.6 y 28.7	6 y 6
7	42	-0.5	7.8	18.68 y 17.2	6 y 6
8	40.8	-0.6	8.28	15.33 y 14.8	6 y 6
9	46.6	0	8.15	18.34 y 18.9	6 y 6
10	43	-1.7	8.5	18.18 y 18.6	6 y 6

Apéndice G. Manual para las pruebas del proceso de adaptación.

Manual para la adaptación de marcos personalizados

1 Preparación

- Para iniciar el proceso de adaptación se debe abrir el documento de rhino llamado “marco” visualizar en renderizado en todas las vistas
- Insertar el escaneo del voluntario arrastrando el archivo a la pantalla de rhino o dando clic en archivo, insertar y buscar el archivo. Usar las siguientes opciones de importación



2 Alineación

- En la vista perspectiva y la referencia de objeto activa utilice el comando mover para ubicar la raíz nasal en el origen tomando como punto desde el cual mover la raíz nasal y punto al cual mover 0

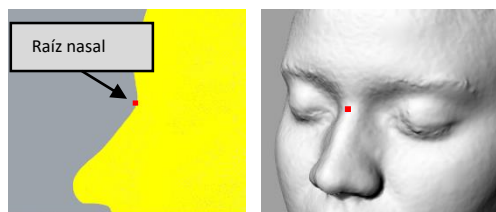


Figura 1. Ubicación de la raíz nasal.

Para la alineación del rostro se utilizara siempre como centro de rotación el origen

- Con el comando rotar girar el escaneo hasta lograr que la vista frontal del rostro coincida con la vista frontal en rhino,

- desde la vista frontal con el comando rotar, girar el escaneo de manera que el eje z divida el rostro en dos mitades perfectas, de ser necesario mueva el escaneo en x para lograr dicha alineación, así mismo desde la vista superior rotar el rostro para que el eje y pase por el centro de la nariz. Se aconseja trazar líneas paralelas a los ejes para visualizarlas sobre el escaneo y hacer las correcciones pertinentes de posición

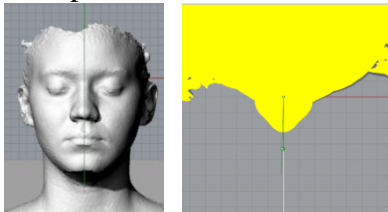


Figura 2. Alineación vista frontal y superior.

- Desde la vista derecha alinear los pómulos y los arcos superciliares con el eje z . Esto se logra empleando el comando rotar y tomando el origen como centro de rotación, para facilitar la alineación trazar una línea paralela al eje z para visualizar el desplazamiento necesario

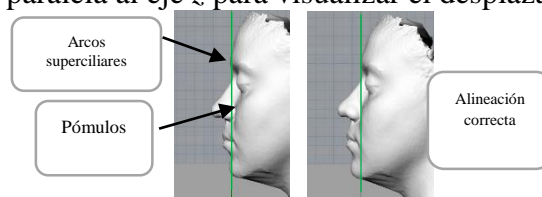


Figura 3. Vista lateral desalineada (izquierda) alineación correcta (derecha).

- Finalmente desplazar el rostro -3mm en el eje y

3 Adaptación del frente del marco

- Para iniciar la adaptación, abrir grasshopper escribiendo el nombre en la barra superior, abrir el archivo llamado “frente”
- Empleando los sliders que se encuentran en la esquina superior izquierda de la ventana de grasshopper se realiza la adaptación del marco al escaneo del voluntario, cada slider posee el nombre de la característica que modifica

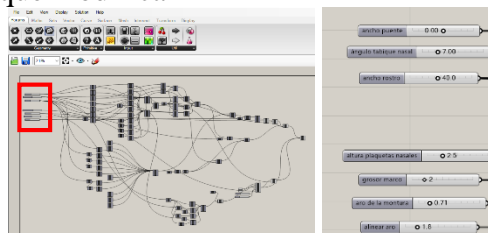


Figura 4. Posición de los sliders frente (izquierda) nombre de los sliders frente (derecha).

- Ancho del puente: esta medida se relaciona con el ancho de la nariz en la zona de la raíz nasal, por tanto el puente de la montura debe modificarse para que enmarque la nariz en dicha zona, empleando para esto la vista frontal



Figura 5 Adaptación ancho puente nasal.

- Tener en cuenta que al momento de modificar el valor del puente nasal el escaneo debe desplazarse en el eje x el mismo valor que este parámetro posea, por ejemplo:

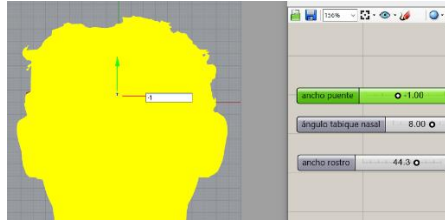


Figura 6 Alineación con valor ancho puente.

- Angulo tabique nasal: la montura en la zona del tabique debe descansar sobre la nariz del voluntario por tanto al momento de la adaptación la montura debe mostrar una ligera intercepción con la malla del escaneo, para esto es necesario emplear la vista perspectiva

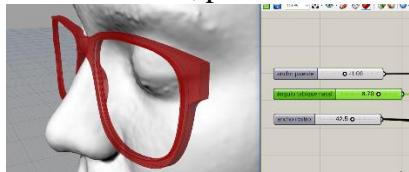


Figura 7 Intercepción ángulo tabique nasal.

- Ancho rostro: utilizando la vista frontal alinear los extremos laterales del marco con los bordes del rostro, justo donde empiezan las orejas como se muestra en la siguiente figura

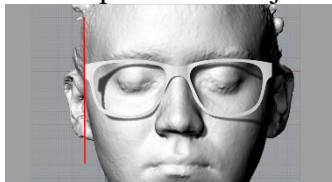


Figura 8. Alineación ancho rostro.

- Una vez finalizada la adaptación de forma correcta es necesario convertir esta imagen en un sólido, para esto dirigirse a la definición de grasshopper, dar clic derecho en la última caja de la definición y seleccionar *bake*

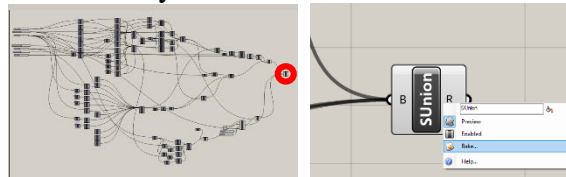


Figura 9. Posición ultima caja de la definición (izquierda) selección *bake* (derecha).

- Se abrirá el menú de atributos, seleccionar *capa 3*, seleccionar “*yes please*” y dar clic en ok como se muestra en la siguiente imagen

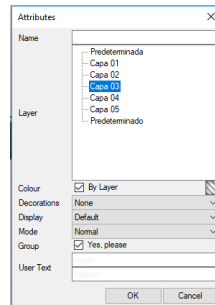


Figura 10. Menú de atributos.

- Agrupar el frente del marco con escaneo del voluntario, se hará referencia este nuevo grupo como grupo1 en el desarrollo de la guía

4 Adaptación de las varillas del marco

- Cierre Grasshopper
- Seleccionar el grupo1, emplear la vista superior, utilizando el gumball rotar 90° en el sentido de las manecillas del reloj
- Empleando la vista perspectiva y utilizando el comando mover acercarse al lateral izquierdo del marco, con la referencia de objeto activada para ubicar el punto medio de ese lateral como se muestra en la siguiente figura y llevar este punto al origen

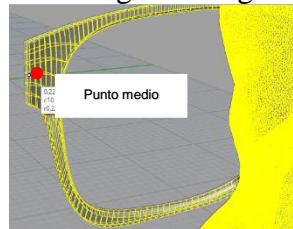


Figura 11. Punto medio del lateral del marco.

- Empleando la vista superior y el origen como centro de rotación rotar el grupo1 un valor de 5° en contra de las manecillas del reloj

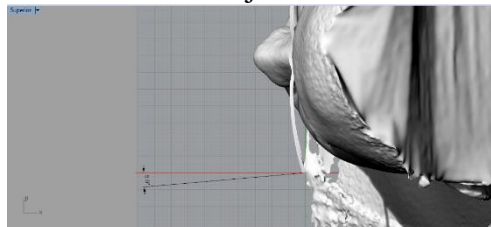


Figura 12. Rotación anti horaria 5° vista superior.

- Empleando la vista frontal y el origen como centro de rotación rotar 5° en contra de las manecillas del reloj el grupo1

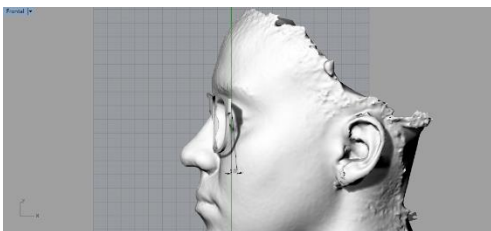


Figura 13. Rotación anti horaria 5° vista frontal.

- **Abrir el archivo de grasshopper llamado “varilla izquierda”**
- Al igual que en el frente los sliders se ubican en el lateral izquierdo de la pantalla de grasshopper y sus nombre indican la característica que modifican



Figura 14. Posición de los sliders varilla (izquierda) nombre de los sliders varilla (derecha).

- Ángulo pantoscópico: empujando la vista frontal. Los casos en los que es necesaria la modificación del este ángulo son: la fórmula del paciente lo requiere o una asimetría muy pronunciada de las orejas, si el voluntario de la adaptación posee alguna de esas características se modifica el ángulo con el slider y el grupo1 debe rotar con el origen como centro la misma magnitud que se le haya agregado o quitado en el slider la rotación se realiza de la misma manera que el *figura 13*, (en este caso no es necesario realizar esta modificación)
- En la vista derecha seleccionar el grupo1 y empleando el comando mover desplazarlo 2.5mm hacia la izquierda en el eje *y*
- Desde la vista frontal mover el grupo1 5mm hacia la izquierda
- En Grasshopper modificar la longitud de la varilla con el slider haciendo coincidir el plano 3 con el inicio de la oreja

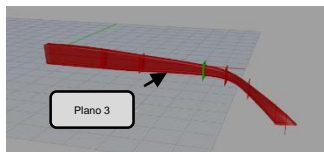


Figura 15. Planos de la varilla.

- Forma: utilizando la vista perspectiva emplear los sliders “*plano 1 a 7*” para modificar la forma de la varilla y adaptarla a la forma del cráneo del voluntario, la varilla debe acercarse al contorno de la cabeza en especial en la parte posterior de la oreja pero no se deben generar intersecciones

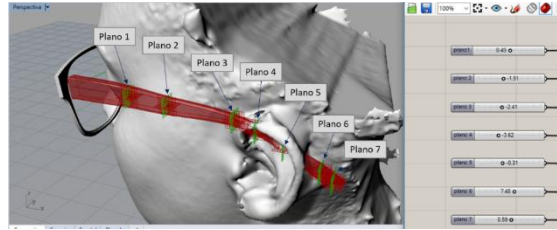


Figura 16. Adaptación de los planos.

- Una vez conforme con la adaptación de la varilla seleccione *bake* en la última casilla de la definición de grasshopper y repita las mismas indicaciones que se dieron para el frente

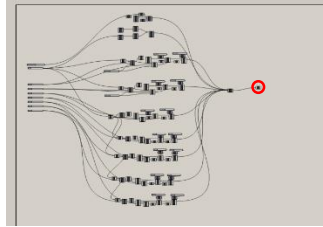


Figura 17. Posición ultima caja definición de la varilla izquierda.

- Agrupar el grupo1 y la varilla derecha, este nuevo grupo se llamará grupo2

4.1 Adaptación varilla derecha

Las indicaciones para esta adaptación son muy similares a las de la varilla izquierda, por ende se omitirán lagunas imágenes

- Empleando el comando mover llevar el punto medio del lateral derecho al origen
- Empleando la vista superior y el origen como centro de rotación rotar el grupo2 un valor de 10° en el sentido de las manecillas del reloj

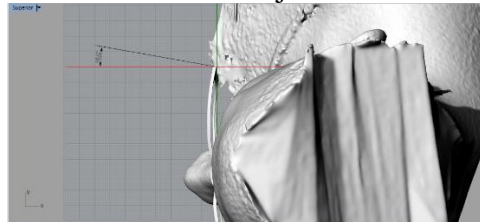


Figura 18. Rotación horaria 10° vista superior.

- Abrir el archivo de grasshopper llamado “varilla derecha”
- En la vista derecha seleccionar el grupo2 y empleando el comando mover desplazarlo 2.5mm hacia la derecha en el eje *y*
- Desde la vista frontal mover el grupo2 5mm hacia la izquierda
- La modificación de la longitud se logra tomando como referencia el plano 3 y el inicio de la oreja
- Forma: la adaptación de la forma se logra usando las instrucciones previamente dadas para la varilla izquierda
- Una vez conforme con la adaptación de la varilla seleccione *bake* en la última casilla de la definición de grasshopper y repita las mismas indicaciones que se dieron para el frente

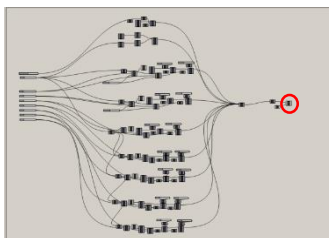


Figura 19. Posición ultima caja definición de la varilla derecha

Finalización de la prueba

Apéndice H. Encuesta aplicada durante la verificación física del marco.

Encuesta para determinar la satisfacción de los usuarios de gafas personalizadas



Nombre _____

Género: F — M _____ edad:

Usted fue voluntario para obtener una imagen digital 3D de su rostro mediante un escaneo facial 3D, este escaneo se realizó con el fin de llevar a cabo la adaptación de los marcos para lentes a la geometría específica del rostro del voluntario y cumplir con objetivo de este proyecto de grado, su marco personalizado fue impreso y le serán entregado. A continuación se le pedirá su colaboración respondiendo una serie de preguntas que servirán como base para la comprobación del proyecto, por favor tome las gafas, colóquelas y responda las preguntas que se presentan a continuación, este cuestionario consta de dos partes, la parte dos se encuentra al respaldo de la hoja.

Parte 1

1) ¿Se siente cómodo con las gafas?

- Si
- no

2) ¿Siente que las gafas se deslizan?

- Si
- No

3) En comparación con sus gafas habituales ¿que preferiría?

- Preferiría usar este nuevo marco
- Preferiría seguir usando mi marco habitual

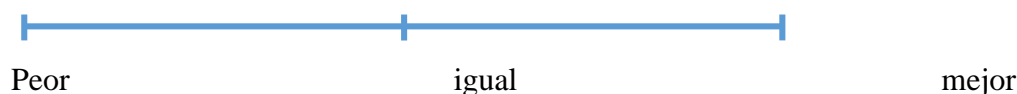
Parte 2

En esta sección de la encuesta va a comparar las gafas que regularmente utiliza con las gafas personalizadas. Se le pedirá que responda como se siente con las nuevas gafas a comparación de sus gafas habituales marcando sobre una línea, esta línea en su extremo izquierdo implica que con las nuevas gafas sintió un cambio negativo, en el extremo derecho que sintió un cambio positivo y el centro que no hay diferencia alguna



- Pregunta 1

¿Cómo se siente con el nuevo apoyo de la gafas en su nariz?



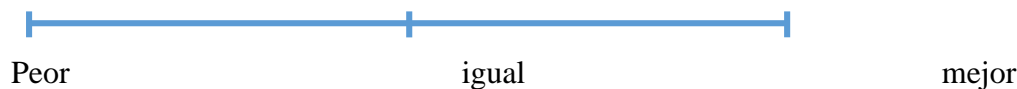
- Pregunta 2

¿Cómo se siente con el apoyo de las varillas en sus orejas?



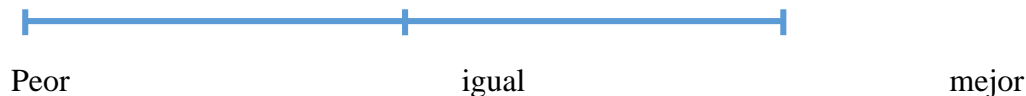
- Pregunta 3

¿Cómo siente el ajuste de las varillas contra su cabeza? es decir la seguridad o estabilidad del marco



- Pregunta 4

¿Cómo se siente con el tamaño del marco?



Apéndice I. Encuesta realizada a voluntarios de la prueba de adaptación.

Prueba de verificación de proceso de diseño en software CAD



Nombre _____

Género: F — M edad: _____

La siguiente prueba busca verificar el proceso que se lleva a cabo para realizar la adaptación del marco desarrollado en este proyecto al rostro de un voluntario, esta adaptación emplea la herramienta CAD rhinoceros y su plugin grasshopper, se le proporcionara los archivos necesarios para realizar la adaptación y el manual que le indicara paso a paso las acciones que debe realizar, por favor responda las preguntas 1 a 4 antes de iniciar el proceso de adaptación, informe al encargado de la prueba cuando finalice las preguntas para empezar a tomar el tiempo al finalizar la adaptación responda las preguntas 5,6 y 7.

1) Seleccione dentro de las siguientes fuentes de capacitación a las que ha tenido acceso:

- Asesor comercial (Curso)
- Clase de su programa de pregrado
- Amigos o compañeros
- Video Tutoriales
- Manuales
- Trabajo independiente

2) Señale entre las siguientes las operaciones que ha utilizado para modelar en rinconeros

- Generación de superficies
- Generación de volúmenes
- Operaciones de corte
- Operaciones con matriz
- Operaciones de barrido
- Edición de malla poligonal
- Conversión de malla a Nurbs
- Fluir
- Edición de jaula
- Parametrización

3) Entre las siguientes opciones señale las herramientas que sabe utilizar de este programa

- mover
- rotar 2D
- superficie por red de curvas
- extruir
- proyectar curva
- crear agujero

- tubería
- transición plugin grasshopper

En este momento puede iniciar el proceso de adaptación, por favor avise al encargado de la prueba.

- 4) tiempo que tomó realizar la adaptación en minutos

- 5) indique que tan difícil fue comprender las indicaciones del manual en una escala de 1 a 10 donde 1 es muy fácil y 10 muy difícil



Muy fácil
muy difícil

- 6) indique el Grado de complejidad de la tarea de adaptación en una escala de 1 a 10 donde 1 es poco compleja y 10 es muy compleja



Poco compleja
compleja

muy

Apéndice J. Pruebas de impresión en estereolitografía

La impresión en resina fotosensible presenta una precisión muy superior a la impresión de filamento, sin embargo la fragilidad de la resina luego del curado, es bastante elevada haciendo imposible el montaje de los lentes en el marco, en la siguiente imagen se aprecia una fractura del marco, dicha fractura fue generada por una presión inferior a la del montaje del lente, la cual fue ejercida en la zona central de aro.

