

**BIOTECNOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN
DE PRÓTESIS OCULARES**

**DENICE ARIZA ÁVILA
JESSICA ESPINOSA BUENO
GRETHEL NARANJO VÁSQUEZ**

**UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE MEDICINA
PROGRAMA DE OPTOMETRÍA
BOGOTÁ D.C.
2023**

**BIOTECNOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN
DE PRÓTESIS OCULARES**

**DENICE PATRICIA ARIZA ÁVILA
JESSICA PAOLA ESPINOSA BUENO
GRETHEL IBETH NARANJO VÁSQUEZ**
Trabajo de grado para optar al título de Optómetra

**DIRECTOR DISCIPLINAR
ALEJANDRA MENDIVELSO SUÁREZ**
Optómetra

**DIRECTOR METODOLÓGICO
DIANA GARCIA LOZADA**
Optómetra

**UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE MEDICINA
PROGRAMA DE OPTOMETRÍA
BOGOTÁ D.C.
2023**

PÁGINA DE APROBACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO

Los suscritos directores con base en los criterios científicos, metodológicos, éticos y después de haber revisado el documento denominado:

“Biotecnología para la fabricación de prótesis oculares”

Presentado como requisito de grado por los estudiantes:

**Ariza Ávila Denice Patricia
Espinosa Bueno Jessica Paola
Naranjo Vásquez Grethel Ibeth**

Para optar al título de:

OPTÓMETRA

Deciden asignar al documento presentado la calificación de:

APROBADO

Firmado en Bogotá D.C, el 27 del mes de septiembre de 2023



ALEJANDRA MENDIVELSO SUÁREZ
DIRECTORA DE TRABAJO DE GRADO
PROGRAMA DE OPTOMETRÍA

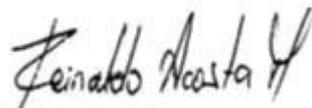


DIANA GARCIA LOZADA
DIRECTORA DE TRABAJO DE GRADO
PROGRAMA DE OPTOMETRÍA

En constancia de lo anterior firman la Coordinadora Académica y el Director del Programa de Optometría



ALEJANDRA MENDIVELSO SUÁREZ
COORDINADORA ACADÉMICA
PROGRAMA DE OPTOMETRÍA



REINALDO ACOSTA MARTÍNEZ
DIRECTOR
PROGRAMA DE OPTOMETRÍA

NOTA DE SALVEDAD DE RESPONSABILIDAD INSTITUCIONAL

“La Universidad El Bosque no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia”.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a las Doctoras Diana García y Alejandra Mendivelso, por su labor como tutoras durante la elaboración de este trabajo de grado, donde nos demostraron no solo un gran conocimiento, sino también una comprensión y empatía sin las que el trabajo no hubiera sido posible, también agradecemos profundamente a la Dra. Ana Milena Olave, por la orientación espacio, tiempo y sobre todo, por ser fuente de información verídica con base a su experiencia profesional y académica, para poder así concluir un trabajo de grado exitoso.

LISTA DE TÍTULOS Y SUBTÍTULOS

INTRODUCCIÓN	11
1. CAUSAS DE PÉRDIDA DEL GLOBO OCULAR	12
1.1 Enfermedades congénitas	12
1.1.1 <i>Coloboma de iris</i>	12
1.1.3 <i>Microftalmia y anoftalmia</i>	13
1.1.4 <i>Afaquia congénita</i>	14
1.2 Enfermedades sistémicas, tumores o infecciones	14
1.2.1 <i>Retinoblastoma</i>	14
1.3 Traumatismos, accidentes domésticos y laborales	15
1.3.1 <i>Úlcera corneal</i>	15
1.3.2 <i>Penetración/ruptura del globo ocular</i>	15
1.3.3 <i>Cuerpo extraño intraocular o intraorbitario</i>	16
1.3.5 <i>Celulitis orbitaria</i>	17
2. FUNDAMENTOS PARA LA ADAPTACIÓN DE PRÓTESIS OCULARES	17
3. ADAPTACIÓN DE PRÓTESIS OCULARES	18
3.1 Toma de impresión, caja de prueba y mixta	18
3.1.1 <i>Toma de impresión</i>	18
3.1.2 <i>Caja de pruebas</i>	18
3.1.3 <i>Mixta</i>	19
4. FABRICACIÓN DE PRÓTESIS OCULARES	19
4.1 Fotocurado	19
4.2 Polimerización	19
4.3 Caracterización y terminado de la prótesis, pintura, vasos, pupila, córnea, pulido y terminado	20
4.3.1 <i>Pintura</i>	20
4.3.2 <i>Pulido y terminado</i>	20
5. IMPRESIÓN DE PRÓTESIS OCULARES EN 3D	20
5.1 Toma de medidas	21
5.1.1 <i>Plantilla del negativo</i>	21
5.1.2 <i>Tomografía computarizada</i>	22
5.2 Proceso de escaneo de plantilla	22
5.3 Alistamiento del software	22
5.4 Proceso de impresión	22
5.4.1 <i>Proceso de curado</i>	22
5.4.2 <i>Proceso de sublimación</i>	23
5.5 Proceso de recubrimiento y pulido	23
6. PROCESO CAD/CAM	23
6.1. Fabricación aditiva por medio de impresoras 3D	24
6.1.1 <i>Incremento de la productividad de diseño</i>	25
6.1.2 <i>Análisis de diseño</i>	25

7. ESCÁNER GRÁFICO 3D	25
7.1 Escáner 3D de contacto y no contacto	26
7.1.1 <i>Escáner pasivo y activo</i>	26
7.1.2 <i>Reconstrucción de la pieza tridimensional</i>	26
8. ESCÁNER 3D LÁSER	26
8.1 Escáner basados en forma de luz emitida	26
8.1.1 <i>Triangulación óptica</i>	26
8.1.2 <i>Luz estructurada</i>	27
8.2 Escáner basados en el cálculo del tiempo	27
8.2.1 <i>Medición de pulsos</i>	27
8.2.2 <i>Diferencias de fases</i>	27
8.2.3 <i>Interferometría</i>	28
8.3 Escáner basados en la capacidad de barridos	28
8.3.1 <i>Cámara</i>	28
8.3.2 <i>Panorámica</i>	28
8.3.3 <i>Híbrida</i>	28
8.4 Escáner en base a su rango de acción	29
8.4.1 <i>Escáner láser dinámicos</i>	29
8.4.2 <i>Escáner láser estáticos</i>	29
9. MODELADO 3D	29
9.1 Modeladores NURBS	30
9.1.1 <i>Modeladores de malla poligonal</i>	30
9.1.2 <i>Modeladores paramétricos</i>	30
9.1.3 <i>Modeladores sólidos</i>	30
10. CONCLUSIÓN	31
11. REFERENCIAS	31

RESUMEN

Las prótesis oculares abarcan un campo especial de la salud visual, ya que se encarga de devolver al paciente confianza en sí mismo a través de estos dispositivos médicos, los cuáles han avanzado de manera importante; en la actualidad brindan al paciente prótesis casi exactas a su globo ocular real, gracias a la implementación de biotecnología e impresión 3D. Cada vez son más las personas que optan por esta alternativa ya que también impacta de manera positiva la autoestima de los usuarios de prótesis oculares.

El proceso de fabricación de las prótesis oculares es personalizado para cada paciente, ya que cuenta con las características propias del globo ocular. También, la adaptación es parte fundamental para que el proceso sea exitoso; enseñar al paciente los cuidados que debe tener, el uso, lavado y desinfección de este dispositivo médico también juega un papel importante, permitiendo así que el paciente se familiarice más y pueda desenvolverse de manera efectiva en su entorno.

Palabras clave: Prótesis oculares, tecnología, ojo, impresión 3D, fabricación, anoftalmia, trauma ocular, software, dispositivo médico, población

ABSTRACT

Eye prosthesis covers a special field of visual health, since it is responsible for restoring the patient's self-confidence through these medical devices, which have advanced significantly; They now provide patients with nearly accurate prostheses to their real eyeball, thanks to the implementation of biotechnology and 3D printing. More and more people are opting for this alternative as it also positively impacts the self-esteem of eyepiece users. The manufacturing process of the eyepieces is customized for each patient, as it has the characteristics of the eyeball.

The manufacturing process of the eyepieces is customized for each patient, as it has the characteristics of the eyeball. Also, adaptation is a fundamental part of making the process successful; teaching the patient the care they should have, using, washing and disinfecting this medical device also plays an important role, thus allowing the patient to become more familiar and be able to function effectively in their environment.

Keywords: Ocular prosthesis, technology, eye, 3D printing, manufacturing, anophthalmia, eye trauma, software, medical device, population

INTRODUCCIÓN

Las prótesis oculares tienen como objetivo principal la reparación estética y la protección del área afectada; tienen como fin apoyar en la terapia psicológica a personas que han sufrido algún trauma o enfermedad de alta magnitud que conlleve a la ceguera total y/o enucleación. La pérdida de alguna parte del cuerpo no será un proceso fácil de aceptar, pues implica adaptación y reinserción social, ya que las personas como consecuencia de esta pérdida cambian su estilo de vida por temor al rechazo en el momento de salir a la calle y convivir con más personas. Esto es más notorio cuando se trata de la falta de alguna estructura en el rostro, como lo son los ojos, ya que aparte de que este órgano proporciona capacidad visual, también cumple un papel estético y a su vez es parte del lenguaje corporal ya que complementa muchas veces lo que con palabras no podemos expresar (1).

Según un estudio realizado en el año 2017 llamado Characterization of Eyeball Loss in Four Cities of Colombia, casi el 63% de los datos pertenecían a pacientes masculinos. La pérdida del globo ocular fue más frecuente en pacientes mayores de 40 años. El 51% de los pacientes sufrió pérdida del globo ocular por causas traumáticas, el 40,2% por causas patológicas y el 4,6% por anomalías congénitas. Las causas específicas más frecuentes fueron el glaucoma (19%), el cáncer ocular (15,4%) y los accidentes domésticos (11,2%). Alrededor del 60% de los pacientes anoftálmicos pertenecían a un nivel socioeconómico bajo (28).

El diseño de prótesis oculares en modelos digitales 3D aporta al paciente mayor desempeño en cuanto al movimiento, estabilidad y confort, creando a su vez una prótesis personalizada con mejores tiempos de elaboración y costo final, de esta manera será un nuevo mercado el cual se va a expandir llegando cada vez a más personas, el proceso de fabricación de prótesis oculares en la actualidad se desarrolla como un dispositivo médico artificial que se fabrica en polimetilmetacrilato por sus características físico químicas, y de biocompatibilidad (2).

Por medio de este trabajo de investigación se busca identificar el proceso de creación y adaptación de prótesis oculares, haciendo especial énfasis en el uso de la biotecnología para la fabricación de estas, permitiendo así la creación de prótesis más personalizadas, con características específicas y pequeños detalles que se pueden llevar a cabo gracias a la implementación de la impresión 3D. A su vez se busca identificar la experiencia por parte de los pacientes que han tenido la oportunidad de conocer esta tecnología e incluirla en sus vidas, por otro lado uno de los principales objetivos es identificar las causas más comunes de pérdida del globo ocular, ya que en nuestro país la causa principal es debido a la violencia, sin embargo se desconoce un poco las causas congénitas y en esta revisión se verán explicadas (2).

1. CAUSAS DE PÉRDIDA DEL GLOBO OCULAR

Como factor de riesgo principal en la población infantil se encuentra el retinoblastoma congénito, el cual es un tipo de cáncer ocular que afecta directamente la retina, que es la capa interna del ojo (3).

Por otro lado, la población infantil puede llegar a ser la más propensa a sufrir pérdida del globo ocular debido al mal uso de juguetes de uso diario, los cuales cuentan con partes que pueden resultar peligrosos, pero pasan desapercibidos por los padres (2).

Las tres causas principales que conllevan a la pérdida del globo ocular son enfermedades congénitas, enfermedades sistémicas, tumores e infecciones, y traumatismos, accidentes domésticos y laborales (4).

1.1 Enfermedades congénitas

1.1.1 Coloboma de iris

Los colobomas oculares congénitos se deben al cierre defectuoso de la fisura fetal durante la organogénesis, entre la quinta y séptima semana de gestación. La afectación ocular puede ser variable, desde una simple hendidura del iris hasta una afectación más grave del polo posterior (coloboma del nervio óptico, coroides, retina). Hasta la actualidad se conoce como una condición rara con incidencia de 2.4- 8.0/100, 000 nacidos vivos. Se han reportado casos de coloboma en un 0,6 - 1,9% en adultos ciegos en Canadá y del 3,2 - 11,2% en niños ciegos a nivel mundial (5,6).

1.1.2 Catarata congénita

Es un estado en el cual el cristalino se torna opaco durante la vida intrauterina. Aunque esta anomalía es de origen genético, en 1941 Gregg observó que los niños nacidos de mujeres que habían padecido de rubéola entre la 7 y 14 semanas de embarazo presentaban a menudo catarata. Sin embargo, si la rubéola la había atacado después de la séptima semana de gestación, el cristalino no sufría lesión, pero el niño con frecuencia.

Se ha estimado que dentro de las causas de ceguera en los niños la catarata congénita e infantil se presenta entre un 10 a 30% de los casos, en EUA se reporta en 1 de cada 2000 nacidos vivos en alguna de sus formas. En América Latina se estima en 1 de cada 200 a 300 nacimientos por año y representa 10 casos nuevos por un millón de habitantes al año, siendo responsable de 5 a 20% de las causas de ceguera durante la infancia (7).

La transmisión autosómica dominante es la más frecuente, aunque se han identificado varias clases de genes responsables de codificar proteínas del cristalino como lo son: cristalino, conexinas, aquaporinas, proteínas del esqueleto y reguladores del desarrollo, lo que puede afectar la transparencia y el alto índice de transmisión ya que estas dependen de la disposición regular de las fibras lenticulares y a su vez, del equilibrio homeostático (7).

1.1.3 Microftalmia y anoftalmia

La microftalmia (órbita con un ojo hipoplásico) y la anoftalmia (ausencia completa del globo ocular) son dos malformaciones a nivel orbitario ya sea de forma congénita o adquirida, que conllevan la pérdida de la función. Específicamente, la anoftalmia congénita se refiere a cualquier órbita que contiene un ojo severamente hipoplásico al nacimiento (definición de microftalmia) o una ausencia completa del globo ocular debido al fracaso de formación de la vesícula óptica, y la anoftalmia adquirida de la órbita es aquella originada por trauma o un tumor. El microftalmo congénito es más común que la anoftalmia congénita, observándose una prevalencia de 1.2 y 1.8:10.000 nacimientos respectivamente, en poblaciones blancas. Otros estudios señalan una prevalencia de 1.4 a 3.5:10.000 nacimientos para el microftalmos y 0.3 a 0.6:10.000 nacimientos para anoftalmia (8).

La microftalmia se puede asociar con otras anomalías congénitas, las cuales también pueden asociarse a algún quiste ocular o también llamado microftalmia quística lo cual es el resultado de un cierre incompleto de la fisura óptica. Se ha determinado que algunos genes y sus mutaciones son causa de malformaciones a nivel ocular y a su vez el motivo de microftalmia y anoftalmia entre el 18% y 25% de los casos presentados. Los genes relacionados con el desarrollo de microftalmia son: SOX2, SIX3, OTX2, RAX, CHX10, GDF6, FOXE3, GDF3, STRA6, por otro lado, los genes que tienen relación con la anoftalmia son: ALDH1A3, ATOH7, RARB y PAX6 (8).

1.1.4 Afaquia congénita

Es un defecto ocular congénito presente al nacimiento con ausencia del cristalino como resultado de un fallo en la inducción del cristalino desde el ectodermo superficial e interrupción del desarrollo del mismo. La afaquia se asocia a menudo con otras anomalías oculares, como aplasia/displasia del segmento anterior del ojo, microftalmia y glaucoma. Está causada por variantes del gen FOXE3. La mayoría de los casos son autosómicos recesivos. Es importante señalar que tanto las variantes dominantes como recesivas de FOXE3 están asociadas con un fenotipo mixto variable de trastornos oculares del desarrollo que incluyen disgenesia del

segmento anterior, microftalmia, anomalía de Peters, esclerocorneal, catarata de inicio temprano, glaucoma y coloboma ocular (9).

Las propiedades ópticas del ojo de un niño áfaco son totalmente diferentes a las de un adulto, por tal motivo sigue siendo hoy en día un gran reto para los profesionales de la salud visual por tal motivo es de vital importancia dar un diagnóstico oportuno y emplear un plan de tratamiento inmediato. Hoy en día existen diferentes opciones para la corrección óptica en niños afáquicos como lo son: lentes oftálmicos afáquicos, lentes de contacto para afaquia, implante de lente intraocular primario o secundario según sea el caso (9).

1.2 Enfermedades sistémicas, tumores o infecciones

1.2.1 *Retinoblastoma*

Es un tumor que se produce en los conos de la retina, poco diferenciado, que suele presentarse en niños durante los primeros años de vida. Se debe a defectos en el gen del retinoblastoma RB1, cromosoma 13q14, este gen es el encargado de codificar una fosfoproteína reguladora del ciclo celular =RB1 gen supresor tumoral (3).

Los portadores tienen un 90% de probabilidad de desarrollar retinoblastoma en la infancia y más adelante otro tipo de cánceres, esto se manifiesta en 2 formas, de forma esporádica o no heredada o de forma familiar heredada. Es el segundo tumor intraocular más frecuente, luego del melanoma de coroides, en todos los grupos etarios, su diagnóstico tardío puede llevar a la pérdida del globo ocular (3).

1.3 Traumatismos, accidentes domésticos y laborales

Las lesiones corneales no penetrantes por cuerpo extraño se presentan con frecuencia y pueden llegar a desencadenar en complicaciones graves como infiltrados corneales o úlceras. Se ha demostrado que este tipo de lesiones se presenta con mayor frecuencia en hombres y durante horarios laborales relacionados con la metalurgia, las razones se deben principalmente a que los trabajadores no usan sus elementos de protección, tales como las gafas de seguridad o incluso también se presenta por distracción al momento de manipular los equipos (24).

1.3.1 *Úlcera corneal*

Es una llaga en la córnea que puede ser causada con mayor frecuencia por una infección ocular, ya sea provocada por bacterias, hongos, virus o parásitos. Las úlceras pueden comenzar como una lesión en la córnea, la cual puede trascender hasta llegar al punto de

infectarse, son consideradas una emergencia oftalmológica debido a que su diagnóstico y tratamiento debe ser preciso para evitar llegar a afectar la visión de manera permanente o incluso perforar el ojo (10).

Aunque las úlceras pueden ser estériles, se conoce que la mayoría de estas son de etiología infecciosa lo cual lleva a que se genere una ruptura traumática en el epitelio corneal permitiendo así la entrada de agentes infecciosos. Generalmente el sexo masculino es el mayor afectado teniendo en cuenta que con mayor frecuencia son quienes realizan trabajos relacionados con metalurgia o incluso agricultura ya que se han identificado como ocupaciones de riesgo frente a estos casos (10).

1.3.2 Penetración/ruptura del globo ocular

El estallido o rotura del globo ocular constituye un grave accidente que en muchas ocasiones conlleva a la enucleación. A consecuencia de un trauma contundente intenso, se produce aumento de la presión ocular de forma súbita, con ruptura de los sitios de menor resistencia: limbo esclerocorneal, alrededor del nervio óptico y de la lámina cribosa, a nivel de la inserción de los músculos extraoculares y en la córnea, cuando hay antecedentes de queratotomía con fines refractivos o a través de la incisión de una cirugía anterior. Esta fuerza abre la pared en un punto débil, que puede o no, ser el sitio del impacto (11).

1.3.3 Cuerpo extraño intraocular o intraorbitario

Cuerpo extraño intraorbitario (CEIOrb) es un término que se utiliza para definir todo material extraño que penetra en la cavidad orbitaria, por fuera del globo ocular; Son una causa poco frecuente de morbilidad siendo más frecuentes en jóvenes. La sintomatología asociada a este trastorno puede ser muy variable, dependiendo de la composición del cuerpo extraño, de su tamaño y de la velocidad de impacto en la órbita (12).

El principal tratamiento en pacientes con traumatismo por cuerpo extraño intraorbitario es la extracción del cuerpo extraño, dado el riesgo de afectación del globo ocular y posibles complicaciones como infecciones secundarias, inflamación orbitaria severa, osteomielitis e incluso absceso cerebral. Sin embargo, teniendo en cuenta si el cuerpo extraño es orgánico o inorgánico, es necesario evaluar si genera manifestaciones clínicas o no, ya que su extracción puede causar complicaciones durante la exploración quirúrgica debido a que los objetos orgánicos se asocian en su mayoría a respuestas inflamatorias y abscesos posteriores (27).

Los estudios de imagen, principalmente la tomografía computada, son un arma importante para el diagnóstico y ayuda para la toma de decisiones. El retiro quirúrgico está indicado en

todos los cuerpos extraños de tipo orgánico. Aquellos que son inorgánicos se retiran en caso de estar provocando complicaciones o si están localizados anteriormente. Si están localizados en la región posterior, no se debe intentar una cirugía a menos que estén causando serias complicaciones orbitarias. Todos los pacientes deben recibir antibioticoterapia por el alto índice de infecciones orbitarias secundarias (27).

1.3.4 Oclusión de la arteria central de la retina

La oclusión de una arteria retiniana (OAR) es un bloqueo en una o más de las arterias de la retina, es una pérdida de visión monocular súbita frecuentemente irreversible, análoga a la isquemia cerebral aguda. Este bloqueo se debe a que hay un coágulo u oclusión dentro de una arteria, o una acumulación de colesterol en una arteria (13). Existen dos tipos de OAR: La oclusión de una rama de la arteria retiniana, u ORAR, bloquea las arterias pequeñas de la retina y por otro lado, la oclusión de la arteria retiniana central, u OARC, bloquea la arteria central de la retina. Este es un tipo de derrame y debe ser tratado inmediatamente (13).

1.3.5 Celulitis orbitaria

La celulitis orbitaria es una infección que se produce en los párpados, específicamente en el tejido que se encuentra por detrás del tabique orbitario afectando a los párpados, las cejas y la mejilla. El tabique orbitario divide los tejidos blandos del párpado (espacio preseptal) de los de la órbita (espacio postseptal). En la celulitis orbitaria la infección se localiza posterior al tabique orbitario y generalmente ocurre como una complicación de la sinusitis aguda o crónica. Este tipo de afección suele afectar a niños menores de 5 años y generalmente es causada por infecciones externas que provienen de los senos paranasales o los dientes, por virus del herpes o por picaduras de insectos. La infección se caracteriza por avanzar muy rápido y, si no se detiene a tiempo, puede perjudicar la salud ocular hasta el punto de causar ceguera (14).

2. FUNDAMENTOS PARA LA ADAPTACIÓN DE PRÓTESIS OCULARES

Para obtener un implante ocular, debe mostrar una serie de características, incluida la biocompatibilidad, reemplazo de volumen adecuado, con soporte adecuado para la prótesis, costo asequible para el paciente, buena movilidad transmitida a la prótesis con una baja tasa de complicaciones. Una condición previa obligatoria debe ser el uso de materiales no tóxicos para producir implantes biocompatibles, esto con el fin de adaptarse a las necesidades anatómicas de cada paciente específico, actualmente están disponibles en el mercado implantes de diferentes tamaños; el precio depende principalmente del material empleado y

estilo del implante lo que hace que los precios sean bastante variables, entre paciente y paciente (2).

La implantación quirúrgica se puede facilitar envolviendo el implante dentro de una lámina de un material liso, este procedimiento se recomienda especialmente para implantes porosos caracterizados por una superficie porosa ligeramente irregular. Con el pasar del tiempo se han desarrollado diferentes estrategias para suturar los músculos extraoculares al implante para así mejorar la motilidad ocular, por ejemplo, el músculo puede unirse directa e independientemente al implante o suturarse juntos frente a él, a esto se le llama imbricación (2).

La fabricación de una prótesis ocular, comienza con la toma de una impresión de la cavidad anoftálmica; ésta permite que el ocularista pueda copiar la superficie posterior de la cavidad, para ayudar a una mejor conformación y movimiento de la fabricación final de la prótesis, dado a que el objetivo de este proceso es lograr una prótesis con apariencia normal y con buen movimiento, para así brindar máximo confort y restaurar completamente la función fisiológica de los órganos accesorios de los ojos (2).

3. ADAPTACIÓN DE PRÓTESIS OCULARES

3.1 Toma de impresión, caja de prueba y mixta

3.1.1 Toma de impresión

Consiste en sacar un molde de la cavidad, es decir, hay un cilindro y con ayuda de una jeringa, pasta de impresión, esto con el fin de llenar la cavidad ocular, la pasta se ajusta completamente y al endurecer se da una perfecta muestra topográfica de la cavidad, y así se obtiene la forma interior de la prótesis. Este método es muy conveniente, especialmente para órbitas deformadas o alguna cirugía mal evolucionada (15).

Este es el proceso por el cual se copia mediante la inyección de un material de impresión las características de una superficie; dichos materiales para la impresión son los elastómeros e hidrocoloides. La impresión de la cavidad es una práctica habitual en la fabricación de las prótesis oculares (15).

3.1.2 Caja de pruebas

Consiste en ir colocando dentro de la cavidad diferentes tipos de prótesis hasta encontrar aquella que se ajuste o adapte mejor, luego se buscará el color del iris y de la esclera

mediante un muestrario de tonalidades, hasta obtener los datos exactos con las características del ojo sano y poder así fabricar las prótesis oculares (15).

3.1.3 Mixta

Es una mezcla entre las dos formas de toma de medidas anteriores, se saca un molde con la impresión de la cavidad llenándola con pasta de impresión para copiar así las características de la superficie, posteriormente se hacen pruebas con diferentes tipos de prótesis para determinar finalmente cuál es la más conveniente para la cavidad y rostro del paciente (15).

4. FABRICACIÓN DE PRÓTESIS OCULARES

4.1 Fotocurado

Las lámparas de fotocurado son aquellas que emiten luz en cierta longitud de onda, esto, con el fin de endurecer las resinas y material usado para la fabricación de prótesis (29).

Las lámparas de fotopolimerización o también llamadas lámparas de fotocurado se utilizan en la fabricación de prótesis oculares para fotopolimerizar los materiales utilizados, estos se activan mediante una fuente de luz de alta intensidad que provoca el endurecimiento de los mismos en un corto lapso de tiempo. Toda lámpara de fotocurado logra su objetivo por medio de la emisión de energía. Esta energía se muestra en forma de luz para activar los fotoiniciadores y así lograr polimerizar las resinas sean estas compuestas, resinas fluidas, cementos resinosos, adhesivos dentinarios o sellantes de fosas y fisuras (2).

4.2 Polimerización

Se realiza después de obtener el diseño con el modelo de la cavidad, dando origen así a un nuevo modelo realizado en polimetilmetacrilato con dimensiones y forma específica, dando origen a lo que finalmente será la prótesis del paciente, posteriormente este modelo deberá pasar por el proceso de pulido y pintura (16).

4.3 Caracterización y terminado de la prótesis, pintura, vasos, pupila, córnea, pulido y terminado

4.3.1 Pintura

Con el modelo de polimetilmetacrilato se deben tomar medidas directamente de la cavidad del paciente para poder evaluar cómo se adecua dentro de esta, a su vez evaluar el movimiento de los párpados y tamaño de la prótesis con relación a la órbita y el ojo

contralateral. Las medidas que se deben tomar son el diámetro del iris y el centro pupilar, para posteriormente proceder a determinar el color y lograr un resultado óptimo, esto se debe realizar con buena iluminación incluyendo la luz solar (2).

Las pinturas usadas son acrílicas, como lo son vinilos, esmaltes o acuarelas, esto lo determina el fabricante ya que es un proceso artístico y dependerá de la destreza de este con el material empleado, a su vez los pinceles que se utilizan son de bajo calibre por la precisión de los detalles pequeños como los vasos sanguíneos esclerales, la pupila, nevus, arcos seniles y las criptas en el iris. Culminado este paso se aplica una nueva capa de polímero y se procede a polimerizar nuevamente mediante calor, de tal forma se tiene una prótesis semi terminada, lista para pasar por el pulido (2).

4.3.2 Pulido y terminado

Este último paso tiene como finalidad eliminar la porosidad y rugosidad de la prótesis, lo que a su vez aportará resistencia a la corrosión y al deslustre generando que disminuya la aparición de depósitos bacterianos, esto es gracias que se busca lograr una superficie lisa, esta como consecuencia retiene menos partículas, permite que la lágrima se deslice con facilidad, reduce la interacción con el tejido conjuntivo, ayuda a disminuir reacciones alérgicas e inflamatorias, aumenta el confort en el paciente e incrementa la tolerancia con el tejido (2).

5. IMPRESIÓN DE PRÓTESIS OCULARES EN 3D

El proceso comienza realizando un modelo virtual del dispositivo que se quiere imprimir, también se tiene en cuenta cuál será la materia prima utilizada al momento de la fabricación. Toda esta información es enviada a la impresora 3D que materializa el modelo a través de la superposición de estas capas hasta obtener una representación física del modelo digital (2). La impresión 3D es un proceso de fabricación aditiva, en el que se depositan diversos materiales como plástico y metal entre otros, capa por capa, para producir un objeto 3D. Para realizar este proceso, es necesario contar con un software de diseño digital asistido por computador que se envía a una impresora 3D, para producir el objeto físico deseado con la posibilidad de recrear estructuras complejas (25).

La fabricación en impresión 3D permite el diseño rentable de instrumentos, dispositivos terapéuticos y de diagnóstico creados específicamente para pacientes individuales que lo requieran debido a la pérdida del globo ocular. Los avances en la bioimpresión parecen ser el futuro de la impresión 3D en el cuidado de la salud en general, en la optometría y oftalmología en particular, con la posibilidad de imprimir prótesis oculares y con esto se

espera que las diversas aplicaciones (software) de la impresión 3D en optometría y oftalmología se conviertan en parte de la medicina convencional (26).

5.1 Toma de medidas

Es el principal paso ya que este constituye la base de la fabricación determinando así la forma y el tamaño de la prótesis, para ello existen dos técnicas para llevar a cabo este proceso las cuales son: toma de plantilla del negativo y escaneo por tomografía computarizada (17).

5.1.1 Plantilla del negativo

El proceso inicia al llenar una jeringa con 20 ml de silicona de alta densidad, después de esto se une la bandeja de moldeo con la jeringa y se introduce a la cavidad orbitaria y se instila la silicona para que tome el molde negativo con todas las formas y características de la cavidad (17,18).

5.1.2 Tomografía computarizada

Se realiza una tomografía computarizada de la cavidad orbitaria, la cual arroja todos los datos topográficos de la cavidad ocular para después utilizar esta información e introducirla en el software Cura 3D (18).

5.2 Proceso de escaneo de plantilla

Con el negativo obtenido, se coloca la plantilla en la base del escáner, dando así inicio a la recolección de imágenes en formato Gcode, y posteriormente ser llevado al software cura 3D. Este paso es importante ya que será el objeto físico de la plantilla del negativo en un modelo 3D, de esta manera la impresora y el software reconocen la forma y así obtener la plantilla del negativo (17).

5.3 Alistamiento del software

Mediante el formato Gcode obtenido en el scanner, se inicia el programa Cura Ultimaker y se carga el archivo con la información obtenida en el proceso anterior; una vez que el formato Gcode este subido al programa, el software lo reconocerá y se podrá evidenciar la plantilla del negativo en la interfaz (18).

5.4 Proceso de impresión

La impresora empieza a ejecutar con el comando de inicio, de esta manera empezará a realizar movimientos y el extrusor a instilar el filamento (PLA-PMMA), así se va llevando a cabo la impresión de manera que se va formando capa sobre capa para finalmente obtener la plantilla del negativo; en esta fase se evidencia la prótesis materializada, dado que se aprecia la transformación en físico de la plantilla del negativo, pero esta vez en el material escogido, ya sea PMMA o PLA (18).

5.4.1 Proceso de curado

La pieza obtenida en el proceso de impresión, debe ser humedecida con acetona por alrededor de 5 minutos , esto se lleva a cabo para eliminar los saltos y detalles imperfectos de la impresión; es un paso enfocado en el detalle y la calidad de la superficie de la prótesis, durante el proceso de impresión es inevitable que no se generen saltos en el filamento , dejando así residuos de material, con la aplicación de acetona se realiza un depurado eliminando excesos de material , de esta manera se obtiene una pieza libre de poros y lisa (18).

5.4.2 Proceso de sublimación

Esta fase se lleva a cabo tomando un foto del ojo funcional del paciente , de esta manera se hará un réplica exacta modificando las dimensiones y características, paso siguiente es realizar la impresión litográfica de la foto en un papel especial de calcado para sublimación, luego se coloca la pieza obtenida en la fase de curado, sobre el papel sublimado dentro de la máquina de calefacción, de esta manera se unen los colores a la pieza impresa en 3D, obteniendo de esta manera las características estéticas y los detalles del ojo contralateral (17,18).

5.5 Proceso de recubrimiento y pulido

Es la última fase del proceso, se lleva a cabo con el sumergimiento de la pieza en PMMA en una reacción de calentamiento; esto con el fin de crear una capa de biocompatibilidad y un acabado brillante, el objetivo de esta fase es obtener una superficie libre de poros y completamente lisa, donde se imite el efecto de lubricación de la película lagrimal en la superficie ocular y elimine la fricción que se genere con el parpadeo y así mismo evitar el rechazo en la adaptación (16).

6. PROCESO CAD/CAM

El proceso CAD (Computer Aided Design) es asistido por medio de una computadora, en la cual el diseñador crea una representación gráfica digital de la pieza o el producto, empleando un software especializado de modelado. Durante los años 2000 se amplió la diversificación de las capacidades de la terminación y calidad de realce de los materiales inmersos en la digitalización, se introdujeron una gran variedad de colores y texturizados, incluso se llegó a mejorar la calidad de gráficas de diseño de los modelos iniciales a partir del mejoramiento de los computadores, es aquí en donde a partir del año 2010 en adelante se crean por computadora modelos mucho más elaborados que tienen una mayor similitud con los modelos de elaboración física (19).

6.1. Fabricación aditiva por medio de impresoras 3D

Se define como el conjunto de procesos usados para fabricar un objeto tridimensional en forma física, conocido también como prototipo rápido aplicado a cualquier área del conocimiento, este procedimiento se realiza mediante la aplicación de un material capa por capa a temperatura ambiente, por medio de un sistema computarizado (19).

Para la fabricación de figuras por medio de impresión 3D, se requiere de un archivo cuya base estructural es un modelo tridimensional virtual viable, para la utilización en medicina son necesarios los estudios de imagen del paciente para crear así el molde a su medida, esto es una representación digital de lo que se desea imprimir mediante un programa computarizado para así poder moldearlo (19).

El modelado por computadora es un proceso integrado más completo que el modelo físico ya que por ejemplo en el modelado por computadora se puede analizar al mismo tiempo el estudio del área, el volumen y el manejo de los materiales; además de otros aspectos, sin tener una pieza física terminada (19).

El proceso especializado CAM (Computer Aided Manufacturing) se define como la fabricación o elaboración de los productos finales. Está a cargo de maquinaria especializada controlada por un computador, lo que permite una elaboración mucho más rápida, de manera automatizada, más precisa y a menor costo que la elaboración convencional, lo que hace una producción mucho más eficiente; este tipo de manufactura pretende dar soporte en todas las fases de manufactura de un producto (19).

CAD y CAM pueden combinarse de manera funcional resultando así el denominado proceso directo CAD/CAM que permite enlazar directamente las bases de datos de los softwares de diseño de un producto con la ejecución y control de la fabricación de un producto (19).

Este tipo de procesos CAD/CAM brinda una perspectiva para la aplicación de ingeniería simultánea que básicamente busca enlazar y aun así solapar las actividades de ingeniería de producción de diseño y desarrollo de este; de esta manera se genera la cadena de proyección y simulación del diseño mecánico para obtener un patrón de control numérico que permita la comunicación entre el software de modelado y la máquina de moldeo o producción (19).

6.1.1 Incremento de la productividad de diseño

Modificación en tiempo real de las piezas de producción, lo cual permite que no sea necesario la reprogramación de equipos junto con la nueva pieza de elaboración, como sí ocurre por ejemplo los moldes.

6.1.2 Análisis de diseño

De igual manera el proceso de CAD/CAM permite evaluar mediante herramientas computo integrado denominadas CAE que tienen como objetivo la evaluación del desempeño estructural a nivel de la mecanización de las piezas. Lo cual permite que se determine de manera previa la funcionalidad del prototipo (19).

Actualmente existen diversos softwares gratuitos para modelado 3D de buena calidad; la gran variedad de software tales como: Blender, Sketchup, OpenSCAD, SolidWorks, Autocad entre otros, permite al usuario elegir el programa a su comodidad y de esta manera empezar a crear un diseño e imprimirlo (19).

Para diseñar una prótesis en 3D es necesario conocer las características y el funcionamiento, se describe la geometría tridimensional de la prótesis ya que muchos de estos archivos están codificados en binario de forma que son entendibles por la máquina y pueda así realizar el modelo a imprimir, se debe tener en cuenta que si el modelo no ha sido diseñado cuidadosamente y no cumple con las especificaciones tridimensionales puede salir con algunos defectos por lo que se sugiere tratar de corregirlos en el software antes de iniciar la marcha (30).

7. ESCÁNER GRÁFICO 3D

Un escáner digital 3D se define como un hardware o dispositivo de captura de imágenes que básicamente transfiere la información física espacial a un base de datos virtual similar en donde se reconstruye la imagen tridimensional por medio de una nube de puntos que al unirse configura la réplica exacta del objeto estudiado en un objeto virtual. Los escáneres 3D tienen

una clasificación de acuerdo con la funcionalidad y el método por el cual se pueda obtener la información requerida, como:

7.1 Escáner 3D de contacto y no contacto

Como indica su nombre que la sonda tenga algún tipo de acercamiento físico para realizar la recolección de la información; mientras que el escáner de no contacto sólo necesita de información lumínica en el software para realizar la construcción vital de las piezas (20).

7.1.1 Escáner pasivo y activo

Aprovecha la luz ambiente que refleja en el objeto, junto con el concepto de profundidad para la captura de la información gráfica; y el pasivo emite energía lumínica con el fin de detectar la posición del objeto, todo esto sucede gracias al principio de reflexión de la información luminosa que a manera de puntos precisa la luz (20).

7.1.2 Reconstrucción de la pieza tridimensional

Este tipo de escáner presenta una mayor capacidad de captura de detalles, manteniendo sus características físicas, como lo son la altura, el volumen y la dimensión, aunque presenta dificultades para acoplarse a figuras complejas, logra la reconstrucción de esta (20).

8. ESCÁNER 3D LÁSER

Este tipo de impresión permite mayor similitud entre el ojo sano y la prótesis, brindando ventajas tales como mismo color de iris, escleras surcadas de delgadas venas rojizas e incluso puede llegar a tener la similitud de profundidad entre cada una de las pupilas mientras que a su vez brinda mayor confort y seguridad al paciente. Para este tipo de impresiones se pueden utilizar dos clases de dispositivos: (21).

8.1 Escáner basados en forma de luz emitida

8.1.1 Triangulación óptica

Este tipo de escáner se basa en la formación de imagen que se obtiene gracias a la proyección de un haz de luz láser que se refleja en el objeto estudiado y que es capturado nuevamente por una Cámara coplanaria a la fuente de emisión; lo cual genera como resultado un triángulo que en conjunto con algoritmos y haz de luz del láser, determina una serie de coordenadas que son replicadas en el espacio virtual por medio del software (22).

Este tipo de láser presenta un gran inconveniente el cual se basa en la distancia que se encuentra entre la cámara y la fuente de emisión láser, ya que si el objeto se encuentra a una distancia mayor al lado D o base, la cámara y la fuente de emisiones deberán aumentar la distancia entre sí, lo que llevaría a que en cierto punto los rayos láser no puedan percibirse por la cámara coplanaria. Por tal motivo este tipo de láser suelen ser usados para la captura de objetos que se encuentren a una distancia menor a 10 metros; Entre más cercano esté el objeto a la base o lado D, el nivel de detalle aumenta (22).

8.1.2 Luz estructurada

Se basa en la triangulación óptica con la diferencia de que este tipo de escáner emite un patrón de luz en el objeto, en vez de proyectarla en un solo punto. Estos presentan una resolución mucho menor, ya que dependen del ancho y la calidad óptica de las líneas, junto con la longitud de onda del haz de luz empleado. Como ventaja principal tiene la velocidad de escaneo y cubrir áreas de gran tamaño, mientras que una de sus desventajas es que estos equipos son sensibles a las condiciones de iluminación (22).

8.2 Escáner basados en el cálculo del tiempo

8.2.1 Medición de pulsos

Determinan el tiempo que tarda la luz en vuelo luego de ser emitida y la percepción incoherente luego de reflejarse en el objeto; son empleados mayormente en distancias medias y largas. Se envía un pulso láser hacia un objeto, mientras que una parte del pulso se refleja en la superficie del objeto y vuelve al escáner; la distancia al objeto se calcula por el tiempo de vuelo del pulso, utilizando esta fórmula $\text{Distancia} = (\text{Velocidad de la luz} \times \text{Tiempo de vuelo}) / 2$. Con esta distancia se calcula una coordenada para la pequeña sección de la superficie golpeada por el rayo láser (22).

8.2.2 Diferencias de fases

Se basan en el cálculo del tiempo de las diferencias de fase que existe al enviar y recibir un haz de luz modulado, emiten luz láser a frecuencias alternas y determinan la distancia a un objeto midiendo la diferencia de fase entre las señales emitidas y reflejadas. Funcionan con alcances más cortos, de 80 a 120 metros como máximo, con un rango operativo normal de 1 a 50 metros, a diferencia de los escáner con medición de pulsos (2).

8.2.3 Interferometría

Se basa en la medición de la interferencia de diversas ondas de luz, para posteriormente registrar diferentes posiciones tridimensionales de los objetos digitalizados; suelen utilizarse en distancias largas y cortas ya que como ventaja se encuentra que brindan una gran calidad de detalle (2).

8.3 Escáner basados en la capacidad de barridos

8.3.1 Cámara

Es un sistema que permite el barrido de la información de manera limitada, el cual se da principalmente por la ventana o apertura de barrido del dispositivo, normalmente este ángulo suele ser de aproximadamente 60° verticales y horizontales (2).

8.3.2 Panorámica

Es un sistema de escáner que permite captar o retener la información mediante el movimiento de un haz de luz emitida por un espejo rotativo que se desplaza alrededor plano X y plano Y para cada posición, para cada posición ya sea X o Y se realiza un barrido total en banda de alta velocidad lo cual permite la captura de 310° a 360° (2).

8.3.3 Híbrida

Este tipo de láser combina la forma de barrido de los dos métodos anteriores, de esta manera el láser gira en pequeños movimientos horizontales mientras el espejo rotativo se mueve de arriba hacia abajo (2).

8.4 Escáner en base a su rango de acción

8.4.1 Escáner láser dinámicos

Permite la captura de las imágenes digitales mediante el movimiento como por ejemplo los escáneres de barrido panorámico e híbridos, este tipo de escáner son empleados mayormente en áreas de conocimiento como la ingeniería civil y mapeo móvil (2).

8.4.2 Escáner láser estáticos

Los cuales se subdividen a su vez en escáner de largo alcance (150 -1000m), el cual se utiliza normalmente en minería, alcance medio (10 – 150 m), se emplean normalmente en campos como la ingeniería civil, geología paleontología, arquitectura y

alcance bajo (2 –10m) los cuales tienen más campo de acción en la medicina, en la ejecución de la ingeniería inversa, y la reconstrucción de piezas históricas (2).

9. MODELADO 3D

Se llama modelado al proceso de generar un modelo de trabajo gracias a la impresión de la cavidad; se realiza una copia de la superficie para así obtener un modelo sobre el cual podrá trabajar el oculista y poder realizar varias copias en material acrílico para construir finalmente lo que será la prótesis ocular (15).

Mediante el uso de softwares de modelado se consigue la elaboración digital de formas y productos que posteriormente pueden ser sometidas a procesos conjuntos de elaboración CAD/CAM. A diferencia de los diseños elaborados en planos bidimensionales, el diseño de caracteres tridimensionales requiere la utilización de lenguaje gráfico tridimensional mucho más especializado (15).

Los procesos de modelado de piezas por medio de CAD se dividen en dos metodologías básicas, que se enfocan uno en el estudio de la superficie, el cual se basa en el recubrimiento de la pieza hueca y el segundo en los modelos de piezas sólidas, que se construyen a partir de bases sólidas digitales (15).

9.1 Modeladores NURBS

Son un tipo de modeladores que se basan estrictamente en splines o modelos vectoriales matemáticos que definen una serie de puntos de control sobre una superficie tridimensional definida, la cual puede modificarse al momento de cambiar la posición de estos puntos, de esta manera se modifica simultáneamente la figura elaborada. Los NURBS tienen la capacidad de modelado de poseer una alta resolución y a su vez también tienen la virtud de trasladar diseños 2D a los modelos 3D sin dificultad alguna, aunque estos poseen de mayor dificultad (2,23).

Las principales ventajas que presentan este tipo de modeladores es indudablemente la velocidad ya que al trabajar con figuras geométricas, es más sencillo el proceso de crear una malla primaria mucho más compacta lo que también contribuye a la disminución aberración o deformidad en las figuras y genera una forma mucho más natural en las mismas. Por otro lado, las desventajas que presenta se evidencian al momento de realizar la subducción a la malla primaria, pues puede crear algunas deformaciones en ciertos puntos específicos (2,23).

9.1.1 Modeladores de malla poligonal

Es una serie de mallas que se basan en conexiones de polígonos, vértices y ejes para conformar así una estructura tridimensional más densa. Como ventajas se encuentran una mayor velocidad de modelado, menor deformidad de objetos acompañado de una mejor distribución de squads, lo que da como resultado una mejora significativa en la apariencia natural en las estructuras diseñadas (2,23).

9.1.2 Modeladores paramétricos

Se describen como el tipo de diseño de formas con enfoque lógico que se fundamentan en dimensiones regulares que son manipulables por medio de parámetros o variables que permiten la modificación de las figuras obtenidas (2,23).

9.1.3 Modeladores sólidos

En cuanto a los modeladores que se basan en la formación de piezas a base de formas regulares sólidas y estas estructuras se imprimen de igual manera al momento de llevarlas al plano de fabricación real (2,23).

10. CONCLUSIÓN

El avance tecnológico ha impactado de gran manera el mundo en la actualidad positivamente en el área de la salud, así como en los dispositivos médicos; en este artículo se ve reflejado el uso de esta tecnología mediante la impresión 3D en la fabricación de prótesis oculares, dando así una respuesta positiva en los usuarios de esta ya que refieren una apariencia más cercana en su prótesis con respecto al ojo contralateral, debido a que con la implementación de la impresión 3D se pueden avivar detalles como lo son los vasos, color y forma del iris e incluso coloración en la esclera, generando así mayor aceptación tanto en la población afectada como en su entorno y a su vez la inclusión en la sociedad.

Sin embargo, debido al desconocimiento que aún existe por parte del público acerca de esta tecnología en el área de la optometría, son muy pocas las personas que optan por esta alternativa, sin dejar de lado que también tiene un impacto en la economía ya que algunos usuarios no tienen el completo acceso a esta tecnología debido a su valor comercial y a la escasa demanda de profesionales en esta área.

11. REFERENCIAS

1. Vinent Céspedes AM, Martí Pool M, Céspedes Quevedo MC. Clinical and evolutive characteristics of patients rehabilitated with ocular prosthesis. 2021 Dic. from http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1029-30192021000601378&script=sci_arttext&lng=pt
2. Catheryn A, Aldana C David, J. y Castro, S. (n.d.). Diseño e Impresión 3D de prótesis oculares Diseño e Impresión 3D de prótesis oculares from <https://ciencia.lasalle.edu.co/optometria/1902/>
3. Emi H. Caywood, M.. Nemours KidsHealth - the Web's most visited site about children's health. (2020) from <https://kidshealth.org/>
4. Côas VR, Neves ACC, Rode S de M. Evaluation of the etiology of ocular globe atrophy or loss. Braz Dent J. 2005 Sep;16(3):243–6. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0103-64402005000300013>
5. Zerkaoui, N. Colobome irien bilatéral. The Pan African Medical Journal, (2018); 30(1), 1937–8688. from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6093591/>
6. Redondo K de Oro, Mendoza Suárez L, Robles Pérez K, y Gómez J. Ocular Coloboma as Incidental Finding. A Case Report. Rev. Sociedad Colombiana de Oftalmología, 2018; 47(1), 1–88. from <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2019/01/969270/coloboma.pdf>
7. Santana A. y Waiswol M. (2011). The genetic and molecular basis of congenital cataract. Arquivos Brasileiros de Oftalmologia, 74(2), 136–142. from <https://doi.org/10.1590/S0004-27492011000200016>
8. Matías-Pérez, D. García-Montalvo, I. y Zenteno, J. 2017. Genes related to inherited microphthalmia and anophthalmia. Gaceta Médica de México, 153(7). from <https://doi.org/10.24875/GMM.M18000089>
9. Baradaran-Rafii, A. Shirzadeh, E., Eslani, M. y Akbari, M. (2014). Optical Correction of Aphakia in Children. Journal of Ophthalmic y Vision Research, 9(1), 71. from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4074478/>
10. Nicula, C. y Szabo, I. Complicated corneal ulcer. Case report. Romanian journal of ophthalmology, 2016. 60(4), 260–263. from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29450359/>
11. Rahman, N., Jamjoom, A., Jamjoom, Z. y El-Asrar. Orbito-cranial injury caused by penetrating metallic foreign bodies: Report of two cases. International Ophthalmology, 1997. 21(1), 13–17. from <https://doi.org/10.1023/A:1005834913614/METRICS>
12. Turliuc, D. Costan, V. Cucu, A. I. y Costea, C. F. Intraorbital foreign Body. The Medical-Surgical Journal, 2015. 119(1), 179–184. from <https://www.revmedchir.ro/index.php/revmedchir/article/view/514>
13. Rudkin, A. K., Lee, A. W. Y Chen, C. S. Central retinal artery occlusion: timing and mode of presentation. European Journal of Neurology, 2009. 16(6), 674–677. from <https://doi.org/10.1111/J.1468-1331.2009.02616.X>
14. Nageswaran, S. Woods, C. Benjamin, D. Givner, L. Y Shetty, A. Orbital cellulitis in children. Pediatric Infectious Disease Journal, 2006. 25(8), 695–699. from <https://doi.org/10.1097/01.INF.0000227820.36036.F1>
15. Gómez P. Prótesis oculares: “una mirada a las prótesis oculares.” 2010. from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81462010000100007
16. Fotopolimerización, ¿Qué es y cómo funciona? | Dassault Systèmes. (n.d.). from <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/photopolymerization>

17. Marín M, Vargas J, Fabricación de prótesis ocular mediante impresión 3D artículo de revisión, Medellín 2020. from <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2358>
18. Figueroa, D. Y Monsalve, D. Automatización del proceso de manufactura de prótesis oculares para pacientes enucleados mediante diseño digital basado en imágenes y producción a través de impresión 3D. from <http://hdl.handle.net/20.500.12749/12432>
19. Farook, T. H., Jamayet, N. B. Abdullah, J. Y. Rajion Z. A. Alam, M. K. A systematic review of the computerized tools and digital techniques applied to fabricate nasal, auricular, orbital and ocular prostheses for facial defect rehabilitation. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*, 2020. 121(3), 268–277. from <https://doi.org/10.1016/J.JORMAS.2019.10.003>
20. Eyzaguirre D, Rodríguez W. Evaluación de procesos de manufactura aditiva en la reproducción volumétrica de los detalles de un diseño 3d de una futura prótesis óculo-palpebral. 2022. Universidad de ingeniería y tecnología utec. from https://repositorio.utec.edu.pe/bitstream/20.500.12815/278/1/Eyzaguirre%20de%20la%20Roca_Tesis.pdf
21. Escrivá, Á. El primer ojo ‘que se ve bien’ impreso en 3D: Para crearlo sólo hace falta un escaneo y su fabricación reducirá las listas de espera a la mitad. *el mismo color, las mismas venas rojizas*. 2021, Dec 12. from <http://ezproxy.unbosque.edu.co:2048/login?url=https://www.proquest.com/newspapers/el-primer-ojo-que-se-ve-bien-impreso-en-3d/docview/2608972753/se-2>
22. Gamboa Caicedo C, Y Sánchez C. Vista de Construcción de un escáner tridimensional usando C++ y hardware libre. 2017, February 7 from. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/view/60812/60339>
23. García Ramirez G. Estudio de tecnología de modelado 3D para su aplicación en escultura sustentable. 2017, February. from <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/66445/Estudio%20de%20tecnolog%c3%ada%20de%20modelado%203D%20para%20su%20aplicaci%c3%b3n%20en%20escultura%20sustentable%02splitmerge.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
24. Ministerio de salud. Guía Clínica trauma ocular grave. 2007; Available from: <http://www.bibliotecaminsal.cl/wp/wp-content/uploads/2016/04/Trauma-Ocular-Grave.pdf>.
25. Lee L. Burnett A. M. Panos, J. G. Paudel, P. Keys, D. Ansari, H. M. Yu, M. 3-D printed spectacles: potential, challenges and the future. 2021. 103(5), 590–596 from <https://doi.org/10.1111/CXO.13042> .
26. Sommer, A. C., & Blumenthal, E. Z. Implementations of 3D printing in ophthalmology. *Graefe’s Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2019. 257(9), 1815–1822. from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00417-019-04312-3>
27. Orrego Z, A Montaña, Alba M, Velásquez V, Vergara D, & Santander J. PEDIATRIC OCULAR TRAUMA: Intraorbital Foreign Body. *Case Report. Case Reports*, 2019. 5(1), 4–10. from <https://doi.org/10.15446/CR.V5NL.75001>
28. Moreno H, Velez N, Caicedo M, Triana G, & Sánchez A. Characterization of Eyeball Loss in Four Cities of Colombia. 2017. from https://assets.cureus.com/uploads/original_article/pdf/8846/1612427398-1612427392-20210204-18203-15dj8fo.pdf
29. Strydom, C. Dental curing lights--maintenance of visible light curing units. *SADJ : Journal of the South African Dental Association = Tydskrif van Die Suid-Afrikaanse Tandheelkundige Vereniging*. 2002. 57(6), 227–233. from <https://europepmc.org/article/med/12229078>

30. Groot, A. L. W., Remmers, S., & Hartong, T. 2021. Three-Dimensional Computer-Aided Design of a Full-Color Ocular Prosthesis with Textured Iris and Sclera Manufactured in One Single Print Job. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 8(6), 343–348. from https://doi.org/10.1089/3DP.2021.0048/ASSET/IMAGES/LARGE/3DP.2021.0048_FIGURE5.JPEG