

INTRODUCCIÓN

La forma y la función de los objetos es un tema que se ha debatido en el diseño de productos desde sus inicios, ¿qué es primero, la forma o la función? Los productos, además de su utilidad práctica, cuentan con otras funciones adicionales que logran transformar su relación con el ser humano y su adaptación con el entorno. Es la forma de dichos productos la encargada de generar esas características connotativas que, dependiendo de un contexto y época determinados, le dan al producto un valor agregado. Esto lo hace un elemento esencial de un buen diseño pues permite una conducta psicológica y emocional aplicada a la interacción usuario-producto-contexto.

En la naturaleza la ambigüedad entre forma y función es inexistente. Las formas naturales han pasado por un proceso de selección al que Charles Darwin llamó “selección natural”. Este proceso ha generado sistemas equilibrados y eficientes en donde lo estético, lo funcional y la economía de los recursos coexisten en armonía.

Como en la naturaleza la forma y la función se influyen y se modifican buscando la optimización de los recursos, los diseñadores e ingenieros la han usado como fuente de inspiración por siglos, práctica que se conoce como “biomimesis”, innovación inspirada por la naturaleza. Esta práctica ha ido creciendo debido a que actualmente se cuenta con la capacidad intelectual y con herramientas capaces de analizar la naturaleza, además de que se han desarrollado redes que permiten el trabajo conjunto de profesionales en diferentes áreas.

Actualmente existe una nueva tendencia en el diseño de productos y en la arquitectura hacia el uso del diseño paramétrico y generativo, herramienta que permite la creación y el desarrollo de formas y estructuras a través de la lógica y algoritmos matemáticos. Este tipo de diseño evidencia la importancia de la matemática como lenguaje universal y como herramienta para leer e interpretar los fenómenos naturales y hacer uso de ellos en las creaciones humanas. El diseño asistido por algoritmos resulta ser una excelente opción para los diseñadores que buscan emular a la naturaleza más allá de lo puramente decorativo, analizando matemáticamente los patrones encontrados para generar morfologías más complejas y funcionales. Mediante el diseño generativo inspirado en la naturaleza, el desarrollo de productos se beneficiará de la interacción de diseñadores con matemáticos, ingenieros y biólogos.

Por lo anterior, se propone como proyecto de grado de la Maestría en Ingeniería de la Universidad EAFIT, un proyecto cuyo proceso de diseño aproveche a la naturaleza como arquetipo de diseño. De este proceso resulta Agarical, luminaria led diseñada a partir de geometrías paramétricas inspiradas en las morfologías de los Agaricales, especímenes del reino Fungí.

El proceso inicia con el reconocimiento de oportunidades para innovar en el desarrollo de productos, aplicando el diseño generativo inspirado en la naturaleza. Luego de reconocer que la gestión térmica de la luminaria led de mediana y alta potencia podría beneficiarse de este tipo de diseño, se lleva a cabo un proceso en donde se abstraen algunas de las estrategias biológicas del reino Fungí para llevar a cabo el proceso de dispersión de esporas, por ser análogo al proceso de convección térmica. A partir de dichas estrategias, se hace una síntesis geométrica sobre la cual se diseña el algoritmo que genera el producto. Posteriormente se hacen pruebas virtuales para evaluar las alternativas de diseño, diagnosticar problemas e iterar hasta llegar a una solución óptima desde el punto de vista térmico y fotométrico. El proyecto culmina con la realización de un prototipo virtual

de la solución, el cual se afina considerando el diseño para el ensamble y determinando posibles procesos de producción y materiales.

Este proyecto se presenta en ocho capítulos. El primero explica las generalidades del proyecto y contiene el marco teórico que lo fundamenta. El segundo capítulo describe la metodología que se usó durante el proyecto. El tercer capítulo abarca la exploración inicial para identificar oportunidades de innovación aplicando el diseño generativo inspirado en la naturaleza. El cuarto capítulo describe los principios básicos de los sistemas de iluminación y los factores implicados en el buen desempeño de los sistemas que trabajan con ledes, información que permite clarificar el problema y realiza la lista de especificaciones de la luminaria a diseñar. El quinto capítulo incluye las actividades más importantes que se llevaron a cabo para conceptualizar la solución, incluyendo el análisis biomimético del reino Fungí, la síntesis geométrica de la morfología de los Agaricales y la implementación del algoritmo para desarrollar alternativas de solución. El sexto capítulo presenta las pruebas virtuales realizadas para evaluar y optimizar las alternativas desde el punto de vista térmico y fotométrico. En el séptimo capítulo se detalla la alternativa más eficiente. Finalmente, en el octavo capítulo se realizan las conclusiones y recomendaciones para el proyecto, enfocadas en el cumplimiento de objetivos, la metodología y el producto.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Para definir el problema se presenta el marco teórico con los lineamientos de carácter teórico-práctico que sirvieron de guía para el desarrollo del proyecto. Profundiza en los temas de interés: la forma y su relación con la función en el diseño de productos, la forma en la cultura y en la naturaleza, la biomímesis, y el diseño generativo y paramétrico.

1.1.1. Forma VS función

La forma y la función de los objetos es un tema que se ha debatido en el diseño de productos desde sus inicios, ¿qué es primero, la forma o la función?

Con el transcurrir del tiempo, las funciones simbólico-comunicativas de los objetos y su adaptación dentro de un contexto han evolucionado, transformando así el concepto de forma y el enfoque que se le da a éste en un proceso de diseño.

Lo que un objeto es, se lo debe a su forma. Christopher Alexander, arquitecto y matemático de origen austriaco, argumenta que la forma es el fin último del diseño (Patiño y Arbeláez, 2009).

Sin embargo, durante el siglo 20 el enfoque era diferente. Los funcionalistas sustentaban que la forma de un objeto obedecía a las necesidades de su función: “la forma sigue a la función” frase célebre del arquitecto americano Louis Sullivan y mantra del diseño de esta época. Esta frase fue promovida por otro arquitecto americano, Frank Lloyd Wright, en reacción a las influencias de lo decorativo en el diseño.

Esta filosofía se vio reflejada en el trabajo del diseñador alemán Dieter Rams (ver figura 1), quien decía que el diseño no solo debía satisfacer la vista, por el contrario, las formas discretas y la calidad de una estética neutral eran elementos claves de la usabilidad de un producto; para Rams “menos es más”, frase célebre de Mies Van Der Rohe, director de la Bauhaus. La idea del buen diseño, excluyente de lo decorativo, fue también trabajada por el arquitecto austriaco Adolf Loos, quien ataca las artes decorativas en su ensayo *Ornamento y delito*, al considerar la producción de superficies ornamentales una labor innecesaria, costosa y una pérdida de tiempo. Durante esta época la estética era limitada a lo simple, lo eficiente y lo limpio.



Figura 1. Productos diseñados por Dieter Rams.

Fuente: dieterams.tumblr.com

Las artes plásticas, la música, la literatura, el teatro y el cine carecen de una utilidad práctica, sin embargo, son componentes integrales de toda cultura. La estética presente en estas artes estimula los sentidos y genera sensaciones de interés o de desprecio en las personas, siendo su fin último satisfacer ciertas necesidades psicológicas y emocionales. Aquellos productos que cuentan con una estética más compleja que la propuesta por los funcionalistas buscan estimular las mismas áreas del cerebro que el arte, la música y la literatura. Estos productos son un reflejo del clima intelectual y cultural de una época y lugar (Crocker, 2014).

Como lo menciona Mondragón (2002), “La semántica del producto nace a partir de la teoría comunicativa del producto, por medio de un lenguaje captado por los sentidos. A partir de los 80 se postuló que los productos no sólo tienen funciones prácticas, sino también simbólicas ante lo cual había que reorientar lo racional y analítico del diseño hacia valores sensitivos y emocionales”

Es la forma la que permite a los objetos comunicar ideas, llamar la atención del receptor y generar recordación. Es por esto que la forma es un elemento esencial de un buen diseño pues permite una conducta emocional aplicada a la interacción usuario-producto-contexto. Dicha interacción es compleja ya que requiere una conexión no solo operativa, sino una en la que se tengan en cuenta otras necesidades psicológicas y emocionales que generen valor para que el usuario se exprese, teniendo en cuenta que, a través de los productos que utiliza, cada persona refleja su personalidad, sus ideas, actitudes y valores.

Los productos entonces, además de su utilidad práctica, cuentan con otras funciones adicionales que logran transformar su relación con el ser humano y su adaptación con el entorno. Es la forma de dichos productos la encargada de generar esas características connotativas que, dependiendo de un contexto y época determinados, le dan al producto un valor agregado.

Mientras Dieter Rams defendía la simplicidad en el diseño, la diseñadora húngara Eva Zeisel creía que “las cosas hermosas hacen a la gente feliz” y que por esto los diseñadores debían seguir las inclinaciones naturales de su imaginación y estar prevenidos ante los efectos de la simplicidad. Zeisel buscaba imprimir en su obra (ver figura 2) “el lenguaje mágico de las cosas” y decía que la simplicidad estricta apagaba ese lenguaje: cuando la simplicidad es un requerimiento de diseño, se inhiben las inclinaciones naturales y lúdicas del diseñador, y de esta forma los objetos diseñados se vuelven menos comunicativos, es decir, mudos (Zeisel, 2004).



Figura 2. Productos cerámicos diseñados por Eva Zeisel.

Fuente: www.fountly.com

En su conferencia *Eva Zeisel en la lúdica búsqueda de la belleza*, Zeisel (2001) expone que, según la profesora de matemáticas del MIT, Sarah Smith, la búsqueda lúdica de la belleza fue la primera actividad humana y que todas las características útiles y materiales de los objetos fueron desarrolladas a partir de dicha búsqueda, la cual se dice lúdica pues hay que sentir placer en ella.

1.1.2. La forma y la cultura

El diseño de un producto no consiste, exclusivamente, en resolver problemáticas y necesidades de los usuarios. Es el resultado de analizar al ser humano y a su entorno, permitiendo que usuario-producto-contexto se comuniquen recíprocamente.

Como ya se mencionó, la forma es un elemento clave en dicha comunicación. El valor que la forma puede dar a un producto depende de que ésta refleje de forma efectiva el entorno sociocultural de una época y un lugar específico. Pues como lo mencionan Suárez y Sánchez (2007) en su artículo *Morfogénesis del objeto de uso*:

“Muchas son las visiones que se han dado sobre la estética con relación a que todo lo bello es estético o tiene capacidad estética, pero si se analiza esta aseveración, la belleza es pragmáticamente un juicio de valor subjetivo si se considera que lo bello para un contexto para otro quizás no lo sea... Entonces el dilema surge en la medida que hay un cuestionamiento acerca de cómo objetivar la visión estética.... Proyectados hacia esta perspectiva, la estética produce un juicio de valor objetivo por la visión colectiva, es decir que la belleza es más bien un juicio valorativo que tiene un condicionamiento contextual, ideológico y por lo tanto cultural que la postula como expresión colectiva, la forma podría pues, dar la capacidad al objeto de actuar sobre la sensibilidad de un grupo. Entonces, la estética es el reflejo normativo y descriptivo de la sensibilidad de un grupo colectivo”.

1.1.3. Las formas naturales

En la naturaleza la ambigüedad entre forma y función es inexistente. Ambos elementos se influyen y se modifican buscando la optimización de los recursos. Las formas que existen han superado pruebas de permanencia para permitir que la materia viva sobreviva, la materia muerta esté y para que la construcción del hombre se pueda dar. Esas pruebas han sido un proceso de selección para lograr el perfeccionamiento de la forma y la función, proceso al que Charles Darwin llamo “selección natural” (Patiño y Arbeláez, 2009).

En su libro *La rebelión de las formas*, Jorge Wagensberg (2004) expone tres tipos de selección:

- *Selección fundamental*: Su objetivo es posibilitar que las formas sigan estando, y que la materia sea capaz de resistir el entorno. Son las reglas que regulan y restringen la materia. Cuatro son las fuerzas fundamentales que gobiernan a este mundo: la fuerza nuclear fuerte, la fuerza nuclear débil, la fuerza electromagnética y la fuerza de gravedad.

- *Selección natural*: Su objetivo es favorecer aquello que permita seguir viviendo. Más que resistir, es la capacidad que tiene la materia viva para modificar su relación con el entorno, para así adaptarse y de esta forma, no sólo soportar dicho entorno, sino evolucionar y cambiar en búsqueda de su propia supervivencia y la de su especie.

- *Selección cultural*: Su objetivo es hacer las construcciones y los objetos humanos cada vez más óptimos y que el hombre haga, de forma consciente, la adaptación pertinente. El ser humano, además de ser un ser vivo, está dotado de una inteligencia abstracta en donde el sujeto seleccionador no es el azar y el entorno, sino la mente humana. Esta selección está determinada por la capacidad que tiene el hombre de seguir viviendo a partir de las decisiones, las experiencias y los aprendizajes. El hombre primero resistió al ambiente (selección fundamental), luego modificó su relación con el entorno (selección natural) para

después, utilizando un intelecto cada vez más desarrollado, anticiparse a sus necesidades (selección cultural). Las formas culturales son esas configuraciones construidas y seleccionadas por el hombre en donde el progreso se evidencia en la medida en que el hombre aprende de sus errores y se acerca más al conocimiento.

De lo anterior se puede concluir que las formas y las estructuras naturales reflejan el equilibrio logrado a través de millones de años de historia. En la naturaleza ni la forma, ni la función va primero, ellas coexisten en una armonía tal que logran mecanismos altamente eficientes y formas equilibradas y estables.

Además de ser eficientes, las formas de la naturaleza son estéticamente atractivas para los seres humanos, independiente del contexto o de la época. Según la neuroestética¹, por evolución, existe una atracción natural hacia las formas naturales y su belleza. Las estimulaciones sensoriales generadas por los fenómenos naturales han ayudado al hombre a afinar sus sentidos y a ajustar su percepción del mundo (Crocker, 2014).

El neurobiólogo Francis Steen, argumenta que el ser humano siente una atracción inherente a la complejidad de los estímulos visuales del mundo natural. Propone que inconscientemente el hombre hace uso de los órdenes complejos naturales para conectar el cerebro y calibrar sus sistemas perceptuales, además que la selección natural ha construido un sistema motivacional que lo lleva a buscarlos (Crocker, 2014).

Carl Jung, médico psiquiatra, afirma que las formas culturales que construye el hombre se perciben bellas o no, haciendo referencia, muchas veces, a formas presentes en la naturaleza. Según Jung, esto se debe al trabajo del inconsciente colectivo, pero también puede ser que la naturaleza es para el hombre su primer referente de belleza (Patiño y Arbeláez, 2009).

Desde esta perspectiva se puede considerar a la naturaleza como un excelente arquetipo de diseño. La complejidad de sus formas, además de ser equilibrada, de optimizar recursos y de ser eficiente y funcional, genera una belleza sin ningún tipo de condicionamiento contextual, ideológico o cultural, ya que por evolución el ser humano se siente atraído por ella.

1.1.4. Formas naturales y su función

D'arcy Thompson fue un biólogo y matemático escocés, considerado el primer biomatemático por su libro *Sobre el crecimiento y la forma*. En este libro Thompson emplea conceptos y terminología matemática para describir y analizar el papel de las leyes físicas en la determinación de la forma y la estructura de los organismos vivos. La obra de Thompson buscaba que los biólogos vieran que la evolución de los seres vivos no era sólo consecuencia de la selección natural, sino que además estaba la física como un factor intrínseco de esa evolución.

Según Patiño y Arbeláez (2009), como Thompson, muchos biólogos se han dedicado a estudiar la morfología y la biomecánica de los organismos desde fenómenos físicos, químicos, matemáticos y geométricos y han intentado dar respuestas a preguntas como: ¿cuáles son las formas geométricas de la naturaleza?, ¿a qué se deben?, ¿cuáles son los principios naturales que construyen morfologías?

¹ Campo de la ciencia experimental que busca explicar y comprender las percepciones estéticas a nivel neurológico.

La optimización formal que ha alcanzado la naturaleza debido a las fuerzas evolutivas se puede medir en tres aspectos: eficiencia, seguridad y estética. La eficiencia se refiere a la capacidad que tienen los sistemas naturales de utilizar el material dónde y cómo es necesario, buscando lo máximo mediante lo mínimo. La seguridad es la cualidad que le provee a dicha forma características para resistir esfuerzos, ser estable y seguir viva. La estética depende del observador, pero como se dijo anteriormente, la naturaleza es el primer referente de belleza del hombre, por lo tanto, inconscientemente éste se siente atraído por ella. La naturaleza no busca procurar las formas más bellas, pero lo logra, como un atributo innato a su construcción.

Muchos son los autores que han escrito acerca de las formas más frecuentes en la naturaleza y sobre los fenómenos físicos que explican dichas formas. Algunos de estos autores son D'arcy Thompson, Peter S. Stevens (arquitecto), Ian Stewart (matemático), Jorge Wagensberg (físico) y Martin Golubitsky (matemático). En su libro *Generación y transformación de la forma*, Patiño y Arbeláez (2009) proponen una clasificación para tipificar dichas formas, agrupándolas en patrones geométricos, considerando las categorías propuestas por los autores mencionados y otros más. La figura 3 muestra esta clasificación además de la función principal, las funciones secundarias, los mecanismos que permiten la emergencia de dichas formas, una aplicación de éstas en la naturaleza y otra en el mundo cultural.

A continuación, se añaden algunas características que Patiño y Arbeláez (2009) y otros autores describen de dichos patrones y de otras geometrías, con el fin explicar de forma más detallada cómo éstos le permiten a la naturaleza optimizar recursos.

-*Línea recta*: Su principal cualidad es que el segmento recto es la mínima longitud entre dos puntos, esto le permite a la naturaleza llevar material directamente de un punto a otro. Sin embargo, como la naturaleza no siempre necesita lo mismo (otras veces necesita soportar, abarcar, minimizar, entre otras funciones), aparecen formas más complejas que la línea recta. Se usa principalmente para colonizar el espacio, bien sea mediante explosiones (ver figura 5a), ramificaciones o fractales.

- *Pentágono*: El pentágono es una figura asociada a la perfección divina por poseer la proporción aurea en su construcción, constante derivada de una relación geométrica entre dos tamaños o cantidades, expresada por la fórmula:

$$\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b} = \Phi, \text{ donde } \Phi = 1.618 \text{ (número de oro)} \quad (1)$$

Las flores se han estudiado morfológicamente en diferentes investigaciones y se ha encontrado que la configuración que más predomina es la pentámera, es decir, que consta de 5 pétalos. Esta configuración también se observa en otros individuos como en las estrellas de mar, los erizos de mar, entre otros.

Los pentágonos no se unen entre sí o con otros polígonos para ocupar el espacio bidimensional, sus propiedades le permiten con mayor facilidad encerrar el espacio, es por esto que en la naturaleza surge la presencia de pentágonos para generar curvatura, mientras que los hexágonos se observan abriendo la forma, por lo tanto, ambos trabajan en conjunto para generar geometrías tridimensionales con curvatura como el caparazón de las tortugas (ver figura 5b).



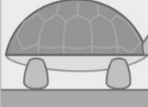











PATRONES en la naturaleza					
Patrón	Función Principal	Función Secundaria	Mecanismos de Emergencia	Aplicación Natural	Analogía Cultural
1 Esfera y formas esferoides	Proteger	- Contener - Independizar - Estabilizar estructuralmente - Desplazar - Auto defender	- Isotropía - Rotación - Homogeneidad - Deterioro		
2 Hexágono y pentágono	Pavimentar (bi y tridimensional)	- Auto organizar - Ocupar el espacio - Ahorrar material - Proteger (en caparazones)	- Compresión de círculos - Propagación de fracturas - Cristalización de líquidos Presión isotropa		
3 Espiral	Empacar	- Guardar - Ahorrar espacio - Permitir movilidad	- Crecimiento diferencial - Velocidad diferencial - Competencia por luz y agua		
4 Hélice	Agarrar	- Empacar otro material - Aumentar fricción	- Movimiento - Crecimiento diferencial - Competencia		
5 Puntas y conos	Penetrar	- Concentrar - Permitir movilidad - Dispersar - Defender, atacar, comer, excavar.	- Deformación - Concentración		
6 Ondas y formas sinuosas y serpenteantes	Comunicar	- Desplazar - Mover - Ocupar el espacio	- Fluctuaciones periódicas - Orden - Fuerzas contrapuestas		
7 Fractales, ramificaciones y explosiones	Colonizar	- Transportar - Rellenar el espacio - Minimizar (tiempo y material)	- Competencia - Orden		

Figura 3. Patrones en la naturaleza, funciones, mecanismos de emergencia y sus analogías en las formas culturales.

Fuente: Patiño y Arbeláez (2009).

- *Hexágono:* En el reino mineral el hexágono es el polígono que prevalece. Stevens (1987) dice que ninguna forma inanimada muestra simetría pentagonal; ni en los cristales, ni en los copos de nieve se ha visto esa disposición. “Sólo las formas animadas, complejas y cuyas estructuras constituyen algo más que un simple apilamiento de moléculas idénticas, ofrecen morfologías pentámeras”.

El hexágono es el polígono más eficiente para ocupar el espacio bidimensional, ya que de los polígonos que permiten redes regulares en el plano (ver figura 4), es el que presenta más área con menos periferia. Así mismo, la red hexagonal es la forma más eficaz de agrupar círculos, ya que cuando estos van aumentando en periferia debido a fuerzas actuando sobre la materia, al no tener para donde crecer, se van estrechando y deformando hasta lograr organizarse formando ángulos de 120°, es decir, formando secciones hexagonales.

REDES REGULARES

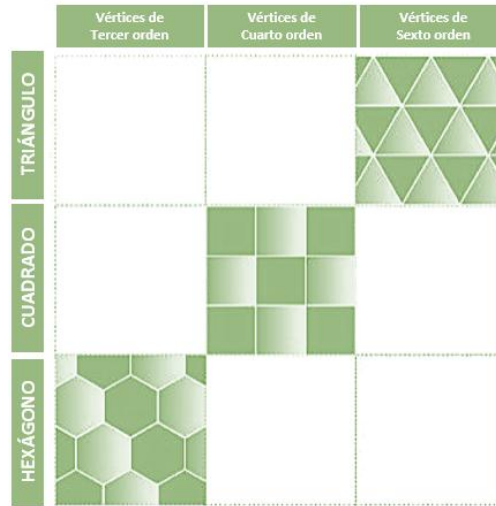


Figura 4. Redes regulares en el plano.
Fuente: Patiño y Arbeláez (2009).

Lo anterior hace que esta geometría se perciba frecuentemente en la naturaleza, como en los paneles de abejas, los nidos de las avispas (ver figura 5c), los copos de nieve, las marcas del salar, entre otros.

Lisnovsky (2008) describe al hexágono y su aplicación en la arquitectura de la siguiente forma: “Conformado por la rotación de un triángulo, combina las propiedades firmes y económicas de éste con las ventajas del círculo, a quien aventaja por no dejar en su teselado ningún lugarcito libre al azar. Los hexágonos se complementan perfectamente y arman infinitas tramas sólidas”

- *Círculo*: Nombrado desde la antigüedad como la figura geométrica perfecta. Aparece cuando la forma necesita abarcar la mayor superficie con el mínimo material, como en la hoja de loto de la figura 5d, que necesita la mayor área posible para captar suficiente energía lumínica. Es necesario que la materia que forma el círculo esté en condiciones de una particular isotropía en el plano en el cual va a crecer.

En condiciones de homogeneidad y buscando la eficiencia aparece el círculo, pero debido a la influencia que el entorno ejerce sobre la forma, ésta se puede deformar para estabilizarse y seguir viviendo y como resultado aparecen óvalos y elipses.

- *Ondas y formas sinuosas*: Estas geometrías aparecen en la naturaleza debido a presiones y crecimientos diferenciales.

Como se dijo anteriormente, la línea recta es la distancia más corta para unir dos puntos, por lo que una trayectoria rectilínea en zig-zag sería, geoméricamente, el camino más corto y economizaría material; además que generaría estructuras triangulares las cuales son altamente estructurales. Sin embargo, este tipo de trayectoria tiene discontinuidades bruscas en cada giro y no le es fiel al “principio de continuidad” característico de la naturaleza. Es por esto que las trayectorias onduladas, con cambios pequeños de curvatura, son las trayectorias que la naturaleza sigue (Thompson, 1945).

Las ondulaciones aparecen en muchos organismos al crecer más rápido su periferia que su centro, en donde la materia busca espacio para acomodarse, resultando en ondulación. De esta forma la superficie se dota de estructura y estabilidad para permitirles a dichos organismos permanecer erguidos (ver figura 5e).

Movimientos en donde la contracción y la relajación aparecen en ciclos, como el de las serpientes, también generan este tipo de geometrías.

- *Espirales*: Un espiral es una curva que, comenzando desde su origen, reduce su curvatura a medida que se aleja de ese punto. Existen dos tipos de espirales, la de Arquímedes que presenta una separación constante entre sus partes a medida que crece, y la logarítmica en donde el crecimiento aumenta exponencialmente dicha separación.

Las fuerzas diferenciales causantes de las ondas son también las que generan este tipo de morfologías. Las espirales se usan en la naturaleza para guardar y proteger ahorrando espacio. La otra función de disposición y composición de las espirales es organizar las diferentes partes de los organismos de tal forma que ninguna bloquee los recursos, como el sol o el agua de la lluvia, que le pueda llegar a las demás (ver figura 5f).

- *Hélices*: La espiral empaqueta la forma consigo misma mientras que la hélice empaqueta y agarra una configuración en torno a otra (ver figura 5g). A medida que crece el número de vueltas de la hélice, la fuerza de fricción de un material enrollado sobre otro aumenta. Esta configuración, al igual que la espiral, permite organizar las partes de los organismos de tal forma que todas puedan acceder a los recursos sin bloquear a las demás.

La línea geodésica es la distancia más corta entre dos puntos sobre la superficie de un sólido de revolución. Las líneas geodésicas generan las hélices.

-*Cuerpos y superficies con una curvatura*: Son básicamente los cilindros, los conos y sus diferentes truncamientos.

Según Wagensberg (2004), el cilindro es la configuración más cercana a la esfera en condiciones en donde se rompe la isotropía del entorno debido a la fuerza de gravedad y la competencia por la luz u otros recursos. El cilindro se observa frecuentemente en la naturaleza como columna natural de la mayoría de los árboles. Cuando un árbol necesita crecer más de cierto límite la naturaleza lo estructura cambiando su morfología, no necesariamente añadiendo más material pues ésta es ligera y busca utilizar siempre el mínimo material. Lo que sucede es que a medida que el árbol crece verticalmente disminuye el grosor del tronco, generando una estructura de cono (ver figura 5h). Según Jairo Coy², esta reducción en el grosor del tronco también beneficia el transporte de nutrientes, pues al disminuir el área transversal, aumenta la presión con la que los nutrientes recorren la planta y de esta forma puede llegar a los lugares más alejados de la raíz.

El cono cumple esa función estructural, pero a la vez concentra. En muchas plantas estructura a las hojas en crecimiento y además permite, como un embudo, que el agua se concentre en la raíz para absorber líquidos y nutrientes. Además de concentrar material, concentra fuerzas, y muchos organismos lo usan como agujas para protegerse.

² Estudiante de Ingeniería Física y miembro del grupo de investigación en Biotecnología de la Universidad EAFIT.

-Dobles curvaturas positivas: Dentro de los cuerpos de dobles curvaturas positivas la esfera es la geometría más regular, generada por una isotropía uniforme en el entorno. Además, es el sólido que posee la menor relación superficie/volumen para un volumen fijo. Es por esto que los pitagóricos la consideraban la forma perfecta.

En general, todos los animales inician su vida desde esta morfología por dos ventajas considerables, según Wagensberg. Si se trata de un huevo, la forma de esfera dificulta que éste sea mordido por un depredador cuyas fauces sean proporcionales al diámetro del huevo, debido a la facilidad con la que esta geometría permite el movimiento. Además la esfera y las formas esferoides tienen la capacidad de guardar el calor haciendo que la pérdida de temperatura sea más lenta.

Sin embargo, la isotropía de la esfera se rompe con facilidad en la naturaleza, generando así formas esferoides, como por el ejemplo las gotas de agua que se deforman para viajar más rápido por acción del viento y de la gravedad y como los huevos de gallina que se deforman al salir por la presión de las paredes del oviducto (ver figura 5i). Si bien la redondez es una de las soluciones más eficientes para la movilidad, la geometría del huevo de gallina permite un movimiento más controlado, evitando que ruede en infinitas direcciones, sino solamente perpendicular a su eje de simetría. De esta forma es más difícil que el huevo salga del nido.

-Dobles curvaturas negativas: Dotar de curvatura a una forma permite estructurarla sin utilizar más material. Cuando los cuerpos no son cerrados ni crecen desde el interior, como aquellos con dobles curvaturas positivas, la naturaleza los estructura con dobles curvaturas negativas, es decir, con superficies anticlásticas³. La mayoría de las hojas presentan esta morfología (ver figura 5j).

La figura 5 incluye algunos ejemplos de organismos naturales en donde se evidencia la presencia de las geometrías descritas.

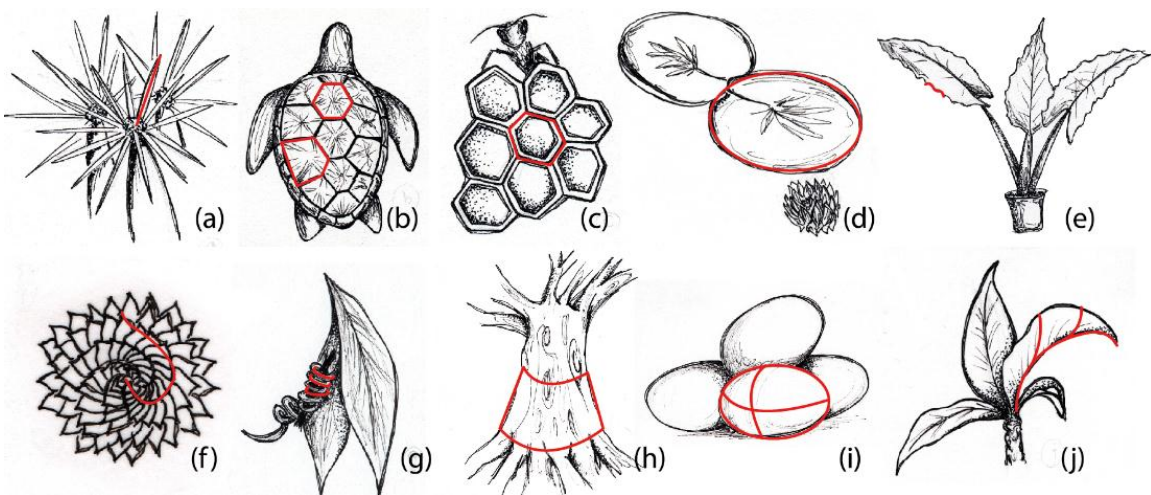


Figura 5. Geometrías en la naturaleza.
Fuente: Elaboración propia.

³ Presentan concavidades opuestas.

1.1.5. Principios de crecimiento formal en la naturaleza.

Conocer los principios de crecimiento natural permite entender cómo construye la naturaleza para ser eficiente estructural y estéticamente.

Patiño y Arbeláez (2009) agrupa dichos principios en 3 grupos: principios de generación, principios de transformación y principios de funcionamiento (estructural y visual).

1.1.5.1. Principios de generación.

Los principios de generación son los involucrados en la concepción de la forma, estos son:

- *Crecimiento desde el interior*: El resultado de este principio es la generación de estructuras hinchadas, bien sea por un gas o por un líquido. Dichas estructuras permiten la continuidad de la tensión en la membrana ocasionada por la presión constante, generando formas esferoides o redondeadas. Las células representan muy bien este principio (ver figura 6a), y como lo microscópico refuerza lo macroscópico no es de extrañar que las formas orgánicas, cuya principal cualidad son las curvas, sean asociadas por la gente con la naturaleza.

- *Crecimiento diferencial*: Este principio también genera formas curvas, resultado de fuerzas diferenciales que están continuamente construyendo, estabilizando y adaptando la forma a las exigencias del entorno. Ejemplo de este tipo de crecimiento son las conchas de los caracoles, cuya geometría es en espiral (ver figura 6b).

- *Crecimiento direccional*: Crecimiento que se da desde un punto y que sigue una dirección determinada por un eje. La forma en que crecen las hojas en la mayoría de las ramas ejemplifican este principio (ver figura 6c).

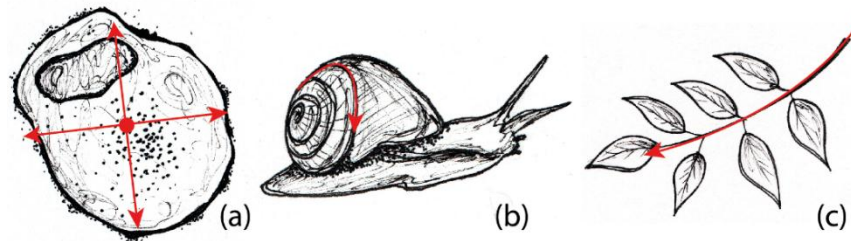


Figura 6. Principios de generación en la naturaleza.

Fuente: Elaboración propia.

1.1.5.2. Principios de transformación.

Los principios de transformación son mecanismos que imponen cambios morfológicos a las estructuras que están en crecimiento. Estos se clasifican en principios del caos, los cuales se explican a continuación, y principios simétricos, que se explicarán más adelante dentro de los principios de funcionamiento estructural.

La teoría del caos dice que todo ser existente inmerso en un sistema es afectado por tantas variables que es imposible predecir su funcionamiento. Sin embargo, este azar está condicionado a un conjunto de leyes que determinan, en la naturaleza, la dirección general de la forma. Estas leyes se describen a continuación:

- *Fractalidad*: Los fractales son irregularidades que se presentan en la naturaleza conformadas por patrones ordenados. Estos patrones son autosemejantes, es decir, una pequeña sección puede ser vista como una réplica a menor escala de todo el fractal, generando en el sistema una dilatación. Además, pueden crecer infinitamente en diferentes direcciones, lo que hace complejo su análisis. Esta morfología la usa la naturaleza para colonizar, abarcando la mayor cantidad de espacio optimizando recursos. Se observan, entre otros ejemplos, en las venas y en las arterias pulmonares de los animales, en las ramas de muchas plantas, en los helechos (ver figura 7a) y en el romanesco (ver figura 7b).

- *Efecto ecofenotípico*: Aunque los organismos puedan tener una morfología característica de su especie, crecen completamente diferentes debido a que su propia morfología está condicionada por los efectos que el medio ambiente ejerce sobre éstos. Son tantas las variables que afectan a un sistema que es imposible determinar los efectos que pueda generar determinada causa en la variación de las formas naturales. Este principio afecta las formas vivas e inertes, dándole variabilidad al mundo.

La figura 7c muestra los pinos doblados del bosque Crooked, en Polonia. Se puede apreciar que están rodeados de pinos cuyo crecimiento fue normal, sin embargo, estos pinos presentan una curvatura poco usual ya que su crecimiento fue manipulado por el hombre para que la forma resultante fuera ideal para la construcción de barcos.

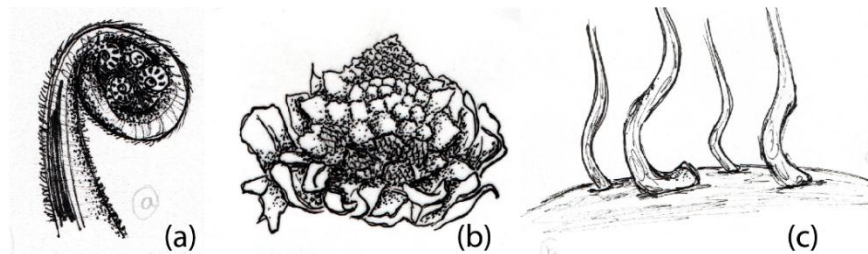


Figura 7. Principios de transformación en la naturaleza.
Fuente: Elaboración propia.

1.1.5.3. Principios de funcionamiento estructural.

Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, matemático y astrónomo francés, propuso la ley de la mínima acción, la cual dice que la naturaleza siempre opera con la máxima economía posible. Este principio abarca otros tres más específicos: las superficies mínimas, la sinérgica y las simetrías.

- *Superficies mínimas*: Son superficies que encierran el mayor volumen, o cubren la mayor longitud con el mínimo material. Entre las geometrías que logran esta propiedad se encuentran la esfera, el paraboloides hiperbólico, el hiperboloide y el helicoides.

Así mismo, la naturaleza busca dotar a esta forma de estructura, no añadiendo más material pues necesitará mayores recursos energéticos para su consecución, sino con recursos formales. La mayoría de las superficies mínimas son morfologías resistentes por su forma, en las cuales su curvatura continua distribuye los esfuerzos eficientemente. Es por esto que Antonio Gaudí incorpora estas formas naturales en la arquitectura, demostrando que la

belleza, la funcionalidad y la economía no son conceptos contrapuestos sino diferentes manifestaciones de una única verdad, hecha para todos y de ámbito universal (Gayoso, 2013).

En la figura 8 se muestra como Gaudí emplea las estructuras hiperboloides, presentes en la naturaleza, en sus construcciones, por ser éstas más estructurales que las cilíndricas.

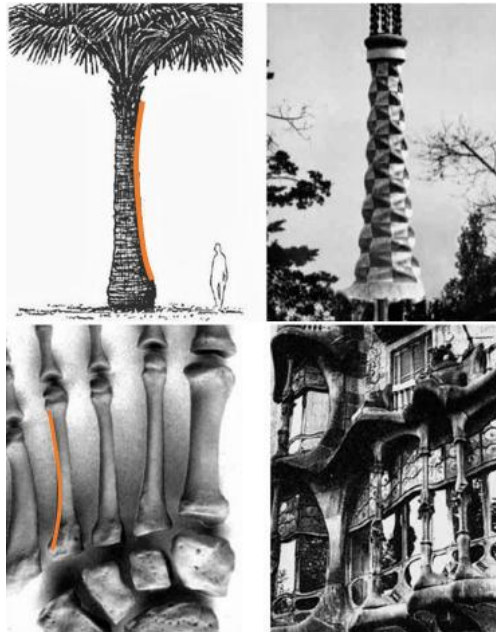


Figura 8. Superficies mínimas en la obra de Gaudí.

Fuente: Gayoso (2013).

Otro mecanismo que usa la naturaleza para estructurar minimizando recursos es mediante ondulaciones, como ya se mencionó, o plegando la forma. Estructuralmente esto es como aumentar el grosor sin necesidad de agregar más material.

- *Sinérgica*: Este principio se basa en la sinergia, en donde la acción de dos o más causas es superior a la suma de los efectos individuales, es decir, la suma de las partes no es igual que el todo, sino más. Cuando la naturaleza construye a un individuo como un sistema, que a su vez hace parte de un sistema mayor, y no como la suma de elementos separados, está buscando la optimización de los recursos disponibles para la totalidad del sistema.

- *Simetrías*: La función principal de las simetrías en la naturaleza es disminuir la información que necesita para construir, ya que esta implica la transformación de un objeto a través de un movimiento dejando su aspecto aparentemente igual. Se dice “aparentemente” pues aunque después de dicha transformación la forma del objeto se conserva, el objeto se ha movido.

Las transformaciones geométricas que generan las simetrías son las rotaciones, las reflexiones y las traslaciones. Un cuerpo presenta simetría radial cuando hay repetición de elementos rotando a partir de un eje radial de simetría. Esta simetría es la más eficiente energéticamente y la que genera mejor soporte mecánico. La simetría especular o axial se da cuando los elementos se reflejan a partir de un eje espejo y permite maximizar la captación

de energía y de recursos, así como la movilidad. La simetría de traslación consiste en la repetición de elementos moviéndolos sobre ejes paralelos.

Las simetrías implican equilibrio visual, pero a su vez generan cierta estabilidad en las fuerzas que actúan sobre el individuo. La simetría radial permite cierto grado de isotropía y la especular permite dos fuerzas equilibradas.

En el reino vegetal predomina la simetría radial (ver figura 9a) y la de traslación (ver figura 9b). En la mayoría de los seres vivos complejos, los animales, predomina la simetría especular (ver figura 9c), facilitando la movilidad y todas las funciones de supervivencia de estos organismos.

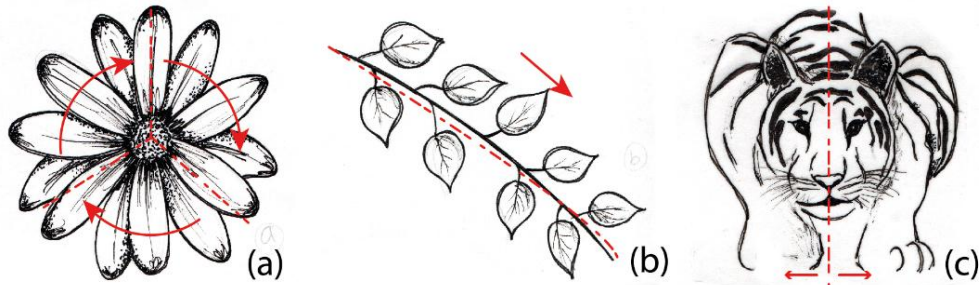


Figura 9. Simetrías en la naturaleza.
Fuente: Elaboración propia.

1.1.5.4. Principios de funcionamiento visual.

La estética en la naturaleza es el resultado de todos los principios mencionados, pero a su vez tiene una función referente a la comunicación. Los colores, por ejemplo, desempeñan una función específica según la especie, ya sea para ayudar al apareamiento, a la protección o la supervivencia.

La estética en cuando a morfología incluye dos parámetros: las simetrías y la proporción.

Las simetrías, además de las propiedades funcionales ya descritas, proporciona a los individuos un sentido de belleza necesario para realizar diversas funciones, todas vitales, especialmente funciones reproductivas.

Respecto a la proporción, de la que más se ha hablado es de la proporción aurea, estudiada más por biólogos que por artistas. Dicha proporción se basa en el número de oro, $\Phi = 1.618$, mencionado anteriormente. En la naturaleza todas las formas que empleen en su construcción al pentágono (ver figura 10a) o a la espiral logarítmica (ver figura 10b) tienen esta proporción. Dicha proporción aplicada al cuerpo humana fue utilizada por Marco Vitrubio y popularizada por Leonardo da Vinci.

Este número también se ve representado por la serie de Fibonacci, la cual es una progresión en la que cada término es el resultado de la suma de los dos anteriores, comenzando con el 0 y el 1. De esta forma la serie sería: 0,1,1,2,3,5,8,13,21, ... y así hasta el infinito. La relación de esta serie con el número de oro es que al dividir algún término por el anterior el resultado se aproxima a dicho número.

Según los biólogos, esta serie se percibe en la naturaleza, por ejemplo, en la cantidad de espirales de los girasoles: 55 espirales dextrógiras y 34 u 89 espirales levógiras, los tres números hacen parte

de esta serie (ver figura 10c). También se percibe en la distribución de las hojas alrededor de un tallo y en muchas construcciones de la naturaleza.

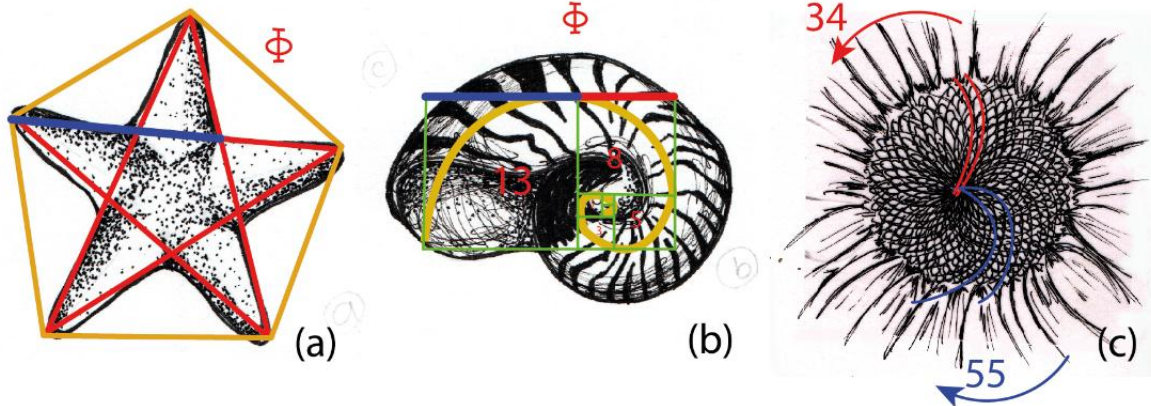


Figura 10. Proporción aurea en la naturaleza.
Fuente: Elaboración propia.

1.1.6. Biomímesis.

Como en la naturaleza lo estético, lo funcional y la economía de los recursos coexisten en tal armonía que logran sistemas equilibrados y eficientes, los diseñadores e ingenieros la han usado como fuente de inspiración por siglos. Según el diseñador industrial Franco Lodato “la naturaleza es nuestra mejor base de datos. Son más las cosas que todavía esperan por descubrirse en el mundo, que las que se van a inventar” (Lodato, 2007).

Frases como: “Hay un libro abierto para todos los ojos: la naturaleza” del polímata franco-helvético Juan Jacobo Rousseau, “en la naturaleza están todos los estilos futuros” del escultor francés Auguste Rodin y “la simplicidad es el primer paso de la naturaleza y el último del arte” del poeta Inglés Philip James Bailey, llevan a intuir que el descifrar y el imitar los principios simples, perfectos y hermosos de la naturaleza, es garantía de éxito.

En los últimos años se ve una tendencia mucho más fuerte por aprovechar las formas, mecanismos, sistemas y procesos naturales para inspirar los procesos de diseño, práctica que se conoce como “biomímesis”, innovación inspirada por la naturaleza. Esta práctica ha ido creciendo debido a que actualmente se cuenta con la capacidad intelectual y con herramientas capaces de analizar la naturaleza y de aprender de sus 3.8 billones de años de desarrollo, además de que se han desarrollado redes que permiten el trabajo conjunto de profesionales en diferentes áreas. (Volstad y Boks, 2008).

1.1.6.1. Definición.

Biomímesis (de 'bio', vida y 'mímesis', imitar) literalmente significa imitación de la vida. Sin embargo, es un término que no está claramente definido y que cuenta con muchos términos que se relacionan, entre ellos, biomimética, biomimetismo, biognósis (de 'gnósis', conocimiento) y biónica (de 'ica', relativo a).

Anteriormente el término biónica se usaba para referirse a la práctica que hoy se denomina biomímesis. Dicho término fue propuesto en 1958 por Jack E. Steele, comandante de las Fuerzas Aéreas Estadounidenses conocido como el padre de la biónica, quien la define como "la aplicación de principios biológicos que pueden resolver problemas técnicos" (The Bionic Enterprises Group, 2012).

Más adelante el término biomímesis tuvo mejor acogida, gracias al trabajo de Janine Benyus, quien con su libro *Biomímesis: innovaciones inspiradas por la naturaleza*, propone tomar como modelo el mundo natural, pero abandonando el enfoque antropocéntrico y atendiendo con humildad a las lecciones de la naturaleza, para mantener una estabilidad dinámica y aprovechar los recursos sin acumular desechos, respetando así los ecosistemas (Benyus, 1997). La biomímesis propuesta por Benyus es una biónica sostenible, sin embargo, hoy en día, el creciente interés por la biomímesis se encuentra motivado por esta visión ecológica hasta cierto punto.

La definición de biomímesis con la cual se trabaja en este proyecto es la propuesta por Kennedy (2004), para quien esta práctica se refiere al estudio de los desarrollos más exitosos de la naturaleza para luego imitar sus diseños y procesos en la solución de problemas humanos.

La biomímesis no se refiere a la copia directa de la naturaleza, sino a la implementación creativa de principios biológicos en el desarrollo de productos. Así lo explica Robert Full, profesor del Departamento de Biología Integrativa de la Universidad de California: la evolución no tiende hacia la perfección, sino hacia "lo suficientemente bueno", por eso, si se quiere diseñar algo, hay que observar la diversidad de organismos existentes e inspirarse en los principios (Volstad y Boks, 2008).

1.1.6.2. Enfoques y niveles de la biomímesis.

Existen diferentes opiniones acerca de cómo aplicar esta práctica, las cuales giran alrededor de dos visiones diferentes: la "visión reduccionista" (o biomímesis superficial) y la "visión holística" (o biomímesis de profundidad). La visión reduccionista consiste en la transferencia de tecnologías biológicas hacia las áreas de la ingeniería y el diseño, mientras que la visión holística está orientada al eco-diseño, buscando el desarrollo de productos ecológicamente sostenibles que no dañen el medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida (producción, uso o desecho).

A partir de esto, Benyus divide la biomímesis en tres niveles según su aplicación (ver figura 11). El primer nivel es la biomímesis superficial la cual implica *imitar la forma natural*, sin garantizar que la solución sea ambientalmente sostenible. El segundo nivel implica *imitar los procesos naturales*, el cual está más cerca a la visión holística, ya que los procesos naturales no dañan la naturaleza. El tercer nivel implica *imitar los ecosistemas naturales*, considerado como la biomímesis de profundidad. Este nivel considera la forma en que la naturaleza produce sin dañar el ambiente, considerando todo como parte de un sistema y teniendo en cuenta el ciclo de vida completo del producto, desde la extracción de las materias primas, hasta la reutilización del producto manufacturado al final de su vida útil (Volstad y Boks, 2008).

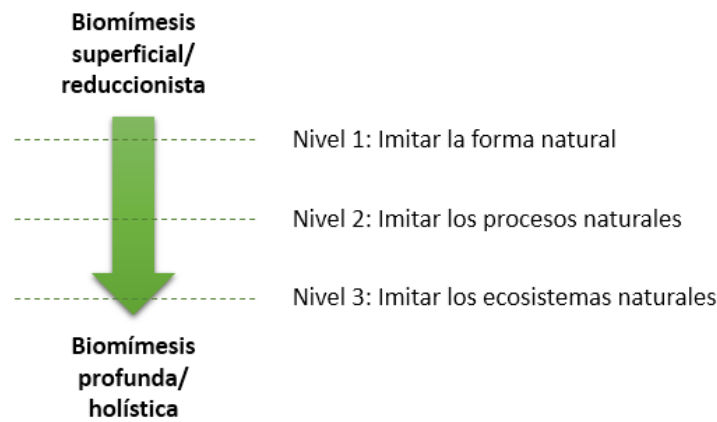


Figura 11. Niveles de biomímesis según Benyus.
Fuente: Adaptado de Volstad y Boks (2008).

Este proyecto se centra en el enfoque que tradicionalmente se le da a esta práctica, es decir, en la biomímesis superficial, ya que su objetivo principal está en proponer soluciones para el diseño de productos y no para el ambiente.

1.1.6.3. Aplicaciones y ejemplos de la visión reduccionista.

Volstad y Boks (2008) proponen cuatro categorías de biomímesis según sus aplicaciones y las disciplinas implicadas: materiales (ciencia de los materiales), mecánica/dinámica (ingeniería y locomoción), estructura (ingeniería estructural y arquitectura) y forma (arquitectura y arte). Estas categorías van desde perspectivas puramente de ingeniería hasta las puramente artísticas (ver figura 12).

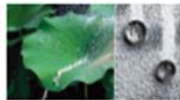


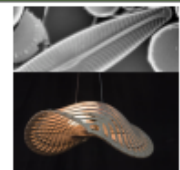
		Tipo de aplicaciones	
Ingeniería	Categoría 1: Materiales	Recrear propiedades de materiales naturales en un laboratorio, no el material en sí mismo.	A
	Categoría 2: Dinámica	Desarrollo de materiales, productos y sistemas usando analogías con la naturaleza y estudiándola sistemáticamente.	B
	Categoría 3: Estructura		
	Categoría 4: Forma	Emplear el lenguaje formal de la naturaleza para crear productos estéticamente agradables.	C
Arte			

Figura 12. Categorías de biomímesis según Volstad y Boks (2008).
Fuente: Elaboración propia.

La tabla 1 presenta algunos ejemplos de productos desarrollados empleando biomímesis y su clasificación en las diferentes categorías descritas según la aplicación.

Este proyecto se enmarca en un punto intermedio entre lo completamente ingenieril o artístico, por lo que trabaja con el tipo de aplicaciones B y C, como en los ejemplos del vehículo biomimético y las alfombras modulares. En estos proyectos la forma determina, además de una estética, aspectos funcionales importantes del producto.

Tabla 1. Ejemplos de productos desarrollados empleando biomímesis y su clasificación según su aplicación.

PRODUCTO	IMÁGEN	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN		
			A	B	C
Cinta adhesiva Gecko		El gecko es un lagarto capaz de subir superficies verticales ya que la planta de sus patas esta cubierta de pelos microscópicos los cuales fijan al gecko a la superficie mediante la tenue atracción de cargas eléctricas opuestas que se da entre las moléculas de los pelos y las moléculas de la superficie en cuestión. Además la propia fuerza de atracción de las moléculas impide que partículas de suciedad puedan pegarse a los pies de estos animales. En efecto, los pies de este pequeño lagarto se auto-limpian constantemente. Los científicos están trabajando para crear adhesivos basados en este principio.	●	●	
Pintura auto-lavable		Las propiedades de superhidrofobicidad y autolimpiantes de la flor de loto y otras plantas han sido replicadas en el desarrollo de recubrimientos, pinturas, tejas y otras superficies para que permanezcan secas y limpias.	●	●	
Velcro		George de Mestral tomó la idea a partir de las semillas que quedaron adheridas a su ropa y al pelo de su perro, en las cuales observó espinas que terminaban en pequeños ganchos.		●	
Radar		Se inspira en la eco localización que tienen los murciélagos para no chocar en la oscuridad. El hecho de que el sistema de radar de un murciélago no sea afectado por la emisión simultánea de todas las ondas emitidas por los restantes murciélagos, o bien, por los rebotes de todos los ecos contra el suelo u otros planos, es algo que sigue siendo estudiado ya que no se ha podido eliminar el problema de estas interferencias en los radares actuales con la precisión que lo hacen estos mamíferos.		●	
Vehículo biomimético Mercedes-Benz		Este auto concepto tiene una gran aerodinámica y un diseño ligero y seguro inspirado en el Pez Cofre, cuya aerodinámica se ve potenciada por su forma cúbica. Así mismo es un buen ejemplo de rigidez con bajo peso, ya que su piel está formada por numerosas escamas en forma de placas hexagonales que le proporcionan una elevada rigidez con un peso mínimo y le protegen eficazmente de posibles lesiones. Los cálculos muestran que empleando este principio, el peso total del vehículo se redujo alrededor de un tercio, sin disminuir la fuerza y la seguridad del vehículo ante una colisión.		●	●
Alfombras modulares Interface		Inspiradas en los patrones aleatorios, no direccionales, generados por las hojas caídas en los suelos de los bosques, en donde, al remover una hoja, la estética del suelo no varía. Estas propiedades ocultan la diferencia entre segmentos de alfombra vieja y alfombra nueva, logrando extender el ciclo de vida de la alfombra completa.		●	●
Navicula David Trubridge		Lámpara cuya forma fue inspirada en las diatomeas, un grupo de algas unicelulares.			●
Hyphae Nervous systems		Hyphae es una colección de lámparas impresas en 3D, inspirada en las estructuras de venas que llevan fluidos a los organismos. Su forma es generada a partir de una simulación que usa principios de crecimiento para construir estructuras orgánicas y escultóricas. Parte de una superficie simple y la simulación hace que la forma crezca en una red jerárquica en donde los nodos se ramifican y luego se unen. La estructura resultante, densa e interconectada, es a su vez ligera y fuerte.			●

Fuente: Elaboración propia.

El último ejemplo de la tabla, “Hyphae”, fue desarrollado por un estudio de diseño en Massachusetts llamado *Nervous System*, un estudio de diseño generativo que trabaja en la intersección entre la ciencia, el arte y la tecnología. Ellos crean empleando la simulación computacional para generar diseños y la fabricación digital para realizar los productos. Se inspiran en fenómenos naturales, escriben programas computacionales basados en los procesos y patrones encontrados en la naturaleza y luego usan esos programas para crear piezas únicas de arte, joyería y artículos de uso doméstico⁴.

Lo interesante de este tipo de productos es que, aunque la aplicación de la biomímesis tiene como finalidad una estética compleja y agradable, la generación de la forma no se da replicándola directamente, sino replicando los procesos naturales que la generan. Esto, según lo dicho por Benyus, es pasar al segundo nivel de la biomímesis y estar más cerca de la visión holística.

El imitar los procesos naturales no sólo permite la creación de formas complejas y escultóricas, sino que podría implementar mejoras en los aspectos funcionales y estructurales de los productos. Es por esto que, actualmente, existe una nueva tendencia en el diseño de productos y en la arquitectura hacia el uso del diseño paramétrico y generativo, en donde el diseñador no diseña el objeto sino los procesos para generar el objeto haciendo uso de la lógica y algoritmos matemáticos. Este tipo de diseño evidencia la importancia de la matemática como lenguaje universal y como herramienta para leer e interpretar los fenómenos naturales y hacer uso de ellos en las creaciones humanas.

1.1.7. Matemáticas en la biomímesis.

Mientras que los científicos tratan de entender el mundo natural, los matemáticos tratan de estructurar ese proceso de entendimiento buscando generalidades y determinando las reglas detrás de ellas para explicar el mundo natural, pues como dice Galileo Galilei: "El Universo está escrito en Lenguaje Matemático". De esta forma los matemáticos dan a los científicos herramientas para calcular y predecir lo que la naturaleza hace, así como para controlar sus procesos y hacer uso de lo que se ha aprendido de ella para satisfacer determinadas necesidades del hombre (Stewart, 1995).

El diseño paramétrico y generativo es una herramienta que permite la creación y el desarrollo de formas y estructuras a través de algoritmos matemáticos, siendo éste una excelente opción para los diseñadores que buscan emular a la naturaleza más allá de lo puramente decorativo, analizando matemáticamente los patrones encontrados para generar morfologías más complejas y funcionales.

1.1.7.1. Diseño paramétrico y generativo como herramienta para desarrollar productos inspirados por la naturaleza.

Actualmente la cultura del diseño está fuertemente influenciada por el trabajo colaborativo e interdisciplinario, logrando que saberes tan disímiles como la matemática y la biología estén íntimamente conectados con los procesos de diseño. Esto se evidencia en aplicaciones en el arte y el diseño de un nuevo paradigma que proviene de las matemáticas y la física: los sistemas generativos.

El diseño generativo hace uso de estos sistemas, los cuales son dinámicos, autónomos y capaces de auto-ensamblarse y auto-organizarse de manera similar a los sistemas que se observan en la naturaleza, logrando ofrecer nuevas experiencias estéticas y productos novedosos.

⁴ https://n-e-r-v-o-u-s.com/about_us.php

Según McCommack, Dorin y Innocent (2004) el mundo está cada vez más influenciado por los sistemas y artefactos electrónicos y el rol del diseño está cambiando como consecuencia de esa influencia. Las prácticas establecidas de diseño podrían ser inadecuadas e insuficientes, por lo que el diseño debe adaptarse a la implacable innovación y al desarrollo tecnológico. Integrar sistemas generativos al proceso de diseño permite el desarrollo de soluciones novedosas que hubieran sido imposibles de lograr empleando otros métodos.

El diseño generativo ofrece una metodología y filosofía que ve el mundo en términos de procesos dinámicos y sus resultados, en donde el diseñador no diseña el objeto sino los procesos para generar el objeto haciendo uso de la lógica y algoritmos matemáticos e impone ciertos límites al caos de todos los resultados posibles para que surja un resultado autónomo e impredecible. Como lo menciona Kuhn (1996), el diseño generativo ofrece un cambio para el proceso de diseño y la expresión de ese proceso. La conceptualización cambia de darle prioridad al objeto a darle prioridad a la interacción entre los componentes, los sistemas y los procesos para generar nuevos artefactos con propiedades nuevas y especiales.

Dichas propiedades se encuentran por lo general por fuera de las expectativas del diseñador o de las conceptualizaciones del diseño, obteniendo resultados que no fueron anticipados. Lo anterior quiere decir que el proceso, *“aunque es determinístico, no es predecible”* (Hansmeyer, 2012). Esto puede ser un problema para el diseño generativo, particularmente si el diseñador está acostumbrado a visualizar el estado final de lo que diseña.

1.1.7.2. Diseño generativo y su relación con la naturaleza.

Los sistemas generativos están fuertemente relacionados con el concepto de síntesis, el cual se hace evidente en la naturaleza y los procesos naturales. La diversidad y la adaptabilidad de la vida en La Tierra demuestran el potencial que tienen los procesos de síntesis para resolver problemas en diseño y generar novedad y diversidad a partir de unidades relativamente simples (McCommack, Dorin y Innocent, 2004).

Mediante el diseño generativo inspirado en la naturaleza, el desarrollo de productos se beneficiará de la interacción de diseñadores con matemáticos, ingenieros y biólogos.

1.1.8. Reto de la biomímesis: Biólogos involucrados en el proceso de diseño.

Según Volstad y Boks (2008), muchos diseñadores son conscientes de la gran cantidad de información que se encuentra en la naturaleza y de las oportunidades que ofrece el descifrarla, sin embargo, se les es difícil acceder a esta información ya que se encuentra, en su mayoría, en un lenguaje técnico y científico escrito especialmente para biólogos. Son varias las herramientas que se han desarrollado en el intento de ayudar a los diseñadores en la comprensión de las funciones de diseño e ingeniería detrás de dicho lenguaje biológico.

BaDT (del inglés, Biologists at the Design Table) es un intento de *“The Biomimicry Guild”*⁵ (actualmente Biomimicry 3.8) para introducir a los biólogos en el proceso de diseño de tal forma que se vuelven expertos trasladando estrategias naturales en estrategias que satisfacen retos de diseño. Éstos responden preguntas técnicas y participan en sesiones creativas para detectar la forma en la que la naturaleza puede mejorar un producto o proceso.

⁵ Primera consultoría en biomímesis, fundada en 1998 por Janine Benyus. Disponible en <https://biomimicry.net/>

Los fundadores de “Biomimicry 3.8” también han desarrollado una metodología y programas de entrenamiento que se emplean a nivel mundial, comparten casos de estudio y tienen un grupo conformado por los principales líderes mundiales en pensamiento biomimético, en varias áreas del conocimiento, a los cuales se puede acceder para lograr aplicar las estrategias naturales de forma eficiente y lógica en el proceso de diseño. Aunque es una excelente opción para conectar a los diseñadores con la biología es una opción muy costosa.

Existen también algunas bases de datos que intentan presentar a los diseñadores e ingenieros, de forma fácil y clara, la información biológica que necesitan. Un ejemplo es “AskNature”⁶, un sitio en donde los diseñadores, ingenieros y arquitectos pueden usar herramientas avanzadas para buscar información, encontrar expertos y colaborar para encontrar ideas que potencialmente solucionen sus retos.

Este proyecto hace uso de la metodología propuesta por “Biomimicry 3.8”, la cual se explica en el siguiente capítulo, sin embargo, no accede a sus capacitaciones debido a su alto costo. También hace uso de la base de datos de “AskNature”, sin embargo, como la información encontrada no es suficiente, se trabaja con biólogos expertos en el tema de estudio para comprender mejor como el referente natural seleccionado puede aportar al proceso diseño.

El trabajo con los biólogos presentó retos, ya que ellos describieron detalladamente el referente, sin embargo, cuando se les preguntaba el porqué de ciertas formas, patrones y comportamientos ellos no tenían la respuesta. Fue importante incluir expertos en ingeniería y física para encontrar los fenómenos involucrados en la determinación de la forma y luego, al poner en común el aporte de cada experto, se generaron las hipótesis necesarias para poder aplicar los conocimientos adquiridos de la naturaleza en el desarrollo del producto.

Con este proyecto se llega a la conclusión de que más que preparar biólogos para involucrarlos en un proceso de diseño, es importante conformar grupos de expertos interdisciplinarios que logren hacer las conexiones pertinentes entre las diferentes áreas para generar estrategias que permitan generar soluciones eficientes inspiradas en el referente natural que se analiza.

1.2. JUSTIFICACIÓN

1.2.1. Social

Según los Franciscanos alemanes, “el futuro del hombre depende de que le demos un futuro a la naturaleza” (Zaffaroni, 1988). El medio ambiente afecta y condiciona las circunstancias de vida de las personas y la sociedad en su conjunto.

La actual sociedad de consumo cada vez quiere más bienes, adquiere más y nunca llega a satisfacerse, lo que se refleja en un abuso de los recursos naturales.

Al diseñar productos que reflejen las estrategias que la naturaleza usa para subsistir y que imiten su eficiencia, no sólo se generan productos sostenibles, sino que son medios para promover una educación ambiental dentro de la actual sociedad de consumo, brindando información para hacer conciencia sobre los comportamientos humanos y su decisiva influencia en el ambiente.

⁶ Base de datos que está siendo desarrollada por “The Biomimicry Institute”, disponible en <https://asknature.org/>

1.2.2. Económica

Dentro de las estrategias de diseño propuestas por la biomímesis para lograr buenos estándares de sostenibilidad, está el ser eficiente con el uso de los recursos, empleando el diseño multifuncional. Si un producto contiene menos piezas, se necesita menos tiempo de ensamble, reduciendo así los costos de montaje. Además, la reducción del número de piezas en un conjunto, tiene el beneficio añadido de reducir el costo general total de partes en el producto.

Otra de las estrategias propuestas es usar procesos con poca energía, lo que se traduce en ahorros económicos.

1.2.3. Tecnológica

Integrar sistemas generativos al proceso de diseño permite el desarrollo de soluciones novedosas al darle prioridad a la interacción entre los parámetros que definen un objeto, y no al objeto en sí. Esta práctica permite adaptar el diseño a la implacable innovación y al desarrollo tecnológico, el cual está fuertemente influenciado por los sistemas y artefactos electrónicos.

El diseño asistido por algoritmos permite generar formas complejas así como modificarlas fácilmente. Este tipo de diseño se ve favorecido por las tecnologías de manufactura aditiva, la cual permite la fabricación rápida de prototipos y producción a pequeña escala.

Si los algoritmos generadores de la forma están pensados para transferir tecnologías biológicas hacia las áreas de la ingeniería y el diseño, es muy probable obtener productos eficientes y con mejor desempeño.

1.2.4. Ambiental

Un análisis biomimético permite entender la forma en que la naturaleza produce sin dañar el ambiente, considerando todo como parte de un sistema y teniendo en cuenta el ciclo de vida de las especies que sobreviven y prosperan en la tierra.

Al aplicar la biomímesis en un proceso de diseño se logra identificar patrones presentes en la naturaleza que permiten modelar estrategias innovadoras y evaluar diseños contra sus estándares de sostenibilidad. “La vida integra y optimiza esas estrategias para crear condiciones que conducen a la vida” (Biomimicry 3.8, 2016).

1.2.5. Académico

Aplicar el diseño generativo inspirado en la naturaleza en el desarrollo de un producto innovador, requiere una visión holística de la situación analizada, y por lo tanto, la interacción de profesionales en diferentes áreas (matemáticos, biólogos, ingenieros, diseñadores, etc.)

Este tipo de proyectos requiere de una estrategia multidimensional que permite integrar áreas del conocimiento en los estudiantes, reforzando fortalezas y mejorando debilidades al obligarlos dejar atrás una visión estática, limitante y unidireccional.

1.2.6. Personal

El principal objetivo de éste proyecto es el de obtener el título de Magíster en Ingeniería y el de poder aplicar todos los conocimientos adquiridos durante mis estudios para desarrollar soluciones innovadoras que satisfagan necesidades del mundo real.

El hecho de haber seleccionado el diseño generativo y la biomímesis como temas centrales del proyecto se debe a mis dos grandes pasiones, las matemáticas y la naturaleza.

Debo aceptar que como diseñadora me he sentido un poco frustrada, por no tener buenas habilidades para el dibujo. Con este proyecto busco explorar el potencial del diseño asistido por algoritmos como herramienta para comunicar ideas y desarrollar conceptos de diseño, y así aprovechar mis fortalezas para minimizar mis debilidades.

Así mismo, como docente del Departamento de Ingeniería de Diseño de Producto (IDP), he evidenciado que parte del mal desempeño de los estudiantes en materias que impliquen lógica y operatividad matemática, es su falta de interés por este tipo de razonamiento.

Me atrevo a decir que el poco interés se debe a la forma en que se presentan los contenidos. La mayoría de los estudiantes de IDP sienten más afinidad por los aspectos estéticos del proceso creativo. El diseño asistido por algoritmos es una herramienta que permite materializar y volver tangible la belleza abstracta de las matemáticas, por tanto, puede ser una herramienta pedagógica para despertar el interés de los estudiantes por el razonamiento matemático y para inculcarles una gran verdad: en las matemáticas, lo bello y lo útil van de la mano.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Abstraer estrategias biológicas de un referente natural y, a partir de una síntesis geométrica de su morfología, implementar un algoritmo para diseñar un producto eficiente, logrando un equilibrio entre lo estético, lo funcional y la economía de los recursos.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Identificar una oportunidad para innovar en el desarrollo de productos, aplicando el diseño generativo inspirado en la naturaleza.
2. Buscar información para tener una descripción más completa del producto a desarrollar.
3. Identificar las funciones del producto cuyos principios de solución pueden ser bioinspirados.
4. Determinar cuáles de los principios de vida propuestos por “Biomimicry 3.8” van a ser integrados a la solución para hacer el producto más sostenible.
5. Definir las especificaciones que determinaran los aspectos principales del producto.
6. Divergir en la naturaleza en búsqueda de referentes para, luego de analizarlos y evaluarlos, converger en la selección de aquél que mejor cumple con los requerimientos formales y funcionales del producto.
7. Abstraer estrategias biológicas de tipo morfológico, estructural, funcional y contextual del referente.
8. Desarrollar una síntesis geométrica de la morfología del referente seleccionado, identificando geometrías, patrones, proporciones relevantes y su funcionalidad.

9. Implementar un algoritmo basado en los procesos, patrones y relaciones geométricas encontradas.
10. Generar y evaluar varias alternativas de solución para desarrollar un concepto preliminar teniendo en cuenta aspectos funcionales, formales y sostenibles.
11. Desarrollar un prototipo virtual del concepto para afinar, optimizar y detallar la solución.

1.4. ALCANCE

Se considera dentro del alcance del proyecto la elaboración de:

- Reporte final con el proceso de diseño y los resultados del análisis biomimético del reino Fungí.
- Modelación 3D de las alternativas iniciales para realizar pruebas virtuales y fotométricas.
- Modelación 3D de la alternativa final, considerando el diseño para el ensamble.

2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo de este proyecto integra tres metodologías, una enfocada en la biomímesis, otra enfocada en el proceso de la ingeniería de diseño y la última enfocada en el proceso de formalización a partir de la búsqueda natural.

2.1. PERSPECTIVA DE DISEÑO DE LA BIOMÍMESIS.

No es mucha la literatura existente acerca de cómo los diseñadores pueden hacer uso de la biomímesis en sus procesos de diseño, la información actual está dispersa o enlazada con información de otras áreas del conocimiento. Sin embargo “Biomimicry 3.8”, en sus más de 15 años de trabajo practicando y enseñando biomímesis, ha desarrollado una metodología para entender las soluciones de la naturaleza. Es un conjunto de herramientas a las que llaman Perspectiva de Diseño de la Biomímesis, que resultan en un proceso guiado para utilizar la genialidad de la naturaleza para informar el diseño humano (Biomimicry 3.8, 2016).

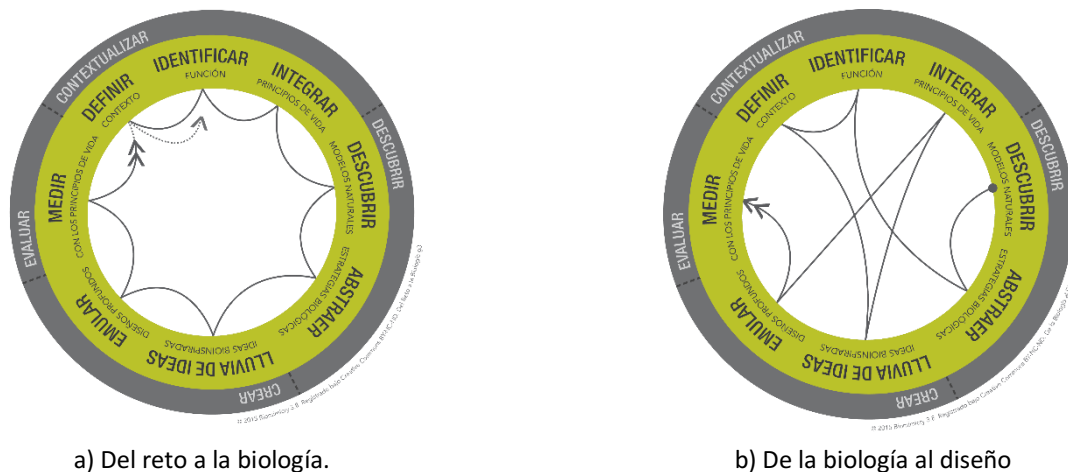
Siendo similar a una metodología, el pensamiento biomimético es un marco de referencia creado para ayudar a las personas a practicar la biomímesis en cualquier diseño. Existen cuatro áreas en las cuales la Perspectiva de Diseño de la Biomímesis provee el mayor valor en el proceso de diseño (independientemente de la disciplina en la cual está siendo integrada): contextualizar, descubrir, crear y evaluar. Seguir los pasos específicos dentro de cada fase ayuda a la integración exitosa de las estrategias de la vida dentro de los diseños humanos. Según el enfoque que se tenga, se siguen los pasos de diferentes maneras, como se muestra en la figura 13.

2.1.1. Del reto a la biología.

Del reto a la biología es un camino específico a través del pensamiento biomimético, útil en escenarios en donde se parte de un problema específico y se buscan inspiraciones biológicas para la solución.

2.1.2. De la biología al diseño.

Este camino es el más apropiado cuando su proceso se inicia con una inspiración biológica que busca ser manifestada como un diseño.



a) Del reto a la biología.

b) De la biología al diseño

Figura 13. Fases y pasos del pensamiento biomimético.

Fuente: Biomimicry 3.8 (2016).

2.2. EL PROCESO DE LA INGENIERÍA DE DISEÑO.

El pensamiento biomimético descrito anteriormente provee un contexto de cómo la biomimesis encaja dentro del proceso de diseño de cualquier disciplina y escala, dando herramientas a cualquier persona responsable de concebir, crear e implementar ideas que influyen la cultura, la tecnología, lo social, lo científico o los sistemas financieros a cualquier escala.

Teniendo en cuenta que este proyecto está inmerso en el área de la Ingeniería de Diseño de Producto se analizan varias de las metodologías existentes para orientar su proceso creativo, basándose en el trabajo realizado por Howard, Culley, y Dekoninck (2010). De esta forma se busca generar una metodología más específica para orientar a los ingenieros de diseño en un proceso en donde busquen aplicar la biomimesis.

Howard, Culley, y Dekoninck (2010) analiza detalladamente varias de las metodologías existentes generando un marco de referencia (ver tabla 2) en donde define los límites del proceso de diseño, resaltando las semejanzas y las diferencias entre las fases de dicho proceso sugeridas por cada autor.

Tabla 2. Modelos del proceso de diseño.

Models	Establishing a Need Phase	Analysis of Task Phase	Conceptual Design Phase	Embodiment Design Phase	Detailed Design Phase	Implementation Phase
(Booz <i>et al.</i> 1967)	X	New Product Strategy Development	Idea Generation ; Screening & Evaluation	Business Analysis ; Development	Testing	Commercialisation
(Archer 1968)	X	Programming ; Data collection	Analysis ; Synthesis	Development	Communication	X
(Svensson 1974)	Need	X	Concepts ; Verification	Decisions	X	Manufacture
(Wilson 1980)	Societal Need	Recognize & formalize ; FR's & constraints	Ideate and Create	Analyze and/or test	Product, prototype, process	X
(Urban <i>et al.</i> 1980)	Opportunity Identification	Design		Testing		Introduction ; Life Cycle (Launch) ; Management
(VDI-2222 1982)	X	Planning	Conceptual Design	Embodiment Design	Detail Design	X
(Hubka <i>et al.</i> 1982)	X	X	Conceptual Design	Lay-out Design	Detail Design	X
(Crawford 1984)	X	Strategic Planning	Concept Generation	Pre-technical Evaluation	Technical Development	Commercialisation
(Pahl <i>et al.</i> 1984)	Task	Clarification of Task	Conceptual Design	Embodiment Design	Detailed Design	X
(French 1985)	Need	Analysis of Problem	Conceptual Design	Embodiment of Schemes	Detailing	X
(Ray 1985)	Recognise Problem	Exploration of Problem ; Define Problem	Search for Alternative Proposals	Predict Outcome ; Test for Feasible Alternatives	Judge Feasible Alternatives ; Specify Solution	Implement
(Cooper 1986)	Ideation	Preliminary Investigation	Detailed Investigation	Development ; Testing & Validation	X	Full Production & Market Launch
(Andreasen <i>et al.</i> 1987)	Recognition of Need	Investigation of Need	Product Principle	Product Design	Production Preparation	Execution
(Pugh 1991)	Market	Specification	Concept Design		Detail Design	Manufacture ; Sell
(Hales 1993)	Idea, Need, Proposal, Brief	Task Clarification	Conceptual Design	Embodiment Design	Detail Design	X
(Baxter 1995)	Assess innovation opportunity	Possible Products	Possible Concepts	Possible Embodiments	Possible Details	New Product
(Ulrich <i>et al.</i> 1995)	X	Strategic Planning	Concept Development	System-Level Design	Detail Design	Testing & Refinement ; Production Ramp-up
(Ullman 1997)	Identify Needs ; Plan for the Design Process	Develop Engineering Specifications	Develop Concept	Develop Product		X
(BS7000 1997)	Concept ; Feasibility		Implementation (or realisation)			Termination
(Black 1999)	Brief/Concept	Review of 'State of the Art'	Synthesis ; Inspiration	Experimentation ; Analysis / Reflect	Synthesis ; Decisions to constraints	Output ; X
(Cross 2000)	X	Exploration	Generation	Evaluation	Communication	X
(Design Council 2006)	Discover	Define	Develop	Deliver		X
Industrial Innovation Process (2006)	Mission Statement	Market Research	Ideas Phase	Concept Phase	Feasibility Phase	Pre Production

Fuente: Howard, Culley, y Dekoninck (2010).

La tabla permite identificar las fases del proceso de diseño que son comúnmente aceptadas por la mayoría de los autores, las cuales abarcan las cuatro fases principales del proceso de diseño; 'clarificar el problema', 'diseño conceptual', 'corporificación' y 'diseño de detalle'. Algunos autores involucran también, precediendo las cuatro fases principales, una fase de 'establecer la necesidad', en donde se reconoce la necesidad que impulsa el proceso de diseño. Siguiendo las cuatro fases principales se encuentra la fase de 'implementación' encargada de detallar lo que pasa cuando los documentos finales de la solución se han completado; contiene todas las actividades que se deben

realizar, luego de completar la fase de diseño, para la fabricación del producto y su introducción al mercado.

Howard, Culley, y Dekoninck (2010) resalta que estos modelos integran la evaluación y la selección de ideas y conceptos, es decir, tienen periodos separados de generación (divergencia) y evaluación (convergencia), lo que es una buena práctica en el proceso creativo del ingeniero de diseño. En los periodos de evaluación el diseñador puede regresar a las fases anteriores, lo que hace que el proceso sea no lineal.

El proceso de diseño seguido en este proyecto, más que centrarse en satisfacer las necesidades de un usuario determinado, está enfocado en el desarrollo de un producto innovador haciendo uso de la biomímesis y del diseño generativo, por lo que abarca las cuatro fases principales y la fase preliminar con un enfoque tecnológico e incorpora los periodos de divergencia y convergencia en cada una de estas fases, así como ciclos de retroalimentación. La fase de 'implementación' no es tenida en cuenta ya que el alcance del proyecto es el desarrollo de un prototipo virtual para hacer pruebas y validar que el diseño del producto cumple con las especificaciones establecidas; las actividades posteriores al diseño (la fabricación del producto y su introducción al mercado) están fuera del alcance.

El modelo mostrado en la figura 14 resume el proceso de la ingeniería de diseño según lo analizado por Howard, Culley, y Dekoninck (2010), también teniendo en cuenta conocimientos personales, la experiencia obtenida planificando procesos de diseño y está delimitado por el alcance del proyecto.

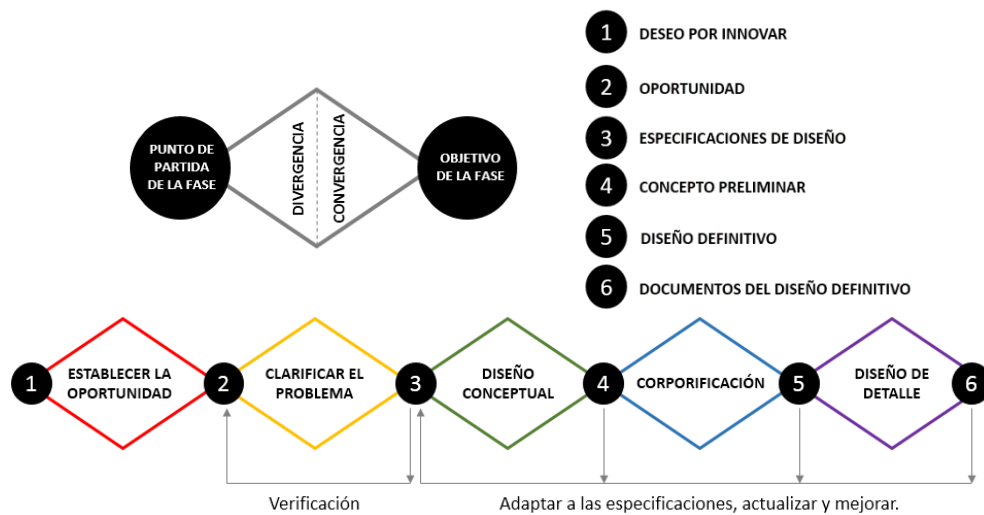


Figura 14. Modelo del proceso de la ingeniería de diseño.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen las actividades de cada fase.

- *Establecer la oportunidad:* Reconocer la necesidad/oportunidad que impulsa el proceso de diseño.

- *Clarificar el problema:* Reunir la información necesaria; analizando el mercado, la competencia, las tendencias, el usuario y el contexto, para desarrollar un planteamiento de lo que se busca solucionar con el diseño. Involucra el establecimiento de las necesidades que

requieren ser resueltas, identificar los objetivos que deben ser alcanzados, identificar que sectores del mercado serán beneficiados con la solución así como identificar posibles restricciones y limitaciones.

- *Diseño Conceptual*: Generar posibles alternativas de solución y luego de evaluarlas, teniendo en cuenta las especificaciones determinadas en la fase anterior, se selecciona y se genera el concepto que mejor cumple con dichas especificaciones. El éxito de esta fase se logra con mucha creatividad y teniendo información eficiente y clara para evaluar los conceptos. Es recomendable abstraer la función principal en subfunciones, para simplificar el análisis y luego combinar sistemáticamente los principios solución para la generación de alternativas.

- *Corporificación*: En esta fase se avanza en la concretización de una solución al problema, determinando componentes e interacciones con el suficiente grado de detalle como para poder evaluar objetivamente. Se obtienen formas específicas, materiales propuestos y planos de conjunto con dimensiones generales, que representan al producto como un conjunto organizado de piezas, componentes, enlaces y acoplamientos (Torres, 2013).

- *Diseño de detalle*: Afinar y definir en forma detallada los materiales, dimensiones y ensambles del diseño final, haciendo las pruebas necesarias para este refinamiento y optimización, antes de establecer las especificaciones necesarias para la producción del producto.

2.3. EL PROCESO DE FORMALIZACIÓN A PARTIR DE LA BÚSQUEDA NATURAL.

Este proyecto busca aprovechar la fuerte relación entre forma y función en la naturaleza para aplicarla en el diseño y desarrollo de un producto. El siguiente modelo (ver figura 15), propuesto por Patiño y Arbeláez (2009), propone estrategias para analizar las morfologías y patrones con los que construye la naturaleza para evolucionar la forma empleando las técnicas constructivas naturales.

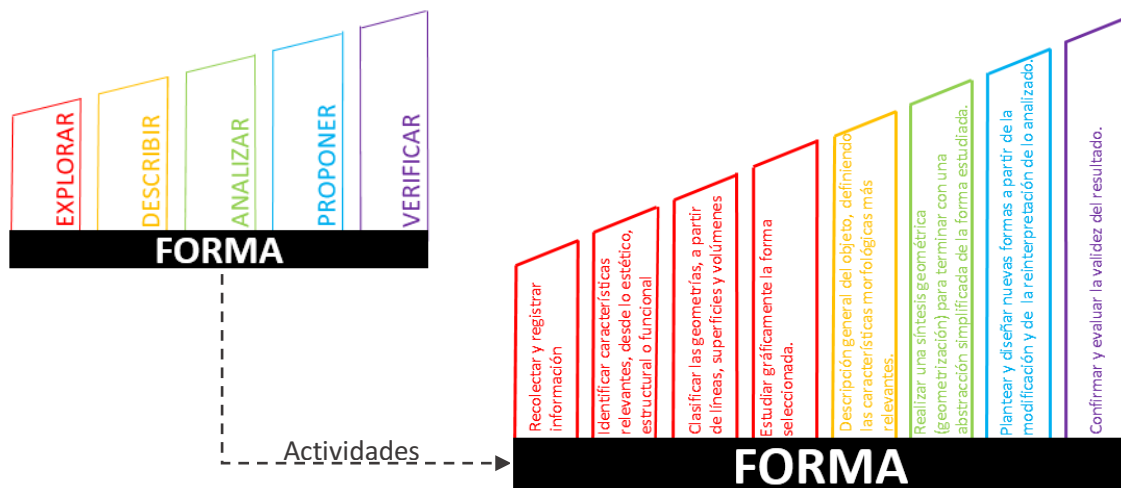


Figura 15. Modelo del proceso de formalización a partir de la búsqueda natural.

Fuente: Adaptado de Patiño y Arbeláez (2009).

Para hacer posible la deconstrucción de la forma natural y la reconstrucción de nuevas morfologías este método propone las siguientes actividades en cada una de sus fases:

- *Explorar*: Su objetivo es la indagación, la revisión, la detección, la observación, el registro y el reconocimiento de formas presentes en la naturaleza. En esta fase es importante el trabajo de campo para hacer registros fotográficos y analizar el entorno en donde se encuentra el referente natural. También es útil la experiencia con expertos y la revisión de textos recomendados.

Luego de realizar la recolección y el registro de información necesaria para comenzar el estudio, se busca identificar características evidentes, relevantes o repetitivas. Estas características no solamente están dadas por la forma como forma, sino como estructura o como soporte de una función. Es decir, se pueden elegir configuraciones que sobresalgan por los atributos estéticos, estructurales o por cualidades funcionales que se encuentran representadas formalmente.

A partir del registro fotográfico de esas características se hace una búsqueda de las vistas más relevantes, los detalles y la perspectiva, luego se procede a clasificar geoméricamente las formas estudiadas (a partir de la línea recta, línea curva, de las superficies o volúmenes) y a estudiarlas gráficamente para comprender la razón de su morfología y de los elementos que intervienen en su estructura.

- *Describir*: Se busca adquirir mayor profundidad en el estudio, mediante una descripción general del objeto y definiendo las propiedades y las características morfológicas más relevantes: dimensiones, proporción, simetrías, superficies, texturas, presencia de dilataciones y patrones encontrados.

- *Analizar*: Acá se concluye el análisis gráfico de la forma estudiada para pasar a la modificación y transformación formal. Busca analizar a través de la comparación y de la descomposición aquellos elementos formales más relevantes desde lo estético o lo funcional, para luego realizar una síntesis geométrica⁷ en donde se hace una nueva lectura de la forma desde las figuras y cuerpos geoméricos para terminar con una abstracción simplificada de la forma estudiada.

- *Proponer*: Plantear y diseñar nuevas formas a partir de la modificación y de la reinterpretación de lo analizado. Las modificaciones pueden ser a partir de los principios de crecimiento formal natural (descritos en el numeral 1.1.5.) o a partir de herramientas de variación geométrica (simetría de espejo, de rotación y de traslación) y de herramientas de variación formal básica (dilataciones y ruptura de la simetría).

- *Verificar*: Confirmar y evaluar la validez del resultado, describiendo las características y propiedades de la nueva forma y valorando el resultado.

⁷ Síntesis geométrica: Simplificar la forma reconociendo las figuras geométricas que estructuran al objeto para comunicar de forma clara y precisa las características morfológicas encontradas. Herramientas como la geometrización ayudan a este fin.

2.4. METODOLOGÍA DEL PROYECTO.

La metodología propuesta para el proyecto integra los tres modelos anteriores (ver figura 16) y sigue los pasos propuestos por el pensamiento biomimético, con el enfoque “del reto a la biología”. Teniendo en cuenta que el modelo propuesto por “Biomimicry 3.8” es muy general, éste es adaptado para hacerlo más comprensible para los ingenieros de diseño, adicionando elementos propios de esta disciplina. Para esto, las cuatro fases generales del proceso de diseño propuestas por “Biomimicry 3.8” (contextualizar, descubrir, crear y evaluar) son sustituidas por las fases del proceso de diseño de la ingeniería de diseño, planteadas en el modelo de la figura 14, las cuales son familiares para la mayoría de los ingenieros de diseño.

Las fases del proceso de la ingeniería de diseño se integran con aquellas del proceso para la formalización a partir de la búsqueda natural, para así generar un estudio de la forma profundo. Esto debido a que las metodologías del proceso de la ingeniería de diseño tienen un enfoque más funcional que formal y, para este proyecto, la relación entre la forma y la función es fundamental.

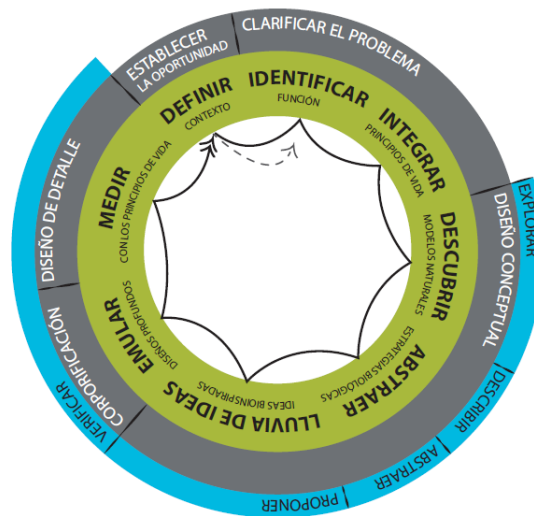


Figura 16. Modelo integrado.

Fuente: Elaboración propia.

Las actividades realizadas en casa fase, durante el desarrollo del proyecto, se describen a continuación:

2.4.1. Establecer la oportunidad.

Se identifica el estímulo que desencadena el inicio del diseño, determinando en que área (mercado, tecnologías, usuario y contexto) hay oportunidad para innovar en el desarrollo de productos, aplicando el diseño generativo inspirado en la naturaleza.

Para esto se busca literatura acerca de ambos temas, biomimesis y diseño generativo. Luego se desarrolla un estado del arte de productos relacionados con dichos temas.

2.4.2. Clarificar el problema.

Partiendo de la oportunidad detectada se busca información, en fuentes primarias y secundarias, para tener una descripción más completa del producto a desarrollar. Luego se determina la forma en que se puede aplicar la biomimesis en la búsqueda de soluciones, identificando aquellas

funciones cuyos principios de solución pueden ser bioinspirados y determinando cuales de los principios de vida propuestos por “Biomimicry 3.8” (ver figura 17) van a ser integrados a la solución para hacer el producto más sostenible.

2.4.2.1. Identificar función.

El análisis funcional, como herramienta, es propuesta en varias metodologías de diseño dentro de la fase del diseño conceptual, entre ellas Pahl et al. (2007) y la norma VDI 2221 (1986). En este proyecto, con el fin de delimitar el problema, esta herramienta es usada dentro de la fase de clarificar el problema, pues al dividir la función principal en subfunciones y al determinar la relación existente entre ellas es posible identificar aquellas cuyos principios de solución pueden encontrarse en algún referente natural. En este proceso se hace uso de algunas herramientas propuestas por Pahl et al. (2007) para el análisis funcional: la Caja Negra y la Estructura Funcional.

2.4.2.2. Integrar principios de vida.

Los principios de vida representan patrones encontrados en la mayoría de las especies que sobreviven y prosperan en la tierra. La vida integra y optimiza esas estrategias para crear condiciones que conducen a la vida. Aprender de esos patrones permite modelar estrategias innovadoras y evaluar diseños contra sus estándares de sostenibilidad (Biomimicry 3.8, 2016).

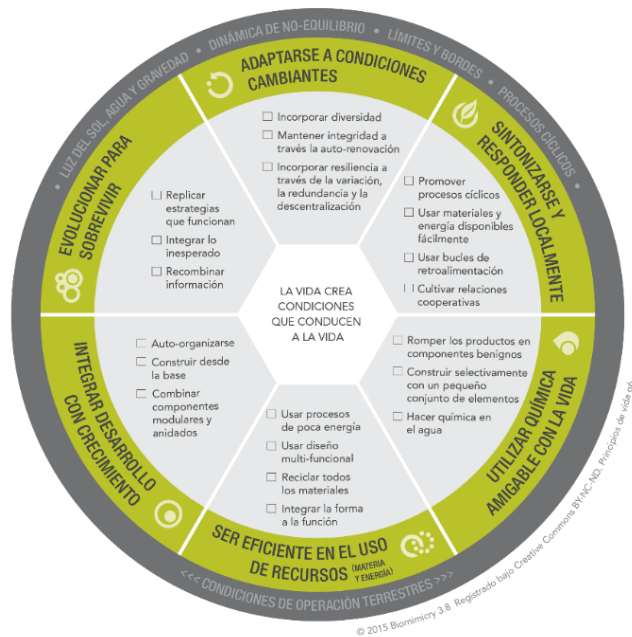


Figura 17. Principios de vida.
Fuente: Biomimicry 3.8 (2016).

El resultado de esta fase es una lista de especificaciones que determinan lo que debe hacer el producto, teniendo en cuenta las demandas de los usuarios (requisitos y deseos), los productos de la competencia, los requerimientos técnicos y los deseos del diseñador.

2.4.3. Diseño Conceptual.

Esta fase es, a nivel general, la más innovadora (French, 1985). En ésta se definen los aspectos funcionales y formales del producto para luego proponer varias alternativas de solución de tipo

esquemático y finalizar seleccionando la alternativa más conveniente para desarrollar en la siguiente fase.

Para esto se continúa con el análisis funcional iniciado en la fase anterior, empleando la Matriz Morfológica, propuesta por Cross (2008), para analizar los componentes y los principios de solución que mejor cumplen con los requerimientos funcionales propuestos. Posteriormente se proponen varias configuraciones hasta desarrollar la arquitectura básica del producto.

En la fase anterior se determinó cuáles de los principios solución serían bioinspirados, por lo que luego de desarrollar la arquitectura básica del producto se procede a “Descubrir modelos naturales” que servirán de referente formal y funcional para el diseño.

2.4.3.1. Descubrir los modelos naturales.

Esta es considerada la fase más importante del proyecto. Describe el proceso para divergir en la naturaleza en búsqueda de referentes que luego son analizados y evaluados, para converger en la selección de aquél que mejor cumple con los requerimientos formales y funcionales. Las actividades descritas en la fase “Explorar” del proceso de formalización a partir de la búsqueda natural se llevan a cabo para recolectar y analizar la información.

En este proceso es importante el trabajo colaborativo entre expertos de las diferentes áreas implicadas: diseño, ingeniería y biología. Cada uno aporta sus conocimientos para generar hipótesis que se corroboran con la constante retroalimentación de las partes.

El modelo de la figura 18 presenta los pasos a seguir y cuándo los expertos participan en el proceso según los objetivos.

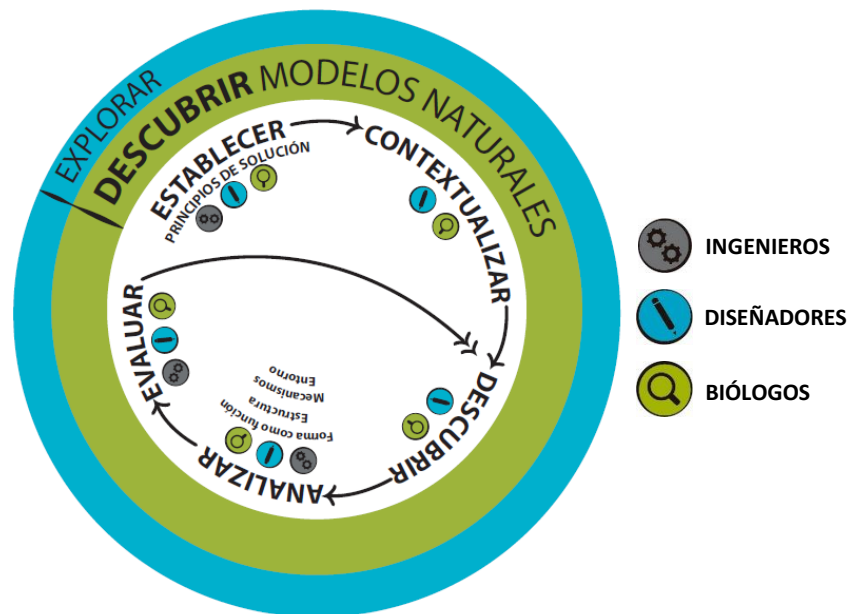


Figura 18. Modelo para “Descubrir modelos naturales”.

Fuente: Elaboración propia.

Las actividades a realizar en cada paso se describen a continuación.

- *Establecer principios de solución*: Se analizan los procesos físicos implicados en las subfunciones que buscan principios de solución bioinspirados. Luego se buscan procesos biológicos análogos y se selecciona el más adecuado para determinar el criterio de búsqueda de los referentes.

- *Contextualizar*: Una vez seleccionado el proceso biológico con el cual se busca bioinspirar la solución, se define el tipo de organismos que llevan a cabo dicho proceso y cuentan con potencial para encontrar soluciones innovadoras.

- *Descubrir*: Se recolecta información de los organismos definidos a través de fuentes primarias y secundarias. Es fundamental el trabajo de campo para analizar el entorno en el que se encuentran dichos organismos ya que las condiciones ambientales influyen considerablemente en sus características. El registro fotográfico y la búsqueda de imágenes en fuentes secundarias son información relevante que permite analizar cómo la forma de dichos organismos influye en las funciones que realizan.

- *Analizar*: Con la información recolectada se analizan los organismos de una forma general hasta llegar a lo específico, sus especializaciones. Estas especializaciones son condiciones que hacen único a cada organismo y a las cuales se le pueden hacer abstracciones de tipo morfológico, estructural, funcional y contextual.

La forma, la estructura, los mecanismos y el entorno son elementos que están directamente relacionados entre sí y tienen una característica común: la funcionalidad. Todos se complementan y ninguno tiene prelación sobre los otros. Estos son los cuatro elementos de análisis básicos para lograr una abstracción de las estrategias biológicas de un ser vivo (Méndez y Ojalvo, 2006).

El análisis formal implica identificar las líneas, superficies y volúmenes que determinan el aspecto exterior del organismo y determinar los aspectos funcionales que las generan. Este análisis se apoya en la descripción de las “formas naturales y su función” del numeral 1.1.4.

La estructura se refiere a la relación entre las partes de un todo y como están organizadas para optimizar procesos.

Al analizar los mecanismos se tiene en cuenta el conjunto de elementos cuyo propósito es la transmisión de movimiento y de fuerzas con el fin de ejecutar cualquier tipo de actividad, entre ellas las básicas para la supervivencia.

El entorno es el responsable de que los organismos desarrollen propiedades especiales directamente relacionadas con la adaptación y la supervivencia en determinadas condiciones, por lo que no se puede analizar un organismo sin hacer un análisis del entorno en el cual se desarrolla. Dentro de este análisis se incluyen condiciones geográficas, temperatura, humedad, relación con otros organismos, adaptaciones a posibles cambios del entorno, etc.

El trabajo colaborativo y la retroalimentación entre los expertos es de gran importancia en este proceso; según la experticia de cada uno se generan hipótesis que los demás pueden

aprobar o descartar. Vale la pena aclarar que el resultado de este análisis son hipótesis evaluadas por los expertos, más no afirmaciones verídicas. Comprobar su veracidad está fuera del alcance del proyecto.

- *Evaluar*: El proceso de evaluación involucra dos momentos. El primero corresponde a la evaluación y al análisis de las hipótesis planteadas para determinar si se aprueban o se descartan. En este proceso es importante recolectar más información y hacer más trabajo de campo para corroborar la afirmación que se evalúa. Una vez se aprueban las hipótesis por consenso entre los expertos se da el segundo momento, en donde se evalúa y se decide cuál de los organismos estudiados es el que mejor satisface los requerimientos formales y funcionales establecidos al “clarificar el problema”, sirviendo de referente para bioinspirar el proceso de diseño en las fases posteriores.

2.4.3.2. Abstractar estrategias biológicas.

Seleccionado el referente, se procede a estudiarlo en profundidad. Para esto es necesario recolectar varias muestras del organismo para analizarlas y estudiar su morfología más en detalle. Como material de apoyo se recomienda recolectar imágenes del organismo estudiado en fuentes secundarias.

En esta fase se llevan a cabo las actividades de las fases *Describir* y *Analizar* del proceso de formalización a partir de la búsqueda natural, descritas en el numeral 2.3.

El resultado es una síntesis geométrica de la forma del organismo estudiado, en donde se identifican geometrías, patrones, proporciones relevantes y su funcionalidad.

2.4.3.3. Lluvia de ideas bioinspiradas.

A partir de la síntesis geométrica, y teniendo en cuenta la arquitectura básica del producto, se plantean y diseñan varias alternativas de solución. La exploración de alternativas se hace empleando el diseño generativo y paramétrico mediante algoritmos, basados en los procesos y patrones encontrados. Variando los parámetros y sus relaciones, de forma controlada, se generan varias propuestas que luego son evaluadas para determinar el concepto que mejor satisface las especificaciones.

2.4.4. Corporificación.

Para concretizar la solución se busca emular los procesos naturales que inspiraron el proceso de diseño con el fin de determinar la eficiencia de la propuesta. Este proceso consiste en el análisis virtual de los mejores conceptos generados en la fase anterior, para evaluarlos, implementar mejoras y culminar con el desarrollo de un prototipo virtual de la mejor alternativa. Para llevar a cabo el análisis, se hace necesaria la selección de algunos componentes internos, materiales y procesos de manufactura.

2.4.5. Diseño de detalle.

En esta última fase se afina y se optimiza el diseño propuesto. El resultado es un prototipo virtual en donde se establece de forma detallada los materiales, dimensiones y ensamblajes del diseño final.

3. ESTABLECER LA OPORTUNIDAD

Dentro del diseño de producto, la forma y la función son elementos importantes que determinan el impacto que los objetos puedan generar en los usuarios. Es por esto que, en este proyecto, la naturaleza es considerada el mejor arquetipo de diseño, ya que en ella la forma y la función coexisten armónica y eficientemente.

Con el fin de comprender mejor el concepto de forma dentro de un proceso de diseño se buscó información sobre el enfoque que se le ha dado a éste a través del tiempo y cómo se ha relacionado con los aspectos funcionales de los productos. También se buscó información sobre las formas de la naturaleza, para comprender cómo, en el diseño natural, las formas son las encargadas de permitir funciones de supervivencia de los organismos.

Teniendo claro que la naturaleza es un excelente referente para inspirar el proceso de diseño, se buscó información sobre biomímesis, práctica que permite comprender los procesos naturales para aplicarlos en la solución de problemáticas de diseño. También se buscó información sobre diseño generativo y paramétrico, pues se considera que las matemáticas son la mejor herramienta para leer las formas naturales, emularlas y utilizarlas en el desarrollo de productos bioinspirados.

El marco teórico del numeral 1.1 presenta la información recolectada sobre los temas descritos, los cuales son los temas de interés del proyecto. A partir de esta información se reconoce la oportunidad para innovar en el desarrollo de productos, aplicando el diseño generativo inspirado en la naturaleza.

3.1. PRODUCTOS CON MORFOLOGÍAS NATURALES.

Según Nordin, Hopf y Motte (2013) las morfologías derivadas de la naturaleza han sido objeto de estudio frecuente para artistas y arquitectos, pero no para diseñadores, en parte por las variables técnicas implicadas en el diseño de producto. Mientras que los proyectos artísticos y de arquitectura que implementan las complejas morfologías naturales fabrican solo un ejemplar con recursos financieros ya establecidos, la mayoría de los proyectos de diseño de producto están sujetos a sistemas de producción en masa, en donde las formas complejas pueden entorpecer y demorar los procesos productivos, además de incrementar los costos.

Los autores explican que a estas formas se les dice complejas ya que producirlas manualmente es difícil y requiere tiempo, por lo que sugieren el uso del diseño generativo para facilitar la manipulación de dichas formas y el desarrollo de modelos virtuales para evaluar aspectos funcionales, estructurales y de manufactura de la solución.

La mayoría de ejemplos, en el diseño de producto, de morfologías naturales complejas, han sido producidos por procesos de prototipado rápido, ya que estas tecnologías permiten la fabricación de formas más complejas que los métodos convencionales de producción, además de que no requieren de costosos moldes, lo que permite variaciones en la forma según las necesidades de los usuarios.

3.2. ESTADO DEL ARTE DE PRODUCTOS CON MORFOLOGÍAS NATURALES.

Teniendo en cuenta lo dicho por Nordin, Hopf y Motte (2013), se hace un estado del arte de productos en la industria que usen este tipo de morfologías, para determinar en qué sectores se puede innovar con su desarrollo.

Estos autores sugieren que este tipo de morfologías se encuentran principalmente en la industria de la iluminación, el mobiliario, la joyería y los accesorios, industrias que permiten producciones en pequeñas cantidades y productos personalizados. Este proyecto se enfoca en la industria de la iluminación para poder hacer uso de los procesos de prototipado rápido en la fabricación del producto diseñado, aspecto que se dificulta para la industria del mobiliario por el tamaño de las estructuras. La joyería y los accesorios son productos puramente decorativos, mientras que en la industria de la iluminación hay mayor potencial para innovar integrando la forma con la función.

Los últimos dos ejemplos presentados en la Tabla 1, Navicula de David Trubridge e Hyphae de Nervous systems, hacen parte de los productos de la industria de la iluminación reconocidos por sus morfologías complejas naturales, sin embargo, la forma solo tiene fines decorativos. Otros ejemplos de este tipo de luminarias son Genesy de la arquitecta anglo-iraquí Zaha Hadid para Artemide (ver figura 19a), Nebula (ver figura 19b) y Cosmic Leaf (ver figura 19c) del diseñador inglés Ross Lovegrove, también para Artemide. Lovegrove, además de utilizar las formas para generar una estética orgánica, las utiliza para absorber y emitir la luz logrando generar efectos ópticos interesantes.

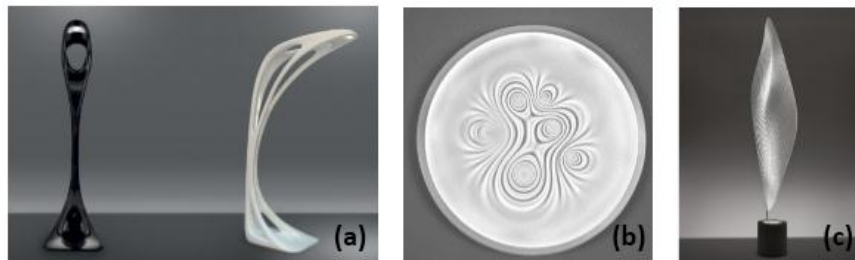


Figura 19. Lámparas con morfologías complejas naturales.

Fuente: www.artemide.com

Florensis (ver figura 20) es otra de las luminarias que Lovegrove diseñó para Artemide, la cual es interesante ya que su cuerpo con forma de capullo, fabricado con aluminio extruido y maquinado, tiene la doble función de direccionar la luz hacia arriba y hacia el exterior, además de disipar el calor producido por el arreglo de ledes de alta potencia que contiene (43W), haciendo innecesario el uso de los disipadores de calor convencionales.



Figura 20. Florensis (2013), Ross Lovegrove para Artemide.

Fuente: www.artemide.com

La solución propuesta por Lovegrove cumple con varios de los principios de vida propuestos por Biomimicry 3.8 en la figura 17, logrando ser una solución eficiente en el uso de los recursos. Esto se debe a que usa iluminación led, la cual es más eficiente y tiene menos impacto ambiental que las

tecnologías tradicionales de iluminación (fluorescente compactas e incandescentes), además integra la forma con la función de manera multifuncional, logrando que el cuerpo sirva tanto para direccionar la luz y disipar el calor.

Unterliden de Artemide (ver figura 21), luminarias diseñadas por la firma suiza de arquitectura y diseño Herzog & De Meuron, también cumplen con este principio multifuncional. Su cuerpo, disponible en aluminio o latón, aunque no tiene formas bioinspiradas, tiene la doble función de direccionar el flujo luminoso hacia abajo y disipar el calor producido por la fuente de luz, un led COB de 4W. El uso de led COB dentro de un cuerpo pequeño, con una estética simple y agradable, sin hacer uso de los notorios disipadores de calor, genera gran impacto en la industria de la iluminación.



Figura 21. Unterliden suspension (2014) y Unterliden table (2017), Herzog & De Meuron para Artemide.
Fuente: www.artemide.com

Otros ejemplos de luminarias cuyo cuerpo está fabricado con materiales con buena conductividad térmica para disipar el calor son LoT⁸ Reflector (ver figura 22), del diseñador finlandés Tapio Rosenius para Artemide, y New Tensoled (ver figura 23), de los diseñadores italianos Luta Bettonica y Mario Melocchi para su empresa CINI&NILS.



Figura 22. LoT Reflector (2016), Tapio Rosenius para Artemide.
Fuente: www.artemide.com



Figura 23. New Tensoled (2013), Luta Bettonica y Mario Melocchi para CINI&NILS.
Fuente: www.cinienils.com

⁸ Light over Time

Aunque la estética del cuerpo de estas luminarias es limpia y sencilla, su forma es muy similar a la de los difusores convencionales. Estas luminarias se caracterizan por generar experiencias, más que por la forma de su cuerpo, por la manera dinámica de emitir la luz. LoT Reflector trabaja con arreglos de ledes de 70W y la luz emitida es controlada mediante algoritmos que controlan parámetros del tiempo y del espacio para que ésta cambie y fluya como en la naturaleza, cambiando así la percepción visual del espacio para generar nuevas experiencias y recuerdos en los usuarios. New Tensoled trabaja con arreglo de ledes de 33W y crea escenarios de luz al regular la intensidad luminosa a través de sensores de presencia, luminosidad y crepusculares.

Florensis, Unterliden, Lot Reflector y New Tensoled reflejan una alternativa que, durante los últimos años, se está adoptando en la industria de la iluminación, creando luminarias cuyo cuerpo es fabricado completamente con materiales con conductividad térmica alta, de tal forma que, si se logra disipar el calor suficiente, éste no alcanza temperaturas peligrosas al tacto y conserva al led en un rango de temperatura seguro que no compromete su desempeño.

Adoptar esta alternativa en el desarrollo de este proyecto es una buena oportunidad para ofrecer un producto innovador en la industria de la iluminación, explorando referentes naturales cuyas formas permitan disipar el calor de forma efectiva sin comprometer la estética del producto.

3.3. OPORTUNIDAD DE IMPLEMENTAR MORFOLOGÍAS NATURALES EN EL DESARROLLO DE LUMINARIA LED.

A continuación, se explica con mayor profundidad las razones por las cuales se decide trabajar en la industria de la iluminación, particularmente con luminaria led.

La iluminación es importante para guiar a una persona a través de un espacio, además de que controla lo que ésta puede o no ver. Tiene la capacidad de reinventar los espacios y de darles identidad combinando lo artístico y lo tecnológico, logrando generar nuevas experiencias y recuerdos en las personas que allí se encuentran.

Actualmente la industria de la iluminación se encuentra en un proceso de transición, reemplazando las tecnologías tradicionales por tecnología led (Diodo Emisor de Luz). Ésta última tiene mayor eficacia luminosa (lm/W), no produce radiación UV ni IR, su producción no utiliza materiales tóxicos como el mercurio de las lámparas fluorescente, su ciclo de vida es amplio (alrededor de 50.000 horas frente a 30.000 horas para los tubos fluorescentes y menos de 2.000 horas para las bombillas incandescentes), tiene bajos costos de mantenimiento, la luz llega a su máxima intensidad rápidamente (entre 1 y 2 segundos) y su tamaño es pequeño, comparado con la luminaria que emplea otras fuentes de luz. Estos factores explican dicha transición (Sanin, 2014).

Las propiedades de esta nueva tecnología invitan a explorar nuevas formas de usar la luz que no eran posibles con las tecnologías existentes, retando a los diseñadores en la búsqueda de una estética apropiada que beneficie sus propiedades físicas.

3.3.1. La gestión térmica, aspecto más crítico del diseño del sistema led.

Rudi Hechfellner, Gerente de Aplicaciones para Philips Lumileds Lighting, afirma que la gestión térmica es el aspecto más crítico del diseño del sistema led. Según Hechfellner muchos fabricantes de estos sistemas tienen mucha más experiencia en los aspectos eléctricos y mecánicos que en los aspectos térmicos del diseño. "Lo que la comunidad de ingeniería necesita es un cambio de su modo de pensar y pensar primero en el aspecto térmico y luego en el eléctrico. La parte térmica representa

el 90% de los problemas de diseño de hoy en día para los fabricantes de sistemas led mientras que el eléctrico y mecánico juntos proporcionan sólo el 10%", dice Hechfellner (Mentor Graphics Corporation, 2011).

Los ledes producen luz convirtiendo energía eléctrica en energía radiante y calórica. Según el Departamento de Energía de EE.UU. (DOE), alrededor del 70% de la energía utilizada para conducir los ledes se convierte en calor. A diferencia de los métodos tradicionales de iluminación que irradian calor a los alrededores, los ledes lo conducen desde la junta (Tj) a la placa base del circuito subyacente (Tc) y a disipadores de calor (Td), cajas o envoltentes de la luminaria, hasta que llega al ambiente (Ta). La transferencia de calor se realiza entonces mediante una serie de pasos por conducción⁹, convección¹⁰ y radiación¹¹, como se muestra en la figura 24.

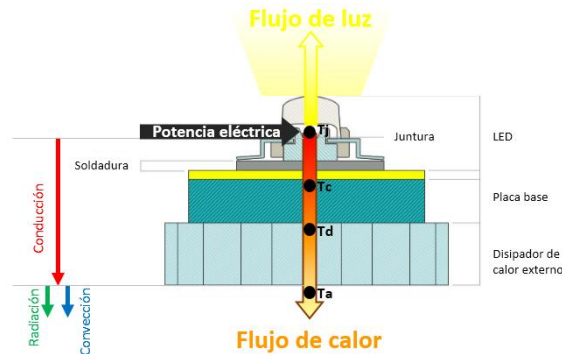


Figura 24. Flujo de energía en un led.
Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar la temperatura de junta (Tj), el desempeño del led se ve comprometido. El exceso de calor puede reducir la salida de luz del led, producir un cambio de color y disminuir la eficacia luminosa, lo que resulta en una vida útil más corta. El DOE dice que los fabricantes normalmente prueban los ledes a una temperatura de junta fija de 25°C. En funcionamiento constante la temperatura de la junta es típicamente 60°C o mayor y en estas condiciones, la salida de luz del led puede ser de 10% o más por debajo de la calificación, y en los productos con diseño térmico inadecuado, puede ser significativamente mayor (Mentor Graphics Corporation, 2011).

Los parámetros que afectan la temperatura de junta son exceso de corriente, una sobretensión, una insuficiente disipación térmica o su exposición a temperaturas elevadas. Al aumentar la corriente, aumenta la temperatura de junta y como éste es pequeña, la cantidad de calor generado por unidad de área es muy alta. Con el fin de no comprometer el desempeño del led, el exceso de calor debe ser removido y transferido al ambiente.

Para transferir el calor de la junta al ambiente se usan una serie de componentes caracterizados por tener alta conductividad térmica para que la tasa de transferencia sea alta. De estos componentes, el que más se hace evidente es el disipador de calor externo (Sanin, 2014).

⁹ Transferencia de calor entre dos medios que están en contacto directo y a diferente temperatura, debido a la agitación térmica de las moléculas, no existiendo un desplazamiento real de éstas.

¹⁰ Transferencia de calor por movimiento real de las moléculas de un medio. Se produce en fluidos en los que, por movimiento natural (diferencia de densidades) o circulación forzada (con la ayuda de ventiladores, bombas, etc.), las partículas más calientes se desplazan a las regiones más frías.

¹¹ Transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas, sin la necesidad de un medio de transferencia. Este proceso se hace notorio cuando la superficie alcanza temperaturas por encima de los 60°C (VS Lighting Solutions, 2015).

Según Mentor Graphics Corporation (2011), un disipador de calor externo puede ser necesario en situaciones en las que se disipa, excepcionalmente, gran cantidad de calor dentro del envoltorio. El cobre y el aluminio son los materiales de uso común para los disipadores de calor del led, el cobre ofrece conductividad térmica superior, mientras que el aluminio es más ligero y menos costoso. “La optimización de la geometría del disipador de calor es una preocupación crítica en muchas aplicaciones, ya que la resistencia térmica del disipador de calor al aire es a menudo importante. El rendimiento del disipador de calor varía dependiendo de factores tales como el material, número de aletas, el grosor de la aleta, espesor de la base, etc. Los disipadores de calor externos amplían el área superficial disponible para transferir el calor al ambiente. El diseño óptimo depende de las condiciones de flujo de aire locales que se ven afectadas por la introducción del disipador de calor, aumentando el desafío del diseño”.

La figura 25 presenta ejemplos luminarias led con disipadores de calor comunes.



Figura 25. Luminarias led con disipadores de calor comunes.

Fuente: www.lighting.philips.com.co

A pesar de su efectividad y bajo costo, estos disipadores se usan principalmente en luminarias técnicas para la iluminación industrial y comercial como alumbrado público, reflectores o bombillas empleadas en zonas donde no quedan tan visibles. En luminarias más decorativas, su presencia es escasa, ya que los diseñadores evitan usarlos pues comprometen la estética del producto. A diferencia de los demás componentes funcionales de las luminarias led como drivers, cables, etc.; estos disipadores requieren contacto directo con la atmósfera, condición que los hace difíciles de esconder dentro de una carcasa (Sanin, 2014).

Los arreglos de ledes de alta potencia y los ledes tipo COB (usados en las luminarias analizadas en el estado del arte el numeral 3.2.) son las fuentes de luz más eficientes en términos de consumo energético y tamaño, sin embargo, entre mayor sea la relación lumen/área, mayor es el calor generado, lo que hace que se requiera mayor disipación. Esto implica tener disipadores de calor externos de mayor tamaño o algún mecanismo que permita la disipación forzada, como ventiladores. Usar disipadores de gran tamaño elimina el beneficio de tener una fuente de luz pequeña, mientras que la disipación forzada incrementa el consumo de energía, genera ruido y hace más complejo el mantenimiento del sistema (polvo acumulado y desgaste de piezas en movimiento).

Lo anterior justifica el potencial que hay en desarrollar luminarias led cuyo cuerpo sirva para disipar el calor sin sacrificar la estética del producto, tal como lo hicieron los diseñadores del numeral 3.2.

4. CLARIFICAR EL PROBLEMA

Con el fin de comprender el funcionamiento de la luminaria led, se describen los principios básicos de los sistemas de iluminación y los factores implicados en el buen desempeño de aquellos sistemas que trabajan con ledes. A partir de esta información, se identifican las funciones cuyos principios de solución serán bioinspirados y se determinan los principios de vida que serán integrados a la solución. Posteriormente se realiza la lista de especificaciones de la luminaria a desarrollar.

4.1. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN.

A continuación, se definen las principales magnitudes fotométricas, empleadas para medir y describir el comportamiento de la luz visible. Estas definiciones son tomadas de Sanin (2014).

Se le llama luz visible a la radiación electromagnética que se encuentra dentro del espectro visible, es decir, dentro de la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir, teniendo en cuenta que dicha radiación logra excitar las células nerviosas de la retina. El rango de longitudes de onda que hacen parte de este espectro va de 380nm a 780nm (ver figura 26). Se perciben diferentes colores debido a que se reciben diferentes longitudes de onda dentro del rango mencionado. La luz blanca percibida resulta de la superposición de todo el espectro de la luz visible.

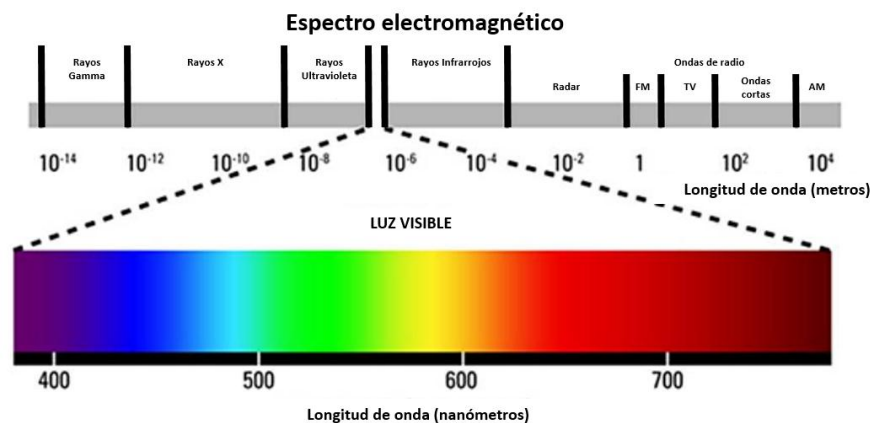


Figura 26. Espectro electromagnético
Fuente: Adaptado de www.solarlightaustralia.com.au

Las principales magnitudes fotométricas del sistema internacional son (ver figura 27):

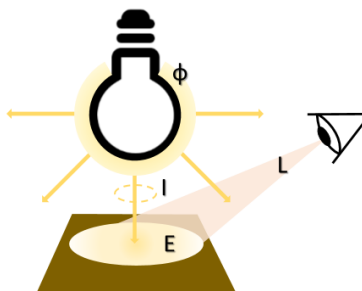


Figura 27. Magnitudes fotométricas.
Fuente: Elaboración propia.

- *Flujo luminoso (ϕ)*: Parte de la potencia radiante total emitida en todas las direcciones por una fuente de luz, capaz de afectar el sentido de la vista. Su unidad de medida es en el lumen ($lm=cd*sr$).

- *Intensidad luminosa (I)*: Flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido (estereorradián [sr]) de una fuente de luz en una dirección concreta. Su unidad es la candela (cd: unidad básica).

Las curvas fotométricas son herramientas empleadas por los fabricantes para representar los valores de intensidad de las luminarias y así poder comparar diferentes fuentes de luz. Para que esto sea posible, normalmente, las curvas están referidas a un flujo de 1000 lúmenes, por lo que los valores de las curvas están expresados en cd/klm. La más conocida es la curva polar. El centro del diagrama polar tiene intensidad 0 cd, por lo que el valor de intensidad máxima será el punto que esté más alejado del centro. Las curvas presentadas en figura 28, representan los valores de intensidad en los dos planos verticales: el transversal y longitudinal.

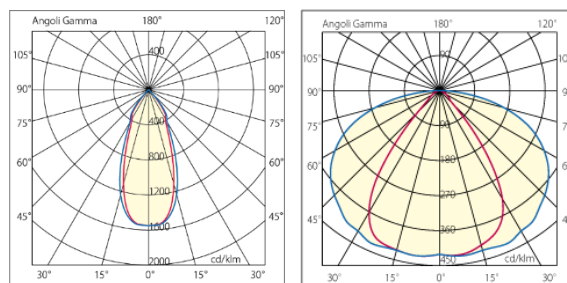


Figura 28. Curvas fotométricas de diferentes luminarias.
Fuente: www.aqlus.com

- *Iluminancia (E)*: Mide la incidencia de la luz sobre una superficie. Depende del flujo luminoso emitido por la fuente, del área de la superficie y la distancia entre la fuente de luz y la superficie. Su unidad de medida es el lux ($lx=lm/m^2$).

- *Luminancia (L)*: Intensidad luminosa emitida por unidad de área de una superficie en una dirección específica. La luz percibida por el ser humano es luminancia, ya que ésta siempre es reflejada por objetos o superficies. Su unidad de medida es cd/m^2 .

Otras magnitudes a tener en cuenta en el diseño de luminarias son:

- *Índice de reproducción cromática (IRC)*: Mide la capacidad de una fuente de luz de reproducir fielmente los colores de los objetos iluminados, tomando como referencia la iluminación natural. El valor del CRI varía entre 0 y 100, entre más alto su valor, mejor es la reproducción. Se recomienda valores entre 80 y 100 para una buena reproducción. El IRC para un par de fuentes de luz sólo se puede comparar si tienen la misma temperatura de color.

- *Temperatura de color correlacionada (TCC)*: Escala científica que describe la apariencia cálida o fría de la luz emitida por una fuente (ver figura 29). Se define comparando su color dentro del espectro luminoso con el color de la luz que emitiría una pieza de metal (un radiador de cuerpo negro teórico) calentado a una temperatura determinada, por este

motivo la temperatura de color se expresa en grados Kelvin. Se establecen tres categorías principales: luz cálida ($TCC < 3300K$), luz neutra o blanca ($3300K < TCC < 5000K$) y luz blanca fría ($5000K < TCC$).



Figura 29. Escala de temperatura de color.

Fuente: www.primedomotics.com

La temperatura de color influye en la manera en que se aprecian los espacios y el efecto a lograr. Los colores cálidos sugieren espacios más íntimos y confortables; a medida que la luz se hace más fría, las luminarias se emplean en sitios que se suponen de más actividad. Los tonos incluso más fríos se asocian a sitios de gran actividad y zonas donde se quiere mostrar pulcritud. A continuación, se mencionan las aplicaciones típicas para los diferentes rangos de temperaturas (Karlen, Benya y Spangler, 2012).

<2500°K

Iluminación callejera, industrial y de seguridad.

2700-3000°K

Residencias, hoteles, restaurantes, algunos espacios comerciales.

2950-3200°K

Iluminación de exhibidores en tiendas y galerías.

3500-4500°k

Oficinas, colegios, hospitales, plantas de producción y algunas tiendas.

5000-7500°K

Aplicaciones especiales en donde la diferenciación del color es crítica. Es poco común.

Para informar sobre estas magnitudes (IRC y TCC) los fabricantes de luminarias disponen de tres números. El primer número indica la reproducción cromática y los otros dos indican las dos primeras cifras de la temperatura de color. De esta forma, cuando una luminaria tiene inscrito un 830, dispondrá de un IRC del 80% y un TCC de 3000°K.

- *Vida útil:* Se refiere al tiempo de operación estimado para el 50% de un grupo grande de ejemplares de una determinada luminaria, antes de que éstas fallen completamente. Las luminarias led no fallan, sino que su rendimiento disminuye con el tiempo, es por esto que su vida útil se determina analizando el momento en que éstas pierden un 70% de su rendimiento.



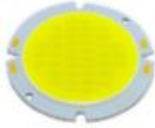

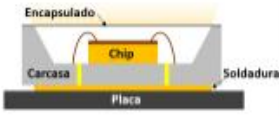







4.2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA LUMINARIA LED.

Un led es un diodo emisor de luz, compuesto por la superposición de varias capas de material semiconductor, capaz de convertir energía eléctrica en luz cuando una pequeña corriente es aplicada. A diferencia de las lámparas incandescentes y halógenas, la luz no se produce al calentar un filamento, sino por la corriente viajando entre los polos del diodo.

4.2.1. Tecnologías led.

El diodo y su correspondiente circuito eléctrico (chip led) se encapsulan en una carcasa plástica, de resina epoxi o cerámica según las diferentes tecnologías. Este encapsulado consiste en una especie de cubierta sobre el dispositivo y en su interior puede contener uno o varios chips. Existen tres tipos de encapsulados según la tecnología empleada (ver tabla 3).

Tabla 3. Tipos de encapsulados para ledes.

	DIP "Dual in-line package"	SMD "Surface Mounted Device"	COB "Chip On Board"
ENCAPSULADO			
TECNOLOGÍA			
MÓDULO	 	 	 

Fuente: Elaboración propia.

-DIP: Es la tecnología más antigua, contiene dos pines conectores que se ensamblan al circuito impreso empleando el método de ensamblaje llamado *through-hole* (a través del orificio). Tiene baja intensidad de luz, bajo IRC y no es tan eficiente como las demás tecnologías. Además, si en un módulo se daña uno de los encapsulados, se afecta la intensidad de los demás, por lo que actualmente este tipo de ledes se utiliza para productos concretos en los que cada led actúa de manera independiente. Otras características son su bajo costo, alto brillo y fácil ensamble.

-*SMD*: Es una tecnología muy versátil que emplea el montaje superficial como método de ensamble, en el cual el encapsulado se une directamente al circuito impreso. Se encuentra en tiras de ledes, en bombillas, en tubos, en pantallas, entre otros.

Esta tecnología permite diseños de ledes mucho más complejos, permitiendo combinaciones de colores en un mismo encapsulado, a diferencia de la tecnología DIP que permite solo un color. Esto se debe a que esta tecnología permite tener varios diodos en un mismo chip y cuando el chip incluye diodos de luz roja, verde y azul se puede crear cualquier color ajustando la salida de luz en cada diodo. Estos encapsulados pueden tener más de dos contactos, dependiendo del número de diodos en el chip y hay un circuito para cada diodo.

Si en un módulo se daña uno de los encapsulados, éste cuenta con un dispositivo que lo suplente para que los demás sigan funcionando a pleno rendimiento, sin embargo, queda un punto muerto, generando sombras y una luz no uniforme.

Emite luz unidireccional y proporciona gran cantidad de luz, esto genera deslumbramiento. Su IRC es alto, puede llegar a 80.

-*COB*: Esta tecnología consiste en varios chips agrupados en serie y/o paralelo dentro del mismo encapsulado. Comparado con el SMD disipa mejor el calor y proporciona más luz, siendo la tecnología con mayor eficacia luminosa (lm/W) y una vida útil más larga. Consigue mayor intensidad lumínica gracias a su amplitud de ángulo, hasta 160 grados. El IRC normalmente es mayor y puede llegar hasta 90. Emite luz multidireccional y no produce deslumbramiento. Es uno de los más utilizados en los focos de potencia.

Otra gran diferencia con el SMD es que mientras éste requiere un circuito para cada diodo dentro del chip, el COB tiene un circuito y dos contactos para el chip completo, independientemente del número de diodos, lo que genera simplicidad. Sin embargo, esto dificulta la generación de variaciones de color por la complejidad para ajustar la salida de luz de cada diodo. Por lo anterior, la tecnología COB es muy eficiente para aplicaciones de un solo color.

4.2.2. Producción de luz blanca.

El color de la luz emitida por un led depende de los materiales con los cuales es fabricado, el material semiconductor es seleccionado en base al color de luz deseada. Los ledes emiten luz monocromática, por lo que son muy eficientes para producir luz de color, pero para producir luz blanca es necesario alguno de los siguientes procesos. El primer proceso consiste en recubrir con fósforo, el cual emite luz amarilla, un led que emita luz azul o cerca a la ultravioleta, para que al combinar ambas radiaciones se produzca la luz blanca. El otro proceso consiste en mezclar diferentes porciones de luz roja, verde y azul, obtenidas de ledes de un solo color.

4.2.3. Factores que afectan la eficiencia de las luminarias led.

Son cuatro los factores principales que influyen en el buen desempeño de las luminarias led.

4.2.3.1. Óptica.

Un led es una fuente de luz puntual que emite la luz en una sola dirección. El buen diseño de lentes y reflectores permite dirigir la luz como se requiera y minimizar las pérdidas.

La carcasa plástica que encapsula el chip led, además de proteger al diodo del ambiente, actúa como una primera óptica, la cual redirige la luz emitida por el diodo a un ángulo esférico de entre 120° y 140°. El material de esta carcasa es usualmente silicio, gracias a su transparencia y a su alta resistencia térmica.

Para modificar el sólido fotométrico¹² que sale del diodo se requiere una segunda óptica, la cual debe ser diseñada considerando las características de la primera. Estas segundas ópticas son, generalmente, fabricadas en polímeros transparentes como PMMA y PC, por su alta transparencia y resistencia a temperaturas elevadas. Funcionan de acuerdo al principio de Reflexión Interna Total¹³, con la intención de modificar el haz de luz. Algunas ópticas generan un haz más ancho para iluminar un área mayor, otras generan un haz más estrecho para focalizar la luz en un punto, otras cambian la dirección o la forma del haz.

Muchas ópticas secundarias trabajan en conjunto con un reflector, el cual es, generalmente, de un material plástico recubierto con aluminio. Algunos rayos de luz son proyectados directamente por el lente, otros son reflejados por las paredes del reflector para luego ser proyectados al exterior. El uso de reflectores es necesario si se desea un haz mayor a 80° y cuando se trabaja con chips de un área mayor. Para obtener un haz de luz paralelo, se emplea un colimador, el cual es un componente óptico capaz de homogeneizar las trayectorias de los rayos de un haz divergente.

4.2.3.2. Fuente de alimentación.

Es el sistema encargado de generar el voltaje necesario para permitir el paso de corriente a través del led para emitir la luz. En algunos casos, este sistema también se encarga de transformar la corriente eléctrica que viene de la red (corriente alterna a 220-2240V en Europa, a 110-130V en América) en una corriente constante y de menor voltaje que puede ser usada por el led. Cuando la energía proviene de una batería o de una fuente renovable, este sistema se encarga, no de transformar la corriente, sino de estabilizarla en un valor constante.

La fuente de alimentación afecta de forma directa la vida útil del led, la cantidad de luz generada y el color de la luz emitida por el módulo led completo. Un diseño electrónico preciso provee al sistema con la corriente adecuada para activar la delicada estructura del semiconductor y así asegurar una iluminación uniforme y duradera.

La mayoría de la iluminación de estado sólido¹⁴ consiste en módulos en donde varios ledes son conectados empleando alguna de las configuraciones que a continuación se describen, cada una con sus ventajas y limitaciones. La selección de la fuente de alimentación correcta depende de la configuración empleada.

- *Conexión en serie*: Esta configuración le proporciona a cada diodo una corriente con la misma cantidad de amperios, lo que permite generar un flujo luminoso uniforme. Este tipo de conexión permite que una sola fuente de alimentación provea la energía para varios ledes. Es considerada la mejor configuración y la más eficiente energéticamente, con el

¹² Representación en el espacio de los vectores de la intensidad luminosa en sus respectivas direcciones.

¹³ Fenómeno que se produce cuando un haz de luz atraviesa un medio de índice de refracción menor que el índice de refracción en el que éste se encuentra y se refracta de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie entre ambos medios reflejándose completamente. Este fenómeno solo se produce para ángulos de incidencia superiores a un cierto valor crítico.

¹⁴ Tipo de iluminación en la que se emplean dispositivos como diodos emisores de luz (ledes) como fuente de iluminación, en oposición a los sistemas que utilizan filamentos o gases.

inconveniente de que, si un led se daña, la serie se vuelve un circuito abierto y el módulo se apaga. Sin embargo, existen dispositivos llamados *protectores de led abierto* que proporcionan una ruta de derivación electrónica de conmutación cuando falla un led, permitiendo que la serie siga funcionando.

- *Conexión en paralelo*: La segunda configuración consiste en diodos conectados en paralelo, la cual reduce el voltaje de operación, sin embargo, es difícil garantizar la misma corriente en cada diodo para generar un flujo luminoso uniforme. Si uno de los diodos falla, los demás continúan encendidos, pero soportando la corriente adicional que estaba destinada al diodo que falló quedando sometidos a un estrés mayor, lo que reduce el buen desempeño del módulo.

- *Matriz*: La última configuración consiste en una mezcla de las dos anteriores. Varias cadenas de diodos conectados en serie son luego conectadas en paralelo. Esto permite generar un flujo luminoso uniforme en cada cadena, aunque el problema está en distribuir la misma corriente entre las cadenas. Una solución es usar un controlador multicanal de corriente constante, para controlar cada cadena independientemente. Esta configuración evita que, cuando un diodo falla, se vean afectados los demás diodos del módulo, sin embargo, es más costosa.

Además de la forma en que están conectados los diodos, hay otros factores que se deben considerar al seleccionar la fuente de alimentación para una luminaria.

- *Voltaje constante o corriente constante*: Muchas fuentes suministran un voltaje constante y una corriente que varía según el voltaje en los ledes. Esto puede generar daños, ya que cuando incrementa la temperatura en los ledes, hay una caída de voltaje que hace que la fuente suministre más corriente en respuesta a esta caída y cuando la corriente supera cierto límite, daña al led. Por esto, es recomendable una fuente que suministre corriente constante que la mantenga estable cuando el voltaje varíe debido a la temperatura. Una fuente de voltaje constante es útil para el diseño e instalación de soluciones lumínicas que integran arreglos o matrices de ledes que incluyen la electrónica necesaria para balancear los niveles de corriente entre sus elementos, ya que no es viable alimentar cada uno de ellos de forma independiente y es más económico en aplicaciones a gran escala.

- *Atenuador de luz (dimmer)*: Este dispositivo permite manipular la intensidad de luz que emiten las luminarias, controlando la corriente que pasa a través del led. Incluirlo en el diseño de luminarias genera ventajas en la percepción del espacio, el confort y el consumo de energía.

- *Vida útil*: Si la temperatura del módulo led es controlada apropiadamente, su vida útil puede superar las 50.000 horas establecidas para este tipo de luminaria. La vida útil de la fuente de alimentación debe ser tan larga como la de los ledes, para evitar cuestiones de mantenimiento y reposición de componentes.

- *Voltaje de entrada*: Como ya se mencionó, el voltaje suministrado por la red eléctrica varía entre países. Una fuente de alimentación universal contiene los componentes y la capacidad para operar con altos voltajes y altas corrientes de entrada. Las altas corrientes se generan

con bajos voltajes. Aunque estas fuentes son más costosas, vale la pena emplearlas cuando no se sabe el voltaje de entrada al que operará el producto.

- *Consumo energético:* Las luminarias tradicionales, incluidas las incandescentes y fluorescentes, se venden en el mercado por su consumo energético o potencia eléctrica consumida por la fuente, medida en vatios (W). Como la eficacia luminosa (lm/W) de estas luminarias no es muy variable, el saber su consumo energético da una idea del flujo luminoso que generan. En las luminarias led, la eficacia luminosa ha aumentado rápidamente y para un mismo consumo energético se puede esperar un amplio rango de valores para el flujo luminoso, según la calidad del led. Es por esto que el valor de lúmenes generados ha ganado importancia para seleccionar una luminaria led específica. Sin embargo, el consumo energético sigue siendo importante para determinar la eficacia de la luminaria, además de ser un parámetro relevante para seleccionar la fuente de alimentación apropiada, la cual debe generar la cantidad de vatios necesarios para poner en operación todos los ledes conectados a ésta.

- *Tamaño y forma:* Las fuentes de alimentación vienen en varios tamaños y formas para que se acomoden lo mejor posible a los cuerpos de las luminarias. Barras esbeltas, discos planos, cajas compactas, etc., son algunos de los formatos disponibles que los fabricantes de las fuentes proporcionan a los fabricantes de luminarias para que estos evalúen y consideren en sus diseños.

4.2.3.3. Cuerpo de la luminaria.

Las luminarias led pueden operar por muchos años, por lo que su cuerpo y los materiales del que está hecho son aspectos que influyen en el buen desempeño del sistema completo, además de proveer a la luminaria con una estética determinada, tanto cuando está encendida como cuando está apagada. Esto lo convierte en uno de los componentes más influyentes en el éxito que la luminaria pueda tener en el mercado, por ser el más visible y aquel que le da carácter y personalidad al producto, diferenciándolo de la competencia.

Entre otras funciones del cuerpo están contener y ensamblar los diferentes componentes electrónicos, proteger estos componentes del polvo, la humedad y el ambiente, ayudar a disipar el calor, aislar la luminaria para evitar posibles descargas eléctricas en el usuario, opacar la luz completamente, parcialmente o a través de una patrón o textura para generar sombras y distribuir la luz según los requerimientos. Existen varias formas de distribuir la luz o tipos de iluminación (ver figura 30):

- *Directa:* El flujo luminoso es dirigido hacia un área específica sin ser reflejado previamente por alguna superficie. Es común en lámparas colgantes, lámparas de techo y lámparas de mesa de trabajo.

- *Semi-directa:* Gran parte del flujo luminoso (60-90%) es dirigido al área requerida, mientras que el resto es reflejado por las superficies del espacio. Es común en lámparas de pared, lámparas de mesa y lámparas de pie.

- *General difusa:* El flujo luminoso es omnidireccional, iluminando en todas las direcciones. Es común en lámparas para exterior y en las luminarias incandescentes y fluorescentes.

- *Mixta (directa-indirecta)*: Entre el 40-60% del flujo luminoso es dirigido al área requerida, mientras que el resto es reflejado por las superficies del espacio. Es común en lámparas colgantes y de pie.

- *Semi-indirecta*: La mayor parte del flujo luminoso (60-90%) es reflejado por las superficies del espacio, mientras que el resto llega directamente al área requerida. Genera un efecto grato sin deslumbramiento y con sombras suaves. Es común en lámparas de pared, lámparas colgantes y lámparas de pie.

- *Indirecta*: La luz llega al área requerida después de reflejarse en las superficies del espacio. Es común en luminarias decorativas, en iluminación de acento, en lámparas de pared y colgantes (candelabros). Aunque son menos eficientes, su forma de distribuir la luz es preferida en muchos casos ya que minimiza las sombras y el deslumbramiento.

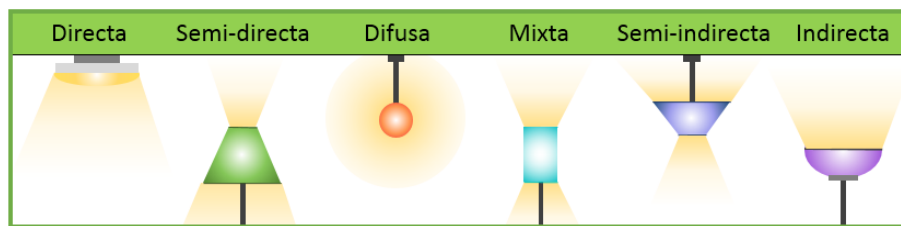


Figura 30. Tipos de iluminación.
Fuente: Elaboración propia.

El tipo de iluminación está relacionado con la forma de exhibir la fuente lumínica. Si la fuente está visible, bien sea porque no la cubre ningún material o por estar cubierta por un material transparente, se dice que genera luz directa; si no está visible, por estar cubierta por un material traslucido, se dice que genera luz difusa.

Así mismo, la forma de distribuir la luz tiene una estrecha relación con el tipo de luminaria. Los tipos de luminaria más comunes son (ver figura 31):

- *Arquitectónica*: La iluminación arquitectónica se usa comúnmente como iluminación ambiental, siendo las más comunes la iluminación de caveto, de sofito y de cenefa. En la iluminación de caveto una fuente luminosa se sitúa oculta tras un reborde y envía luz indirecta sobre la parte alta de la pared junto al techo. En la iluminación de sofito la luz es proyectada hacia abajo, sobre la pared. En la iluminación de cenefa una fuente de luz oculta detrás de una tabla horizontal, proyecta la luz indirecta hacia arriba o hacia abajo.

- *Empotrada*: Instalada por encima del techo, con una apertura a ras de éste. Este tipo de luminaria envía un haz de luz estrecho en una sola dirección, puede ser usada como iluminación ambiental, de acento o de trabajo.

- *Iluminación de riel*: Sobre el techo, o suspendidos, los rieles de iluminación consisten en una estructura lineal que contiene varias bombillas individuales que pueden ser ubicadas en cualquier posición sobre el riel. Así mismo, la dirección de las bombillas se puede ajustar para

conseguir la combinación deseada de luz y espacio. Es comúnmente usada como iluminación de acento o de trabajo.

- *Iluminación bajo muebles*: Instalada por debajo de los muebles de cocina como iluminación de trabajo. Puede ser lineal o en forma de disco.

- *Colgante*: Suspendida del techo, dirige la luz principalmente hacia abajo, sobre una mesa en la mayoría de los casos. Este tipo de luminaria influye en gran medida en la decoración de un espacio. Usada como iluminación ambiental o de trabajo. Los candelabros pertenecen a este tipo de luminaria, con la diferencia de que dirigen la luz hacia arriba, como iluminación ambiental.

- *De techo*: Instalada directamente sobre el techo, usualmente con una pantalla de vidrio o plástico para esconder la bombilla. Por muchos años, ha sido el tipo de luminaria más usado en el hogar como iluminación ambiental. Algunas de estas luminarias también pueden ser instaladas sobre paredes.

- *Aplique o de pared*: Instalada sobre paredes, pueden dirigir la luz hacia arriba y/o hacia abajo como iluminación ambiental o de trabajo. La forma de su cuerpo y las sombras que genera influyen en la decoración del espacio.

- *De pie, de mesa y de escritorio*: Luminarias con una amplia variedad de estilos y tamaños, muy versátiles y portables. La mayoría dirige la luz hacia abajo, a excepción de las lámparas de pie estilo antorcha, las cuales dirigen la luz hacia arriba. Son comúnmente usadas como iluminación de trabajo, pero también pueden proporcionar iluminación ambiental.

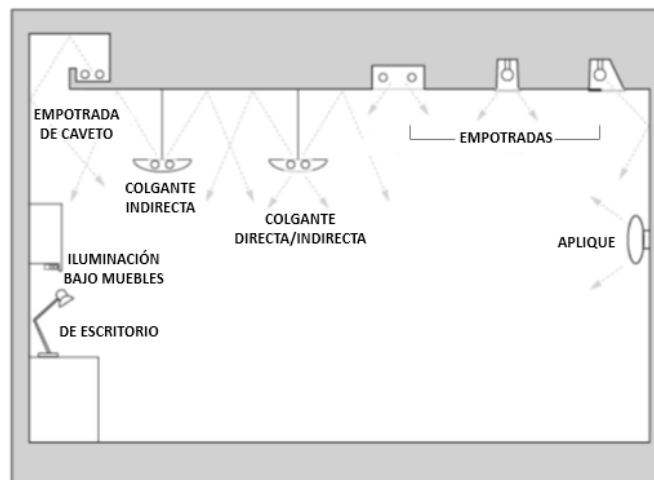


Figura 31. Tipos de luminaria.

Fuente: Adaptado de www.archtoolbox.com

4.2.3.4. Disipación del calor.

Como ya se explicó en el numeral 3.3.1., la gestión térmica es el aspecto más crítico del diseño de un sistema led, pues si la temperatura en el diodo es muy alta, su vida útil se acorta y la calidad de la luz no es óptima. El buen diseño del sistema que disipa el calor mejora el desempeño del sistema led completo.

4.3. FUNCIONES CON PRINCIPIOS DE SOLUCIÓN BIOINSPIRADOS.

Con el fin de delimitar el problema, se usa el análisis funcional para identificar la función principal de las luminarias led y posteriormente dividirla en subfunciones para seleccionar aquellas cuyos principios de solución serán bioinspirados. Así mismo, el análisis funcional permite entender la relación entre las subfunciones, mediante los flujos de entrada y de salida del sistema, tanto externos (considerando el sistema completo) como internos (de cada subsistema).

Este proceso se basa en el enfoque metodológico propuesto por Pahl et al. (2007), en donde el primer paso consiste en desarrollar la caja negra del producto, un diagrama en el que se representan, mediante flechas, las entradas y las salidas del sistema como flujos de energía, materia e información. El sistema es representado por un recuadro con un verbo escrito en su interior, que representa la función principal.

La figura 32 presenta la caja negra de una luminaria led. Mediante una señal de encendido la energía eléctrica ingresa al sistema para luego ser transformada en energía lumínica y energía térmica, la cual es disipada gracias al aire del entorno. El sistema debe estar protegido de impurezas y de la humedad.

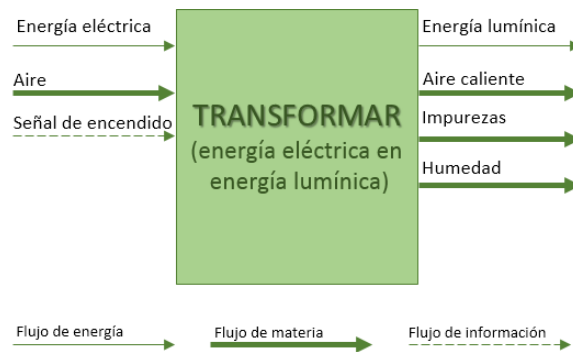


Figura 32. Caja negra de una luminaria led.
Fuente: Elaboración propia.

Para comprender como funciona la luminaria internamente, es necesario descomponer la función principal en subfunciones. La estructura funcional permite representar gráficamente dichas subfunciones y su forma de conectarse, mediante los flujos sobre los cuales actúan.

Pahl et al. (2007) propone una lista de cinco funciones generales y tres tipos de flujo para construir la estructura funcional, sin embargo ésta se encuentra en un nivel de abstracción muy alto, por lo que se decide trabajar con la base funcional¹⁵ propuesta por Stone y Wood (2000).

La figura 33 presenta la estructura funcional desarrollada para una luminaria led, así como una arquitectura modular formada al agrupar las subfunciones en módulos o subsistemas. La línea discontinua representa el límite del sistema, es decir, lo que se encuentra dentro de la caja negra. Los flujos de entrada y de salida corresponden a los de la caja negra, sin embargo, teniendo en

¹⁵ Base funcional: Se refiere a una taxonomía estándar de funciones y flujos mecánicos elementales que puede ser usada para descomponer la función principal de un sistema, eliminando confusiones semánticas.

cuenta los factores que afectan la eficiencia de las luminarias led, descritos en el numeral 4.2.3., se identifican cinco subsistemas principales que afectan internamente estos flujos. El subsistema eléctrico permite el ingreso de la energía eléctrica al sistema, transformándola en corriente directa en caso de que la energía ingrese como corriente alterna (si ingresa como corriente directa, se ignora este paso), para luego conducirla al led. El subsistema led transforma la energía eléctrica en energía lumínica y en energía térmica. La energía lumínica es inicialmente dirigida por el subsistema led, luego entra al subsistema óptico para ser direccionada hasta que salga del sistema. La energía térmica es conducida hacia el exterior a través del subsistema de gestión térmica, mediante los procesos de conducción y convección; en este último la presencia del aire es necesaria. El subsistema de protección se refiere al cuerpo de la luminaria, el cual se encarga de contener los demás componentes, además de protegerlos de impurezas y de la humedad. En algunas luminarias, este subsistema se encarga de direccionar la energía lumínica antes o después de pasar por el subsistema óptico.

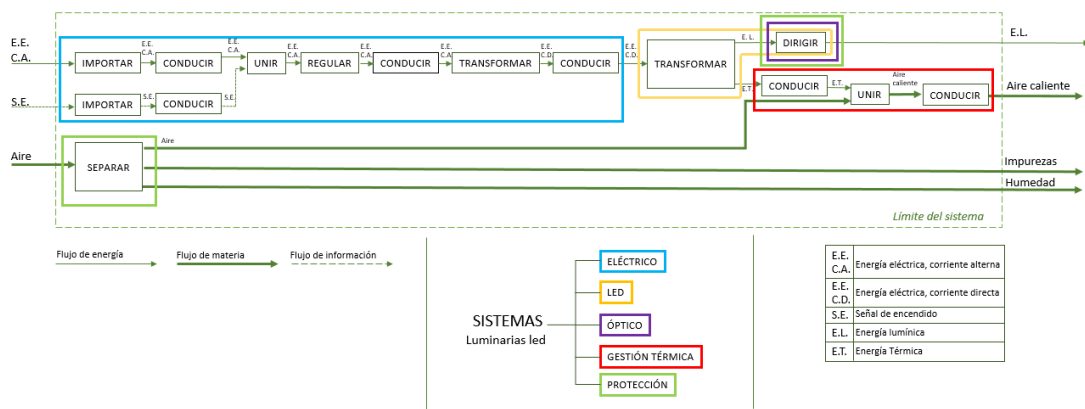


Figura 33. Estructura funcional de una luminaria led.

Fuente: Elaboración propia.

Como se justificó en el numeral 3.3, este proyecto busca desarrollar una luminaria led cuyo cuerpo sirva para disipar el calor sin sacrificar la estética del producto, por lo que los subsistemas de gestión térmica y protección se vuelven uno solo. De esta forma, la arquitectura modular cambia y las subfunciones de la estructura funcional se agrupan como se muestra en la figura 34. Las subfunciones asociadas al subsistema de gestión térmica y protección son aquellas cuyos principios de solución serán bioinspirados.

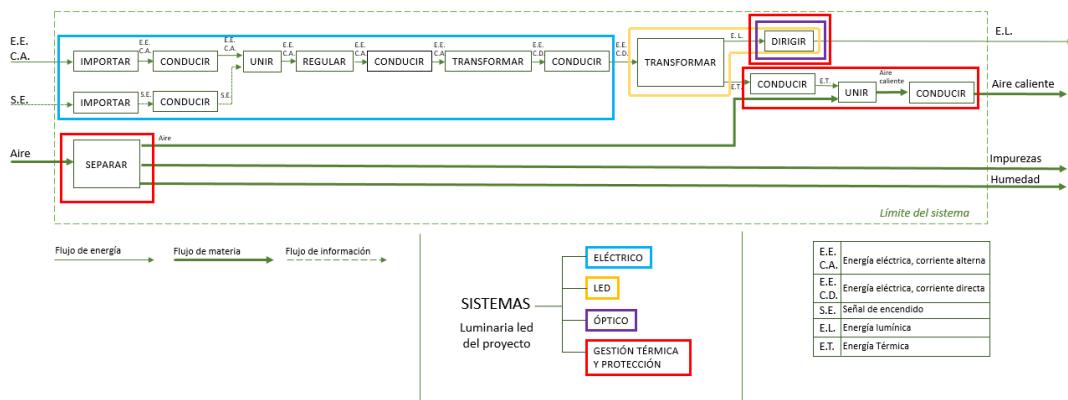


Figura 34. Estructura funcional de la luminaria led a desarrollar.

Fuente: Elaboración propia.

4.4. PRINCIPIO DE VIDA INTEGRADO EN EL DISEÑO DE LA LUMINARIA.

Para modelar estrategias innovadoras y evaluar el diseño de la luminaria desde un punto de vista sostenible, este proyecto busca “*ser eficiente en el uso de los recursos*”, uno de los principios de vida propuestos por Biomimicry 3.8 (2016) en la figura 17. La tabla 4 presenta los objetivos que se deben cumplir para integrar este principio en el diseño de la luminaria, así como las actividades que se llevan a cabo durante el proyecto para cumplirlos.

Tabla 4. Actividades para integrar el principio de vida seleccionado en el diseño de la luminaria.

SER EFICIENTE EN EL USO DE LOS RECURSOS	
OBJETIVO	ACTIVIDAD
Usar procesos con poca energía.	Trabajar con tecnología led.
Usar diseño multifuncional.	Integrar en un mismo sistema, los subsistemas de gestión térmica y protección.
Reciclar todos los materiales.	Manufacturar la luminaria con materiales reciclables.
Integrar la forma a la función.	Estudiar cómo las formas de un referente natural influyen en sus funciones vitales, para luego analizar matemáticamente los patrones encontrados y generar morfologías más complejas y funcionales.

Fuente: Elaboración propia.

4.5. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE PRODUCTO

El PDS¹⁶ es un documento que se encarga de establecer los requerimientos técnicos y las especificaciones necesarias para desarrollar un producto capaz de satisfacer las necesidades y deseos de los usuarios, del mercado y del diseñador. Básicamente establece lo que el producto debe hacer, no el cómo debe hacerlo.

Según Pugh (1991), es necesario formular un PDS a partir de las necesidades identificadas, con el fin de guiar el proceso de diseño al establecer las bases y los límites de las futuras soluciones. Pugh propone una serie de elementos relevantes que permite que este documento se desarrolle de manera ordenada y coherente. En este proyecto se trabaja con algunos de estos elementos.

Así mismo se tiene en cuenta la metodología propuesta por Ulrich y Eppinger (2012) para definir el PDS, la cual propone el uso de métricas que le permiten al diseñador verificar si los conceptos diseñados satisfacen los requerimientos. Los valores dados a dichas métricas se pueden interpretar como los objetivos de diseño, sin embargo, deben ser evaluados en etapas posteriores del proceso de diseño ya que pueden variar debido a estudios de costos o de factibilidad que no fueron tenidos en cuenta en un comienzo. Esto hace del PDS un documento dinámico que evoluciona a lo largo del proceso de diseño, lo importante es que el diseño final sea coherente con la versión final del PDS.

La realización de este documento (ver tabla 5) tiene en cuenta la información recolectada en las fases anteriores sobre iluminación led y sobre las oportunidades que tiene este mercado para innovar haciendo uso del diseño generativo inspirado en la naturaleza. Para definir los valores de las métricas se recurre a expertos¹⁷ en iluminación, al Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público, RETILAP (ver Anexo A), y se analizan detalladamente los productos existentes a nivel mundial y local.

¹⁶ Del inglés “*Product Design Specifications*”

¹⁷ Juan Martin Hoyos Manzur, Ingeniero de Diseño de Producto, Diseñador en Luxycon (www.luxycon.com)

Tabla 5. Especificaciones de diseño de la luminaria led a desarrollar.

REQUERIMIENTO		IMP.	MÉTRICA	UNIDADES	VALOR	OBSERVACIONES
DESEMPEÑO	La cantidad de luz emitida por la luminaria es suficiente para zonas de trabajo de la industria alimenticia.	5	Iluminancia (E)	Luxes	200-500	Valor objetivo = 300
		5	Flujo luminoso (ϕ)	Lumenes	1000-1800	
	La luz emitida por la luminaria reproduce fielmente los colores del entorno.	5	Índice de reproducción cromática (IRC)	Ra	>80	
	La luz emitida por la luminaria es neutra.	3	Temperatura de color correlacionada (TCC)	Kelvin	3500-4500	
	La luminaria es eficiente en el consumo.	5	Eficacia luminosa de una fuente	Lumen/ Watt	>100	
		4	Eficiencia de la luminaria (Lumen luminaria / Lumen fuente)	%	>80	
	La luminaria evita el deslumbramiento.	4	Índice de Deslumbramiento Unificado	UGR	<25	
	La luminaria se enciende rápidamente.	3	Tiempo en que la luz llega a su máxima intensidad luego de encender la luminaria.	Segundos	<2	
	El espacio es iluminado de manera uniforme.	3	Uniformidad (Emin/Eprom)		>0,5	
	La luminaria está protegida del ambiente.	3	Clasificación IP	IP	21	
	La luminaria es fácil de usar.	4	Número máximo de operaciones	#	2	Encendido/apagado o atenuación.
	La luminaria permite el buen desempeño de la tecnología escogida .	5	Voltaje AC	Voltios	110-120	
5		Tc máxima del led	°C	85	Dato del proveedor.	
TAMAÑO	La luminaria es liviana.	3	Masa	kg	<10	Sin contar elementos estructurales como cables para lámparas colgantes o soportes para lámparas de pie.
	El tamaño de la luminaria es apropiado para el contexto establecido.	2	Ancho x Largo x Profundo	mm	< 400x400x400	
			Largo máximo del cable	mm	2000	
COSTO	El costo de la luminaria es adecuado para el mercado local.	3	Precio de venta	Pesos colombianos	<750	Considerando: Precio de venta = costo*5
CICLO DE VIDA	La luminaria dura en el tiempo.	5	Tiempo de vida útil	Años	>10	
MANTENIMIENTO	El mantenimiento de la luminaria es sencillo.	4	Número máximo de operaciones de mantenimiento	#	0-1	
	El ensamble de la luminaria es fácil.	3	Tiempo de ensamble	Minutos	<5	
	La instalación de la luminaria es fácil.	4	Tiempo de instalación	Minutos	<10	
	Reposición rápida de componentes internos.	3	Tiempo de espera	Semanas	<2	
	El dispositivo posee elementos fáciles de desinstalar (diseñado para el ensamble, mínimo número de partes).	4	Mínimo de subsistemas a integrar	#	2	Diseño multifuncional
Espacios amplios para limpieza y ángulos de fácil acceso.	3	Espacio mínimo entre paredes.	mm	3		
ERGONOMIA Y SEGURIDAD	La luminaria es segura al tacto.	5	Temperatura máxima en la superficie	°C	50	
		5	Carga eléctrica sobre la superficie.	Voltios	0	
		5	Radio mínimo en aristas	mm	0,5	
APARIENCIA	La luminaria genera interés en el observador.	5	Subjetivo			Diseño inspirado en referentes naturales
	La luminaria es diferenciadora en el mercado.	5	Subjetivo			
	La apariencia de la luminaria es agradable.	5	Subjetivo			
	La estética de la luminaria es atemporal.	4	Subjetivo			
	Las formas son funcionales.	5	Subjetivo			
PROCESOS DE PRODUCCIÓN	Procesos de producción y componentes disponibles a nivel local.	3	Porcentaje	%	70	
	Bajos volúmenes de producción.	3	Unidades mínimas de producción	#	1	
MATERIALES	El producto es sostenible: Los materiales son reciclables o reutilizables.	4	Porcentaje	%	80	

Fuente: Elaboración propia.

La sección 410 de la norma RETILAP incluye los ítems más importantes que el diseñador necesita investigar antes iniciar un diseño de alumbrado interior, entre los que se encuentra el conocer con detalle las actividades asociadas con cada espacio. Esto hace importante definir el contexto para el cual será diseñada la luminaria. Teniendo en cuenta que este proyecto busca aprovechar las ventajas de los arreglos de ledes de alta potencia o de los ledes tipo COB por ser las fuentes de luz más eficientes en términos de consumo energético y tamaño, pero sin sacrificar la estética del producto por el uso de disipadores de calor externos, sino desarrollando un cuerpo que sirva para disipar el calor, se define como contexto de uso de la luminaria restaurantes alta gama de cocina abierta o bares, particularmente la zona de la cocina o la barra, en donde se requiere de un buen nivel de iluminación por ser zona de trabajo y de una estética agradable, ya que la luminaria hace parte de la estética del lugar y sería un elemento protagónico.

Para facilitar la toma de decisiones se le atribuye a cada requerimiento un valor entre 1 y 5, según su importancia relativa dentro del PDS, siendo 5 el valor dado a los requerimientos más importantes para lograr una solución exitosa y 1 el valor dado a los requerimientos menos importantes. Los requerimientos térmicos son aquellos de mayor importancia, seguidos por los requerimientos fotométricos, de desempeño, los estéticos y por último los relacionados con el costo y los procesos productivos, teniendo en cuenta que dentro del alcance del proyecto no se incluye la fabricación del producto. Estos últimos se incluyen para ser considerados a futuro, al proceder con la fabricación de la luminaria.

5. DISEÑO CONCEPTUAL

En esta fase se continúa con el análisis funcional iniciado en la fase anterior, en donde, partiendo de las especificaciones del producto, se hace un análisis morfológico para determinar los portadores de función que mejor satisfacen los requerimientos de diseño de la luminaria. Posteriormente se proponen diferentes configuraciones (arquitecturas) considerando la interacción que pueda existir entre los portadores seleccionados. Se prosigue con la exploración del referente natural que mejor cumple con los requerimientos formales y funcionales para, luego de analizarlo, abstraer las estrategias biológicas que serán aplicadas en la solución. Teniendo en cuenta todo lo anterior, se desarrollan diversas alternativas de solución, las cuales después de ser evaluadas, conducen a la selección de la más conveniente.

5.1. ANÁLISIS MORFOLÓGICO.




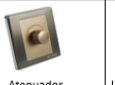






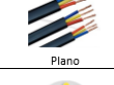

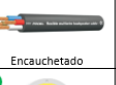


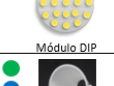
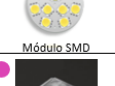



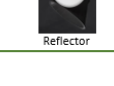

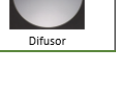
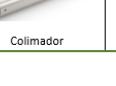

El análisis morfológico es un método analítico combinatorio propuesto por el astrofísico suizo Fritz Zwicky, cuyo objetivo es explorar posibles soluciones para problemas complejos de forma sistemática. El método consiste en descomponer el problema en partes esenciales para luego explorar diferentes alternativas de solución para cada una de ellas, ampliando así el número de soluciones potenciales para el problema en cuestión. Posteriormente se identifican combinaciones viables de las subsoluciones exploradas y se evalúan para determinar la opción que mejor satisface los objetivos (Ritchey, 1998).

Para llevar a cabo el análisis morfológico se parte de la estructura funcional de la luminaria led a desarrollar (ver figura 34). Para cada uno de los subsistemas, eléctrico, led y óptico, se proponen cinco portadores de función según las subfunciones asociadas. El subsistema eléctrico se divide en otros subsistemas más específicos, interruptor, fuente de alimentación y cableado, teniendo en cuenta que se pueden explorar múltiples soluciones para cada uno. El análisis de estos tres subsistemas se hace mediante el desarrollo de una matriz morfológica, herramienta propuesta por Cross (2008) para representar gráficamente los portadores de función de cada uno, permitiendo comparar las diferentes opciones y analizar sus ventajas y desventajas a la hora de proponer rutas factibles y combinaciones de portadores que permitan darle una estructura inicial al producto. El subsistema de gestión térmica y protección no se incluye en la matriz, puesto que sus portadores de función serán bioinspirados y su exploración se hará empleando el pensamiento biomimético tal como se describe en el numeral 5.3.

La tabla 6 presenta la matriz morfológica desarrollada. Teniendo en cuenta que este proyecto busca innovar en el diseño del subsistema de gestión térmica y protección, los portadores de función explorados para los demás subsistemas consisten en soluciones existentes y piezas estándares. La ayuda de expertos en iluminación fue importante, tanto en el desarrollo de la matriz, como en la generación y en la evaluación de las rutas factibles para determinar la solución más conveniente.

La tabla 7 presenta los portadores de función de cada una de las tres rutas identificadas, además del contexto para el cual dicha ruta es la adecuada. La RUTA 3 es la que mejor se adapta a los requerimientos del proyecto, teniendo en cuenta lo que se describe a continuación.

















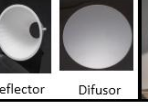


Tabla 6. Matriz morfológica de la luminaria.

SUBSISTEMA	SUBFUNCIONES ASOCIADAS	PORTADOR 1	PORTADOR 2	PORTADOR 3	PORTADOR 4	PORTADOR 5	
Eléctrico	Interruptor	Importar S.E. Unir E.E._C.A. y S.E. Regular E.E._C.A.	 Control RGB	 Interruptor de paso	 Interruptor de pared	 Atenuador	 Interruptor fotoeléctrico
	Fuente de alimentación	Importar E.E._C.A. Transformar E.E._C.A. en E.E._C.D.	 Controlador de corriente constante (CC)	 Controlador de voltaje constante (VC)	 Controlador CC o VC con atenuador	 Controlador DALI (protocolo de control)	 Corriente directa
	Cableado	Conducir E.E._C.A. y E.E._C.D.	 Plano	 Rígido	 Encauchetado	 Encauchetado textil	 Circuito impreso
Led	Transformar E.E._C.D. en E.L. Dirigir E.L.	 Módulo DIP	 Módulo SMD	 Módulo COB	 Tira led	 Bombilla de filamento led	
Óptico	Dirigir E.L.	 Reflector	 Lente	 Difusor	 Colimador	 Impresión 3D	

● RUTA 1 ● RUTA 2 ● RUTA 3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Rutas factibles

● RUTA 1						
 Control RGB	 Controlador DALI (protocolo de control)	 Rígido	 Módulo SMD	 Difusor		
● RUTA 2						
 Interruptor de paso	 Corriente directa	 Circuito impreso	 Módulo COB	 Lente		
● RUTA 3						
 Atenuador	 Controlador CC o VC con atenuador	 Encauchetado textil	 Módulo COB	 Reflector	 Difusor	
						

Fuente: Elaboración propia.

La RUTA 1 incluye el controlador DALI, el cual permite una adecuada gestión de la iluminación, especialmente de iluminación arquitectónica, al realizar ambientaciones luminosas con facilidad y eficiencia, además de enviar alertas de fallos en las luminarias. Para controlar la ambientación se emplea el control RGB. Se requiere de módulos SMD pues es la única tecnología led que permite combinaciones de colores en un mismo encapsulado. Para evitar el deslumbramiento y generar luz uniforme se emplea el difusor óptico. Para conectar los componentes en el interior de la luminaria se emplea cable rígido teniendo en cuenta que éste permite conexiones más estructurales que el encauchetado, éste último se usa para conectar la luminaria con el entorno ya que, por su flexibilidad, se adapta mejor al espacio.

La RUTA 2 hace referencia a bombillas que trabajan con corriente directa, como las farolas de motos y carros. Incluye un interruptor de paso, usa módulos COB por su reducido tamaño, eficacia superior y por la calidad del flujo luminoso. Los componentes se conectan a través de un circuito impreso

para tener un producto más compacto y uniones más fiables, lo cual es recomendable para procesos de producción en grandes series. El uso de lentes para direccionar el flujo luminoso garantiza que cada rayo sea orientado por el lente con buena precisión, obteniendo mayor eficiencia óptica y evitando el deslumbramiento que pueden causar los reflectores cuando algunos rayos salen del sistema sin tocarlos.

La RUTA 3 es adecuada para luminarias destinadas a zonas de trabajo. Consiste en un atenuador que permite gestionar manualmente la intensidad de la luz, aprovechando las ventajas que esto trae en la percepción del espacio y el consumo de energía. Esto requiere el uso de un controlador con atenuador, preferiblemente un controlador de corriente constante (CC) ya que no se utilizan arreglos de ledes. La conexión de la luminaria con el entorno se hace con cable encauchetado textil, para mejorar su estética; se hace uso de terminales en los extremos del cable para la conexión con los componentes internos. Aunque se podría usar la tecnología SMD por su versatilidad y flexibilidad en términos de forma y diseño, ésta representa un retroceso en términos de tecnología y eficiencia, pues la tecnología COB es más eficiente y produce luz de mejor calidad. Para direccionar el flujo luminoso se hace uso de un reflector, el difusor óptico se encarga de disminuir el deslumbramiento y de permitir más uniformidad lumínica en la zona de trabajo. Aunque la eficiencia óptica de este sistema es menor en comparación con la ofrecida por un lente, la ventaja es que los reflectores son más simples de implementar y más económicos.

Las tres rutas son válidas, pero la RUTA 3 es la que mejor se adapta al objetivo de este proyecto ya que la RUTA 1 se enfoca principalmente en la gestión inteligente de la iluminación y la RUTA 2 en el desarrollo de sistemas compactos, a gran escala y con gran eficiencia óptica, pero sin ser relevante la estética de la luminaria. El usar la tecnología COB en la RUTA 3 es una oportunidad para este proyecto, teniendo en cuenta que esta tecnología es ignorada por muchos productores de luminarias debido a sus requerimientos de gestión térmica, pues los disipadores de calor convencionales dificultan el diseño de luminarias decorativas con una estética agradable. Al estar este proyecto orientado al diseño de luminarias led en donde el cuerpo sirve para disipar el calor, se aprovechan las ventajas que ofrece esta tecnología sin sacrificar la estética del producto.

5.2. ARQUITECTURA DEL PRODUCTO

En el análisis funcional presentado en el numeral 4.3., las subfunciones del sistema fueron agrupadas en módulos o subsistemas destinados a cumplir una función principal, además, se identificaron aquellas subfunciones que podían ser compartidas por varios módulos.

La arquitectura modular permite reordenar estos módulos sistemáticamente de acuerdo a la posible ubicación que éstos puedan tener dentro del producto, considerando sus interacciones y evaluando la compatibilidad y la dependencia entre ellos. Esta herramienta permite generar alternativas esquemáticas de la solución evitando relaciones incidentes que resulten en el mal funcionamiento del producto (Baxter, 1995).

Para este análisis se le asigna una forma a cada flujo, a cada uno de los portadores de función de la ruta seleccionada en el análisis morfológico y al subsistema de gestión térmica y protección; luego se generan varias configuraciones considerando la interacción y la dependencia entre estos componentes (ver figura 35). Al subsistema de gestión térmica y protección se integra uno de los portadores de función del subsistema óptico, el reflector, con el fin de usar el diseño multifuncional para cumplir con el principio de vida de ser eficiente en el uso de los recursos (ver tabla 4). A este último subsistema se le seguirá llamando cuerpo.

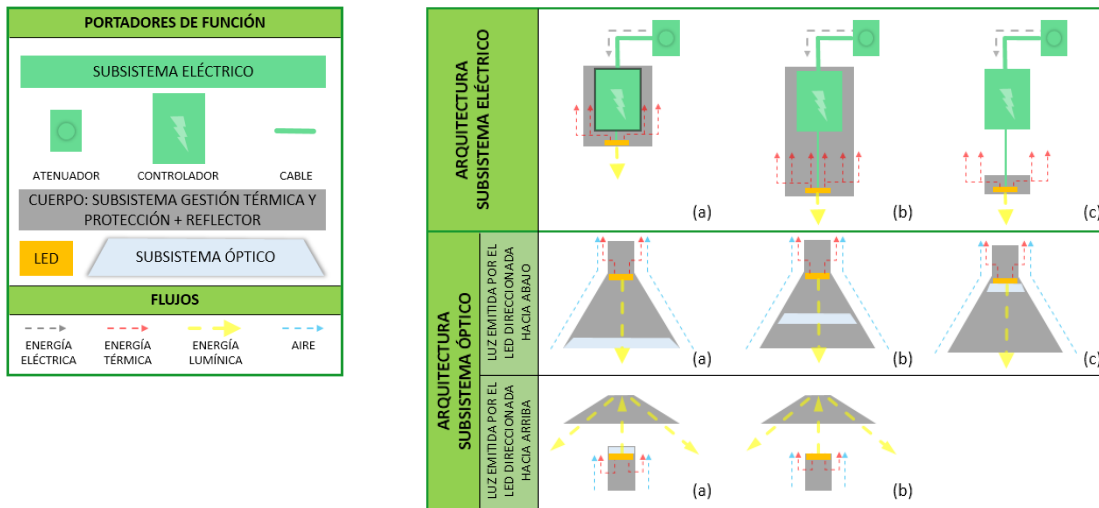


Figura 35. Arquitecturas de la luminaria.
Fuente: Elaboración propia.

Lo primero a tener en cuenta es que el subsistema eléctrico va detrás del led, mientras que el subsistema óptico adelante, de esta forma el subsistema eléctrico no interfiere con la emisión de la luz. Es por esto que el análisis se divide en dos etapas, en la primera se analiza la ubicación de los portadores del subsistema eléctrico en relación con el cuerpo, en la segunda se determina la ubicación de los portadores del subsistema óptico, también en relación con el cuerpo.

La configuración (a) del subsistema eléctrico permite una arquitectura plana, útil para luminarias de pared, de techo o pequeñas lámparas, en donde el led está posicionado muy cerca al controlador y ambos se encuentran dentro del cuerpo. En este caso hay que reservar un espacio libre entre el led y el controlador para evitar que el calor del controlador permanezca dentro del cuerpo y afecte el funcionamiento del led, o viceversa. En algunos casos, cuando la distancia no es suficiente, es necesario usar aislante térmico.

Para evitar el exceso de calor dentro del cuerpo que se puede generar en la configuración (a), en la configuración (b) se posiciona el led lejos del controlador, quedando ambos dentro del cuerpo, aunque esto implique tener un cuerpo de mayor tamaño. Esta configuración es útil para lámparas de mesa o de escritorio.

Cuando se usan ledes de alta potencia se recomienda la configuración (c), por tener el controlador fuera del cuerpo. Esta configuración es útil para luminarias de uso industrial o alumbrado público, también para luminarias colgantes o de pie. Algunos controladores externos tienen la capacidad de regular la potencia de varias luminarias al tiempo.

Para todas las configuraciones, el cable sale de la luminaria y el atenuador activa y controla el flujo eléctrico. Para la configuración (b) y (c) el atenuador de pared podría ser reemplazado por un atenuador de paso, según el contexto de uso de la luminaria.

Para analizar las configuraciones del sistema óptico, se considera la dirección de la luz emitida por el led, bien sea hacia abajo (directa) o hacia arriba para luego ser proyectada hacia abajo (indirecta). No se considera una dirección horizontal puesto que la luminaria está pensada para una zona de trabajo y la luz emitida y proyectada en el plano horizontal es más común en iluminación ambiental,

además proyectar posteriormente los rayos hacia abajo puede volver complejo el sistema y lo que se busca es simplicidad.

Las ventajas de tener luz directa son la facilidad para direccionar el haz hacia la zona de trabajo y la posibilidad de integrar el reflector al sistema de gestión térmica y protección, teniendo así menos componentes y un diseño más compacto. La desventaja es que por el ángulo de apertura del reflector la forma del cuerpo se vuelve menos aerodinámica, lo que hace menos eficiente el proceso de convección térmica. Además, con luz directa, es más probable generar deslumbramiento. Para esta alternativa se proponen tres configuraciones, dependiendo de la ubicación del difusor óptico con respecto al reflector. El difusor podría estar después del reflector, cubriendo el interior de la luminaria (a); en una zona intermedia del reflector (b) o inmediatamente después del led (c).

Al tener luz indirecta, es necesario que el reflector esté ubicado después del difusor óptico (a) para dirigir de forma controlada el haz de luz hacia la zona de trabajo evitando que sea el techo el que proyecta la luz, lo cual es común en iluminación ambiental. Teniendo en cuenta que, al tener luz indirecta el usuario no tiene contacto visual directo con led, se puede prescindir del difusor óptico (b), ya que su función es evitar el deslumbramiento. Las ventajas de estas configuraciones son que la parte del cuerpo responsable de la gestión térmica puede tener una forma más aerodinámica por no estar obstruida por el reflector, además de ser configuraciones diferenciadoras para el mercado de las luminarias destinadas a iluminar zonas de trabajo, en donde la mayoría trabaja con luz directa. Entre las desventajas se encuentra la complejidad de direccionar la luz hacia la zona de trabajo, la posibilidad de generar sombras por tener parte del cuerpo debajo del reflector, la posibilidad de bloquear el flujo del aire caliente que sube debido a la convección y la necesidad de dividir el cuerpo en dos componentes, separando el reflector del difusor térmico.

Las arquitecturas generadas son el punto de partida para comenzar a conceptualizar y a corporificar la solución. Aunque todas ellas son válidas, para este proyecto se considera que la mejor configuración para la arquitectura del subsistema eléctrico es la opción (c), ya que se usan ledes de potencia, además el controlador externo permite reducir el tamaño del cuerpo de la luminaria y facilita el mantenimiento. Para seleccionar la mejor arquitectura del subsistema óptico se realizan pruebas virtuales con el fin de analizar el comportamiento de la energía lumínica y de la energía térmica en las diferentes configuraciones. El desarrollo y los resultados de dichas pruebas se presentan en el numeral 6.

5.3. DESCUBRIR LOS MODELOS NATURALES.

La naturaleza es una fuente infinita de información, por lo tanto, las actividades desarrolladas en esta fase permiten divergir en la naturaleza de forma sistemática para explorar posibles referentes y seleccionar aquellos que, luego de ser analizados y evaluados, mejor satisfacen los requerimientos de diseño.

5.3.1. Establecer principios de solución y contextualizar.

Establecer principios de solución y contextualizar son dos de las actividades propuestas en el modelo para “Descubrir modelos naturales” presentado en la figura 18. Su objetivo es identificar los procesos de la naturaleza con potencial para inspirar la solución de las funciones del sistema a diseñar y los organismos que llevan a cabo dichos procesos, para luego seleccionar aquellos que se consideran los mejores referentes de diseño según las especificaciones.

Para esto se propone llevar a cabo un análisis morfológico, como el realizado en el numeral 5.1., pero modificando la matriz morfológica propuesta por Cross (2008). La matriz modificada incluye una columna de análisis, en donde se identifican los fenómenos físicos que permiten llevar a cabo las funciones del sistema, para luego, a partir de éstos, explorar procesos biológicos análogos y diferentes organismos (portadores) que los llevan a cabo (ver tabla 8). El desarrollo de esta matriz requiere el apoyo de ingenieros y de biólogos.

Tabla 8. Matriz morfológica para subsistemas con principios de solución bioinspirados.










PRINCIPIOS DE SOLUCIÓN BIOINSPIRADOS											
SUBSISTEMA	SUBFUNCIONES ASOCIADAS	FENÓMENOS IMPLICADOS	PROCESO BIOLÓGICO ANÁLOGO 1			PROCESO BIOLÓGICO ANÁLOGO 2			PROCESO BIOLÓGICO ANÁLOGO 3		
Subsistema 1	Subfunción 1 Subfunción 2	Fenómeno 1	Proceso 1			Proceso 2			Proceso 3		
			Portador 1	Portador 2	Portador 3	Portador 1	Portador 2	Portador 3	Portador 1	Portador 2	Portador 3
	Subfunción 3	Fenómeno 2	Proceso 1			Proceso 2			Proceso 3		
		Fenómeno 3	Portador 1	Portador 2	Portador 3	Portador 1	Portador 2	Portador 3	Portador 1	Portador 2	Portador 3
Subsistema 2	Subfunción 4	Fenómeno 4	Proceso 1			Proceso 2			Proceso 3		
	Subfunción 5 Subfunción 6	Fenómeno 5	Proceso 1			Proceso 2			Proceso 3		
			Portador 1	Portador 2	Portador 3	Portador 1	Portador 2	Portador 3	Portador 1	Portador 2	Portador 3

Fuente: Elaboración propia.

En la matriz se incluyen todas las subfunciones de los subsistemas para los cuales se buscan soluciones bioinspiradas, sin embargo, no es necesario explorar procesos biológicos para todas, sólo para las que se consideren relevantes para los objetivos de diseño. Luego de desarrollar la matriz se proponen combinaciones de portadores, es decir, de organismos con potencial para ser referentes de diseño. A la hora de seleccionarlos es importante identificar sinergias entre ellos, además de posibles relaciones con las subfunciones cuyos fenómenos no fueron explorados. En el caso en que un mismo organismo lleve a cabo varios de los procesos biológicos identificados, éste se considera un buen referente, teniendo en cuenta el diseño multifuncional.

La tabla 9 presenta la matriz desarrollada para este proyecto. Se incluyen los subsistemas de protección y gestión térmica, los cuales se integran en uno solo. El subsistema de protección se encarga de dos subfunciones, separar impurezas y humedad del aire y, en algunos casos, dirigir la energía lumínica al salir de la luminaria. El aislamiento y la impermeabilización son fenómenos que permiten separar impurezas y humedad del aire, la reflexión y/o refracción son fenómenos asociados con la propagación de la luz. El subsistema de gestión térmica se encarga de conducir la energía térmica desde el led hasta el exterior de la luminaria, mediante el fenómeno de conducción térmica, así como de permitir el intercambio de energía térmica entre la superficie de la luminaria y el aire y la circulación de éste último, mediante el fenómeno de convección.

Tabla 9. Matriz morfológica para subsistemas con principios de solución bioinspirados de la luminaria

PRINCIPIOS DE SOLUCIÓN BIOINSPIRADOS													
SUBSISTEMA	SUBFUNCIONES ASOCIADAS	FENÓMENOS IMPLICADOS	PROCESO BIOLÓGICO ANÁLOGO 1	PROCESO BIOLÓGICO ANÁLOGO 2	PROCESO BIOLÓGICO ANÁLOGO 3								
Protección	Separar impurezas y humedad del aire.	Aislamiento, impermeabilización	_____	_____	_____								
	Dirigir E.L.	Reflexión, refracción	_____	_____	_____								
Gestión térmica	Conducir E.T.	Conducción	_____	_____	_____								
	Unir E.T y aire. Conducir aire caliente.	Convección	Transporte de nutrientes o células reproductivas a través de un fluido en contacto con la superficie del cuerpo de un ser vivo con movilidad nula o reducida.	_____	_____								
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>PORTADOR 1</th> <th>PORTADOR 2</th> <th>PORTADOR 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Reino animal Corales</td> <td>Reino vegetal Helechos Musgos</td> <td>Reino fungi Ascomycota Basidiomycota</td> </tr> </tbody> </table>	PORTADOR 1	PORTADOR 2	PORTADOR 3				Reino animal Corales	Reino vegetal Helechos Musgos	Reino fungi Ascomycota Basidiomycota	_____
PORTADOR 1	PORTADOR 2	PORTADOR 3											
													
Reino animal Corales	Reino vegetal Helechos Musgos	Reino fungi Ascomycota Basidiomycota											

Fuente: Elaboración propia.

Los fenómenos de aislamiento, impermeabilización y conducción térmica están estrechamente relacionados con el desarrollo de materiales con propiedades especiales, motivo por el cual no se exploran procesos biológicos análogos, ya que el desarrollo de materiales no es de interés para este proyecto. Sin embargo, teniendo en cuenta que estos fenómenos son importantes para el buen desempeño de la luminaria, el cuerpo de la misma debe ser fabricado con materiales con alta conductividad térmica e impermeables, como metales impermeables en los cuales una pequeña capa de óxido formada en la superficie, protege al resto de metal, como es el caso del cobre, del aluminio, entre otros.

Para los fenómenos de reflexión y refracción tampoco se exploran procesos biológicos, pues como se dijo anteriormente, el principal interés de este proyecto es optimizar la gestión térmica de la luminaria, por lo tanto, para el diseño del componente óptico del cuerpo de la luminaria, el reflector, se analizan geometrías ya existentes para la buena propagación de la luz.

Para este proyecto la convección es el fenómeno de mayor interés, ya que la forma diseñada para el cuerpo de la luminaria influye directamente en la transferencia de calor por este método, siendo importante implementar geometrías que incrementen el flujo del aire, así como el área de contacto del cuerpo con el fluido. Este último parámetro es importante ya que, al aumentar su valor, aumenta la transferencia de calor por convección, tal como se expresa en la Ley del enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_S(T_S - T_{inf}) \quad (2)$$

Donde:

h es el coeficiente de convección

A_S es el área del cuerpo en contacto con el fluido.

T_S es la temperatura en la superficie del cuerpo.

T_{inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

Con la ayuda de biólogos, se buscan procesos biológicos análogos al fenómeno de convección, sin embargo, sólo se encuentra uno: el transporte de nutrientes o células reproductivas a través de un fluido en contacto con la superficie del cuerpo de un ser vivo con movilidad nula o reducida.

Una vez identificado el proceso biológico, se exploran organismos que lo llevan a cabo.

- *Corales*: En el reino animal están los corales, compuestos por un conjunto de organismos conocidos como pólipos, los cuales se alimentan de plancton y pequeños peces presentes en el agua que atrapan con sus tentáculos para luego contraerse y dirigir la presa al estómago. Una vez digerida la presa, el estómago se vuelve a abrir para expulsar los desechos y comenzar el siguiente ciclo de caza. Así mismo, en muchos corales, cada pólipo alberga una especie de alga que, a través de la fotosíntesis, proporciona energía al coral ayudando en la calcificación, lo que hace necesario una fuerte penetración de la luz solar.

El flujo del agua alrededor del coral es muy importante para su alimentación, tanto para llevar los nutrientes hacia los tentáculos de los pólipos como para alejar los desechos producidos. Es por esto que la textura superficial de los corales presenta geometrías que favorecen dicho flujo, así mismo, las formas de los corales permiten colonizar el espacio y aumentar su área superficial, con el fin de albergar gran cantidad de pólipos y de capturar mayor cantidad de luz solar. Estas características también favorecen la reproducción de los corales teniendo en cuenta que, la mayoría, desova por difusión, liberando gametos de huevos y espermatozoides en el agua para propagar su descendencia.

- *Musgos y helechos*: En el reino vegetal la dispersión de propágulos¹⁸ se da a través del viento (anemócora) o a través de los animales (zoocora). En las especies espermatofitas¹⁹ de dispersión anemócora, el viento transporta las semillas a distancias considerables debido a que éstas presentan adaptaciones, como alas o pelos, que aumentan la superficie de empuje por el viento. Otras semillas son tan pequeñas que son arrastradas fácilmente por el viento.

Los musgos y los helechos son especies no espermatofitas de dispersión anemócora cuyos propágulos son unicelulares, las esporas. El reducido tamaño de las esporas permite que sean transportadas fácilmente por el viento, por lo que su dispersión no depende de adaptaciones formales para incrementar la superficie de empuje, sino de cómo son expuestas al ambiente para ser arrastradas fácilmente.

En los helechos, las esporas se encuentran dentro de unas estructuras llamadas esporangios, ubicadas dentro de unas cápsulas llamadas soros, en la parte inferior de las hojas. Los esporangios expulsan las esporas mediante un mecanismo de catapulta, que permite lanzarlas a unos diez metros por segundo. Esto se debe a que se hallan rodeados por una hilera de células especializadas, el anillo. Cuando estas células se deshidratan, provocan un cambio drástico en la curvatura del esporangio, que libera su contenido de forma brusca tras la cavitación de las células del anillo (Noblin, 2012).

En los musgos, las esporas se almacenan en una cápsula cerrada, que al llegar a su madurez se abre para dispersarlas de una manera relativamente pasiva, liberándolas gradualmente. Para esto cuentan con uno o dos peristomas²⁰ capaces de moverse para cerrar y abrir el estoma, permitiendo la descarga gradual de esporas, en lugar de liberarlas todas a la vez.

¹⁸ Estructura de reproducción y propagación biológica.

¹⁹ Que producen flores y semillas.

²⁰ Estructuras anatómicas que rodean la apertura de un órgano. En los musgos son anillos de dientes triangulares alrededor del estoma, o boca, de la cápsula.

- *Reino Fungi*: Los hongos están constituidos por células que se conocen como hifas, las cuales se desarrollan entre células de plantas, de animales o entre sus restos. El conjunto de estas hifas se denomina micelio.

Bajo condiciones ambientales favorables, los hongos se reproducen asexualmente, mediante pequeñas porciones de micelio que se desprenden y son arrastradas por el viento, el agua, o los animales, hasta otro lugar en donde crecen nuevamente hasta originar nuevos micelios. Otras veces son esporas asexuales, producidas por el micelio, las que se desprenden y germinan generando nuevos hongos.

Sin embargo, cuando van a llegar condiciones adversas por exceso de calor, frío o falta de humedad, los hongos se reproducen sexualmente, produciendo cuerpos fructíferos o carpóforos, también conocidos como setas.

Aunque todos los hongos tienen características comunes, las diferencias en morfología y tipo de desarrollo de las esporas son criterios fundamentales para establecer las divisiones del reino. Según Deacon (2006) hay cinco divisiones. La división Chytridiomycota incluye hongos acuáticos que se dispersan por esporas flageladas (zoosporas). La división Glomeromycota se caracteriza por carecer de reproducción sexual y hacer simbiosis con raíces de plantas terrestres, formando micorrizas. La división Zygomycota incluye hongos terrestres, comúnmente conocidos como mohos, que no producen carpóforos, sino que se reproducen por esporas sexuales (zigosporas) producidas directamente del micelio. La división Ascomycota incluye hongos acuáticos y terrestres que producen carpóforos durante su reproducción sexual, en forma de copa o disco, los cuales desarrollan las esporas en estructuras microscópicas en forma de saco alargado denominadas ascas. Por último está la división Basidiomycota, hongos terrestres que forman sus esporas sexuales en unas células externas llamadas basidios, las cuales están contenidas en carpóforos, las típicas setas.

Aunque todas las especies del reino se reproducen a través de esporas, para este proyecto son de especial interés las pertenecientes a las divisiones Ascomycota y Basidiomycota, por producir carpóforos durante su reproducción sexual. Los carpóforos son interesantes para el proyecto teniendo en cuenta que su función principal es desarrollar y dispersar las esporas sexuales y, para poder realizar estas funciones adecuadamente, su estructura ha evolucionado tomando diversas formas. Otro aspecto importante es que los carpóforos son estructuras visibles e identificables, lo que facilita su recolección y análisis.

De los tres organismos mencionados, los mejores referentes son los hongos Ascomycota (incluyendo sólo los terrestres) y Basidiomycota. Aunque las geometrías y las morfologías de los carpóforos de estos hongos son similares a las de los corales, teniendo en cuenta que en ambos casos éstas buscan incrementar el flujo del fluido y el área de contacto del cuerpo con el mismo, se seleccionan los hongos por ser organismos terrestres en donde el fluido que actúa es el aire, al igual que en la luminaria. Adicionalmente, los hongos son organismos abundantes en el contexto en donde se desarrolla el proyecto, lo que facilita la observación y la recolección de ejemplares para ser estudiados.

Ni los helechos ni los musgos se consideran apropiados para referenciar el proceso de diseño, ya que estos organismos cuentan con mecanismos adicionales al simple arrastre del fluido para dispersar las esporas.

5.3.2. Descubrir.

Con el fin de recolectar información sobre los hongos de interés se trabaja con expertos en micología²¹, complementando el proceso con la búsqueda bibliográfica, incluyendo la base de datos AskNature.

Se recopila información acerca de las generalidades del reino fungí, así como de las características de las divisiones Ascomycota y Basidiomycota y las diferencias entre ellas. Con el fin de comprender mejor las diferentes morfologías de los carpóforos y sus causas, se estudia la taxonomía existente y las características estructurales y del entorno de cada orden. Se presta especial interés al componente fértil de los organismos, el himenio, y a los mecanismos empleados en la dispersión de las esporas, pues al indagar sobre las causas de la gran variedad de formas de los carpóforos se descubre que estos mecanismos influyen en gran manera.

Se realiza trabajo de campo²² para analizar mejor el entorno en donde se forman dichos organismos y para recolectar muestras para el posterior análisis de sus formas y geometrías. Teniendo en cuenta que localmente no se encuentran ejemplares de todos los órdenes, se recopilan fotografías existentes en bancos de imágenes, con el fin de identificar patrones repetitivos en sus geometrías y sacar conclusiones acerca de sus formas. El Anexo B contiene la información y las imágenes recopiladas.

El objetivo de recolectar información sobre estos organismos es tratar de comprender la razón de su morfología y la forma en que ésta aporta a la ejecución de sus funciones vitales, específicamente a la dispersión de esporas. En el siguiente numeral se presenta una síntesis de la información recolectada, además de las conclusiones obtenidas después de su análisis.

5.3.3. Analizar y evaluar.

A continuación se presenta la información más relevante, desde lo general, el reino fungí, hasta lo específico, en donde se consideran especializaciones de cada orden. A partir de la información recopilada se generan abstracciones de tipo morfológico, estructural, funcional y contextual, que servirán más adelante para identificar los organismos cuyas estrategias biológicas son las más adecuadas para bioinspirar el diseño del cuerpo de la luminaria.

5.3.3.1. Generalidades del reino fungí.

El reino Fungí incluye una amplia variedad de especies. Aunque todos los hongos tienen características comunes, las diferencias en morfología y tipo de desarrollo de las esporas son criterios fundamentales para establecer la taxonomía de este reino, agrupando los especímenes desde grupos que comparten características muy generales a nivel de división, hasta aquellos que comparten características muy específicas, llegando a nivel de género y especie.

Este reino se clasifica en cinco divisiones según Deacon (2006), Chytridiomycota, Glomeromycota, Zygomycota, Ascomycota y Basidiomycota, siendo las dos últimas las divisiones de interés para este

²¹ El proceso de recolección de datos estuvo orientado por Melissa Palacio Pulgarín, Magister en Biología de hongos, algas y plantas de la Universidad Federal de Santa Catalina, Brasil, y estudiante de Doctorado en Botánica de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Brasil.

²² El trabajo de campo es realizado en bosques húmedos del corregimiento Santa Elena y en potreros de la vereda Sinifaná, ambos lugares en Antioquia, Colombia.

proyecto por producir carpóforos durante su reproducción sexual, además por considerarse como las más evolucionadas.

El interés en los carpóforos está en que son estructuras desarrolladas por los hongos para poder reproducirse sexualmente ante condiciones adversas, empleando mecanismos especiales con el objetivo de dispersar lejos las esporas para no competir por los recursos con los nuevos hongos.

Para comprender dichos mecanismos e identificar sus diferencias se busca información sobre las características que identifican los especímenes de los diferentes grupos taxonómicos, empezando por las divisiones mencionadas y profundizando en aquellos taxones inferiores que, según sus características específicas, sean de interés para el proyecto, es decir, con potencial de ser referentes para el diseño del cuerpo de la luminaria, considerando la importancia que en éste tiene el proceso de convección térmica.

El desglose taxonómico de los ascomicetos y basidiomicetos es complejo y problemático, por lo que en este proyecto se trabaja con la clasificación propuesta por Castro y Moreno (2014), la cual atiende a la fisionomía macroscópica de los carpóforos para tener una división más comprensible y sencilla. La tabla 10 presenta dicha clasificación, en verde se resaltan los taxones de interés para el proyecto.

Tabla 10. Desglose taxonómico del reino Fungi

REINO	DIVISIÓN	SUBDIVISIÓN	CLASE	ORDEN
FUNGI	Chytridiomycota			
	Zygomycota			
	Glomeromycota			
	Ascomycota			
	Basidiomycota	Pucciniomycotina		
		Ustilaginomycotina		
		Agaricomycotina	Tremellomycetes	Auriculariales
				Tremellales
			Gasteromycetes	Phallales
				Tulostomatales
				Lycoperdales
				Sclerodermatales
				Nidulariales
				Podaxales
				Hymenogasterales
				Gautieriales
			Aphyllophoromycetes	Cantharellales
				Gomphales
				Hymenochaetales
				Polyporales
				Theleporales
			Agaricomycetes	Russulales
				Boletales
			Agaricales	

PRINCIPALES FAMILIAS DE LOS AGARICALES
Pleurotáceas
Schizophylláceas
Volvariáceas
Amanitáceas
Agaricáceas
Tricholomáceas
Mycenáceas
Marasmiáceas
Hygrophoráceas
Entolomataáceas
Naucoriáceas
Coprináceas

Fuente: Elaboración propia.

Tras analizar las características de cada orden, se seleccionan los agaricales como referente para el proyecto, es por esto que para éste orden se analizan las características de las principales familias. Teniendo en cuenta que sus características morfológicas a nivel macroscópico son muy similares y que a partir de éste nivel los taxones inferiores difieren principalmente en aspectos microscópicos, no se analizan características particulares a nivel de género y especie.

A continuación, se presenta el análisis biomimético realizado a cada grupo de hongos, teniendo en cuenta su entorno, su estructura y sus mecanismos. A partir de dicha información se generan algunas hipótesis sobre cómo su forma influye en las funciones biológicas analizadas. Tras analizar cada grupo se determina su potencial para inspirar el proceso de diseño y si es pertinente profundizar en las características de los taxones inferiores.

5.3.3.2. Generalidades de la división Ascomycota.

El carpóforo de un ascomiceto se conoce como ascocarpo. El himenio, el componente fértil del ascocarpo, se encuentra en la superficie cóncava del mismo y está formado por células generadoras de ascosporas, denominadas ascas. Estas células consisten en pequeñas bolsas elásticas llenas de líquido en cuyo interior se forman, generalmente, ocho ascosporas.

Según Ravichandra (2013), la presión generada sobre las paredes de las ascas aumenta durante el desarrollo de las esporas ya que a medida de que éstas maduran, las ascas absorben agua para disolver nutrientes. Cuando las esporas llegan a su madurez son liberadas debido a que la presión es demasiado alta, saliendo de forma violenta por la estrecha abertura del asca que puede ser una fisura, un poro o un opérculo. La distancia recorrida por las esporas debido a esta expulsión no es muy larga, pero si suficiente para incorporarse en corrientes de aire o de agua que las arrastran en todas direcciones.

En el caso de las trufas y de otros carpóforos hipogeos²³, los cuales han perdido durante la evolución la habilidad de dispersar sus esporas a través de corrientes de aire, el asca libera sus esporas por ruptura o delicuescencia de la bolsa, para ser dispersadas de forma pasiva, en muchos casos, por pequeños animales.

La figura 36 presenta el análisis biomimético de esta división.

5.3.3.3. Generalidades de la división Basidiomycota.

Se cree que a partir de los ascomicetos evolucionaron los basidiomicetos, las setas más modernas. A esta división pertenecen los hongos cuyos carpóforos, llamados basidiocarpos, han desarrollado fundamentalmente un píleo o sombrero sustentado por un estipe o pie. El himenio se encuentra en la parte inferior del sombrero y puede ser liso o estar formado por láminas, poros, dientes o pliegues.

Existe otro amplio grupo de basidiomicetos en los que el basidiocarpo presenta caracteres morfológicos que difieren de los establecidos para las típicas setas; aunque son de gran importancia, su número es inferior a los descritos anteriormente. Dentro de este grupo se consideran basidiocarpos en forma de esfera, estrella, embudo, entre otras, así como carpóforos hipogeos que se desarrollan bajo tierra. La gran variedad de morfologías se debe a adaptaciones evolutivas para desarrollar el himenio para la posterior liberación de esporas.

El himenio de los basidiomicetos está formado por basidios, células que producen basidiosporas. Consisten en bastones con esterigmas a las que están sujetas las esporas hasta su maduración, momento en que se desprenden y dispersan. Generalmente se desarrollan cuatro basidiosporas por basidio, las cuales son dispersadas en el aire durante periodos de gran humedad y suelen tener un pico de concentración en la atmósfera durante la noche o antes del amanecer.

La dispersión de esporas en el aire por parte del carpóforo debe ser activa, teniendo en cuenta la poca masa y el tamaño de las esporas. A escalas tan pequeñas, la fuerza de la gravedad es despreciable en comparación con las fuerzas de adhesión, por lo que las esporas tienden a adherirse entre ellas o al himenio. A diferencia de otros sistemas de dispersión activos que involucran estructuras especializadas para lanzar las esporas, como las de los helechos o los ascomicetos, la

²³ Los carpóforos se denominan epigeos si crecen encima del suelo, si crecen por debajo del suelo se denominan hipogeos.

mayoría de las basidiosporas son autopropulsadas por agua (Noblin, Yang y Dumais, 2009) y reciben el nombre de balistosporas. Algunos basidiomicetos, los Gasteromycetes, perdieron la capacidad de autopropulsar sus esporas.

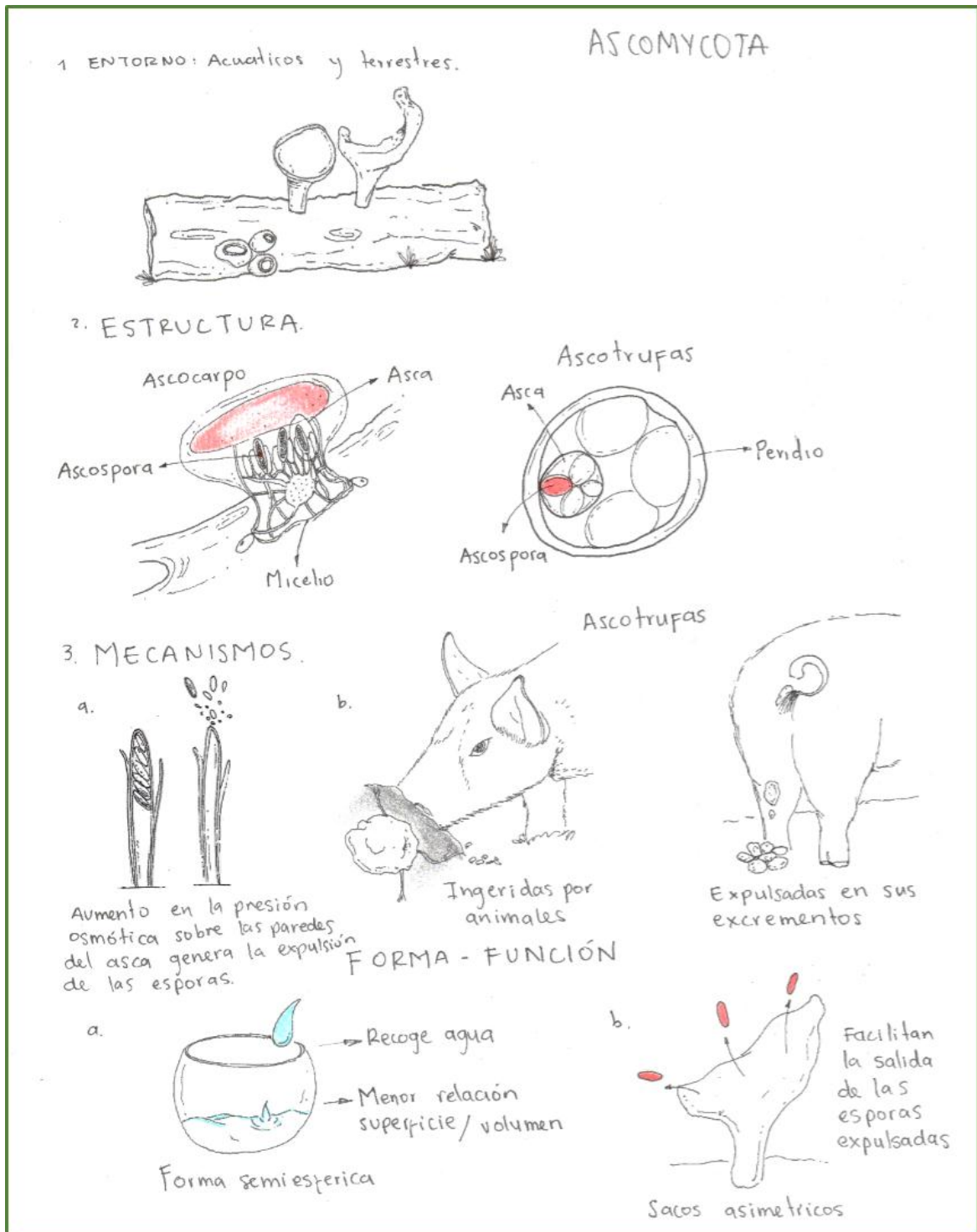


Figura 36. Análisis biomimético de la división Ascomycota.
Fuente: Elaboración propia.

Según Noblin, Yang y Dumais (2009), a escalas microscópicas²⁴, las fuerzas de tensión superficial dominan sobre la fuerza de la gravedad; fenómeno que influye notablemente en la dispersión de las balistosporas. El proceso comienza cuando la espora alcanza su madurez. Segundos antes de ser lanzada, la espora secreta químicos que atraen agua de tal forma que se condensan dos diminutas gotas de agua, una esférica en la base, justo en el punto de unión con el esterigma y otra película de agua que recubre la superficie adaxial de la espora. Cuando las gotas hacen contacto se genera una rápida coalescencia. La energía liberada y el cambio repentino del centro de masa de la espora generado por dicha fusión, resultan en un momentum que permite el desprendimiento de la espora. La figura 37 ilustra este proceso.

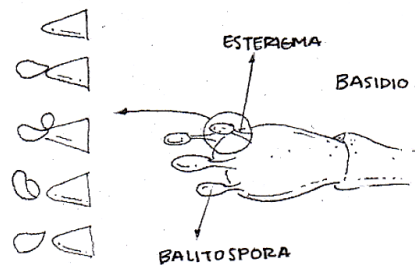


Figura 37. Maduración y expulsión de balistosporas.

Fuente: Elaboración propia.

Este mecanismo ha sido denominado “catapulta de tensión superficial” y permite que las esporas sean descargadas con una energía cinética inicial y una dirección determinada, como se explica en Liu et al. (2017). Las esporas caen verticalmente hasta incorporarse en corrientes de aire para ser dispersadas. En este proceso el carpóforo genera vapor de agua que enfría el aire, creando corrientes de convección que arrastran las esporas desprendidas.

La dispersión de esporas, tanto de los ascomicetos como de los basidiomicetos, involucra dos pasos. El primero consiste en lanzar las esporas y el segundo en dispersarlas lejos del carpóforo. Aunque en ambas divisiones el lanzamiento de las esporas se hace de forma activa, los basidiomicetos emplean un mecanismo cuyo objetivo es simplemente desprender las esporas y direccionarlas para luego ser arrastradas por corrientes de aire generadas por convección, mientras que los ascomicetos emplean un mecanismo mucho más violento que expulsa con fuerza las esporas fuera del carpóforo para incorporarse en las corrientes de aire que lo rodean.

En la luminaria, la disipación de calor se da mediante dos procesos. La conducción, la cual permite la transferencia de calor a través un material conductor hacia el exterior del dissipador y la convección, que se encarga de la transferencia del calor que abandona la superficie al intervenir el aire. Teniendo en cuenta que el lanzamiento de las basidiosporas es menos violento que el de las ascosporas y que su dispersión es asistida por corrientes de aire generadas por convección, se decide profundizar en las morfologías de los basidiomicetos, pues sus mecanismos para dispersar esporas tienen más afinidad con los procesos de conducción y convección térmica que los mecanismos desarrollados por los ascomicetos.

A continuación se presenta el análisis biomimético de las clases y de los órdenes de la subdivisión Agaricomycotina de los basidiomicetos. Las subdivisiones Pucciniomycotina y Ustilaginomycotina no forman basidiocarpos, por lo que no se profundiza en su análisis.

²⁴ Cuando la longitud de un objeto es menor a 1mm.

La figura 39 presenta el análisis biomimético de la clase Tremellomycetes, cuyos especímenes se caracterizan por su adaptación a ambientes de extensas sequías y luego con humedad.

La clase Gasteromycetes incluye especímenes que se caracterizan por tener basidios que perdieron la habilidad de descargar activamente sus esporas en el ambiente. Según New Brunswick Museum (2007), aunque no se sabe exactamente la causa de la proliferación de los especímenes con este defecto, se creó que éste les dio la ventaja evolutiva de poder proteger las basidiosporas dentro del carpóforo antes de enviarlas lejos, dentro de un ambiente ferozmente competitivo. Las figuras 40 – 45 presentan el análisis de los órdenes de esta clase y de los mecanismos que emplean para dispersar las esporas.

La clase Aphyllorphomycetes comprende hongos que presentan carpóforos cuyo himenio no está organizado en láminas, sino que es liso, en forma de dedos o ramas, dentado, con pliegues o con poros. La figura 38 muestra varios tipos de carpóforos presentes en esta clase.

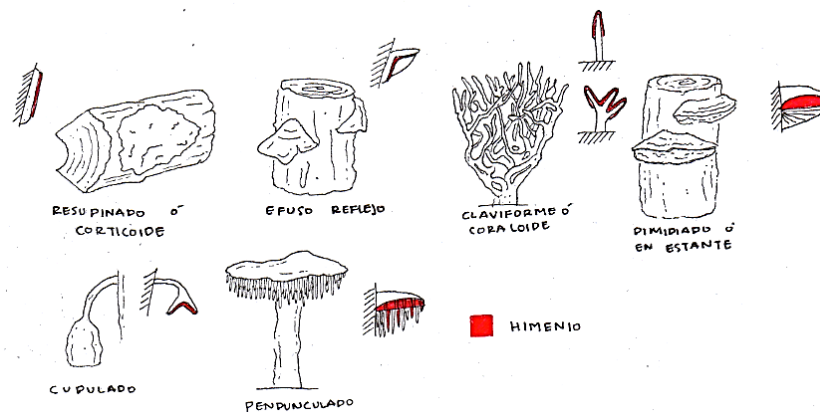


Figura 38. Tipos de carpóforos presentes en la clase Aphyllorphomycetes.

Fuente: Adaptado de Alexopoulos y Mims (1985).

Se caracterizan por su actividad saprofítica como descomponedores de madera; raramente se encuentran sobre el suelo. Son de consistencia leñosa, coriácea o carnosos-coriácea, perennes, y su himenio no es separable del resto de la carne.

La descripción hecha en el Anexo B sobre los Aphyllorphomycetes tiene en cuenta la clasificación presentada en la tabla 10, propuesta por Castro y Moreno (2014), la cual se basa en estudios de las estructuras microscópicas de los carpóforos. Sin embargo, a nivel macroscópico los carpóforos presentan formas muy heterogéneas dentro de un mismo orden, lo que dificulta el análisis biomimético. Para facilitar el análisis se decide trabajar con la forma en que tradicionalmente se agrupan los carpóforos, según la superficie himenial, a pesar de que los estudios muestren que esta agrupación no es natural. En esta agrupación los Cantharelloides tienen pliegues, los Clavaroides tienen forma de dedos o ramas, los Corticioide son lisos o verrugosos, con forma de corteza, los Poroides tienen poros y los Hidnoides son dentados (Alexopoulos y Mims, 1985). Las figuras 46-50 presentan el análisis de dichos grupos.

Las figuras 51 y 52 presentan el análisis biomimético de los órdenes de los Agaricomycetes, hongos cuyo carpóforo recibe el nombre de seta, el cual consta de un sombrero sustentado por un pie. Son carpóforos putrescibles cuyo himenio presenta generalmente láminas, algunos presentan poros. Están compuestos en gran parte por agua, por lo que son carnosos y blandos, aunque algunas especies son duras. Sus carpóforos son típicamente producidos sobre el suelo.

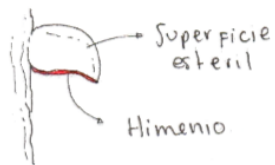
TREMELIOMYCETES.

① ENTORNO: Ambientes con ciclos de extensas sequías y luego con humedad (como en el invierno) sobre madera en descomposición

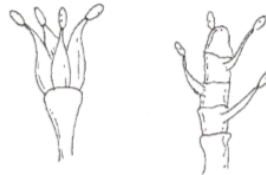


② ESTRUCTURA.

MACROSCÓPICA



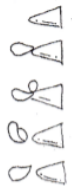
MICROSCÓPICA



Basidios septados

③ MECANISMO

a. Balitospora b.



Aguanta años secándose y reviviendo

④ FORMA VS FUNCIÓN.

... Ondas y formas sinuosas y serpenteantes para ocupar espacio. Aparecen debido a presiones y crecimientos diferenciales.

Organismos que crecen más rápido en su periferia que en el centro en donde la materia busca espacio para acomodarse y la superficie se dota de estructura.

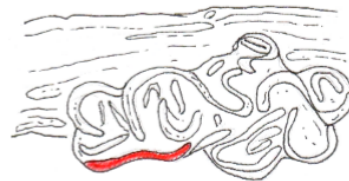


Figura 39. Análisis biomimético de la clase Tremellomycetes.

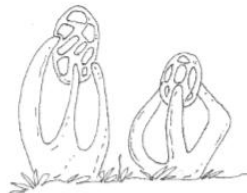
Fuente: Elaboración propia.

GASTEROMYCETES : Entorno árido, posible causa de que hayan perdido la capacidad de expulsar con fuerza las esporas.

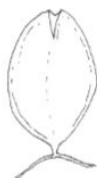
PHALLALES.

① ENTORNO:

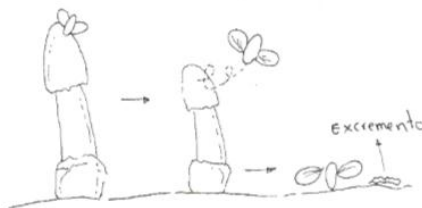
Materia orgánica vegetal en descomposición. En zonas templadas, cálidas y áridas.



② MECANISMOS:

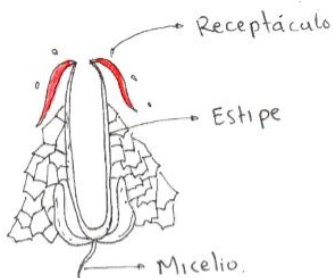
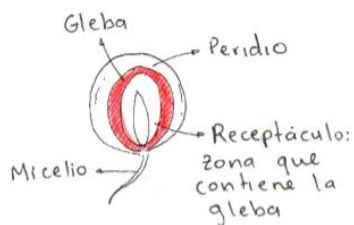


Huevo: Protección



Formas, colores y olores que atraen insectos en especial moscas.

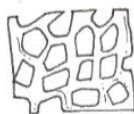
③ ESTRUCTURA:



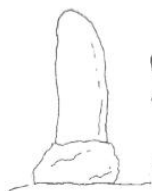
④ FORMA VS FUNCIÓN



Esfera para proteger



Mayas ligeras y estructurales para aumentar superficie de contacto con los moscos.



Pie largo para alejarlo del suelo. Cilindro columna natural

Figura 40. Análisis biomimético del orden Phallales, clase Gasteromycetes.

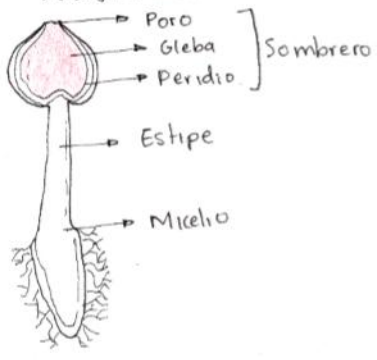
Fuente: Elaboración propia.

· TULOSTOMATALES, LYCOPERDALES, Y SCLERODERMATALES

① ENTORNO: Zonas áridas (el agua suele ser el principal factor limitante)



② ESTRUCTURA: TULOSTOMATALES



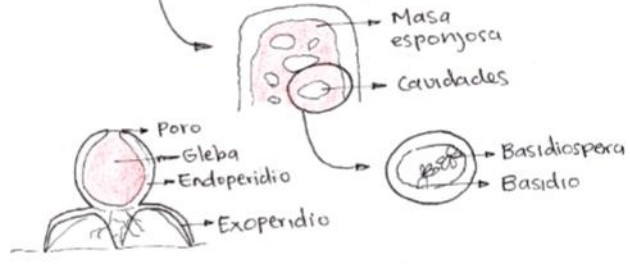
LYCOPERDALES* Y SCLERODERMATALES: Gleba polvorienta



* Geastrum



Inmaduro



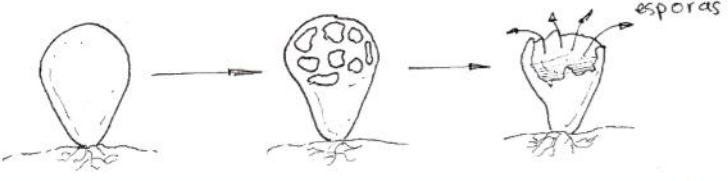
Maduro

③ MECANISMO:

Ⓐ Presión externa



Ⓑ Desprendimiento casquete superior



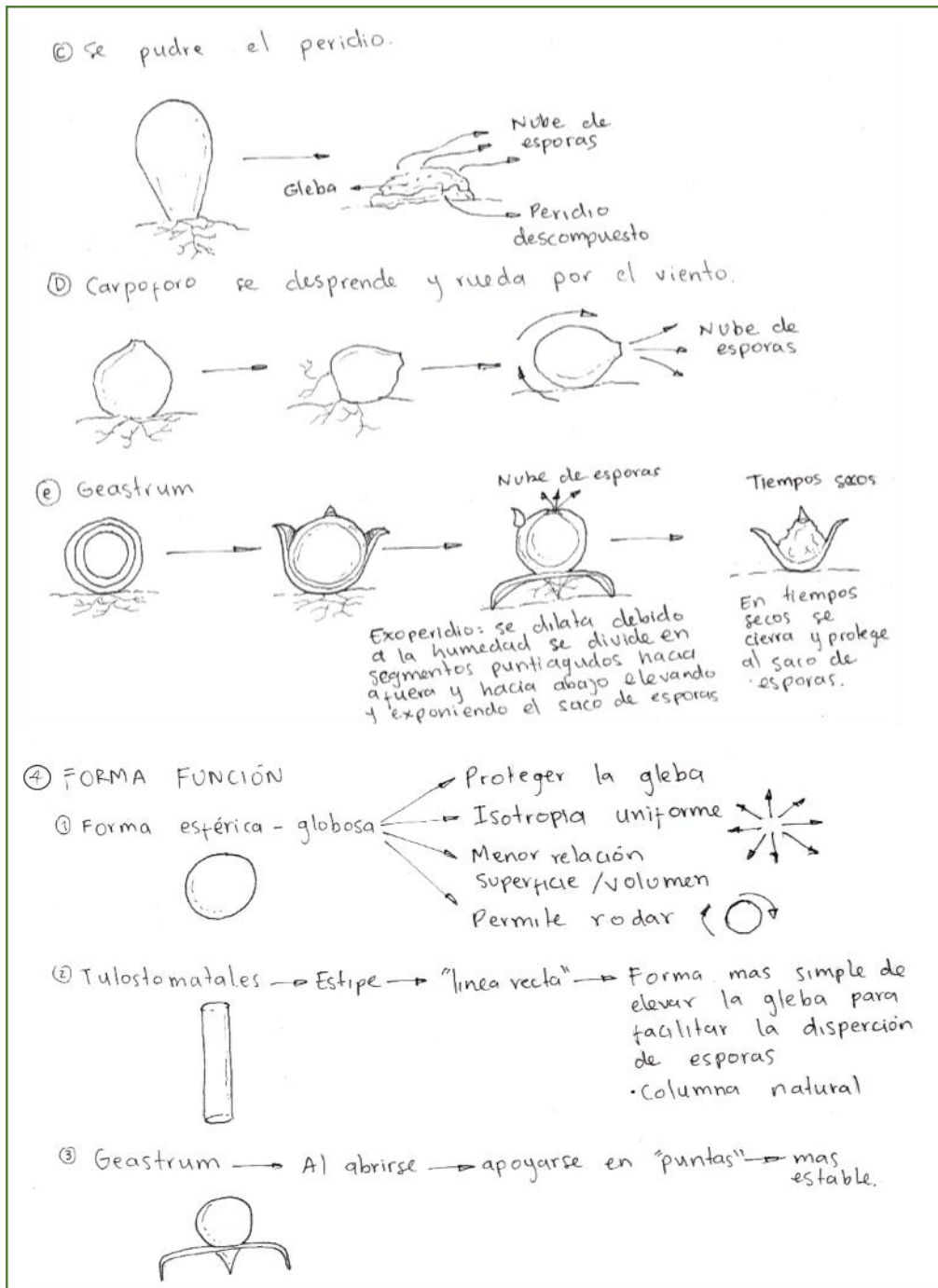


Figura 41. Análisis biomimético de los órdenes Tulostomatales, Lycoperdales y Sclerodermatales, clase Gasteromycetes.

Fuente: Elaboración propia.

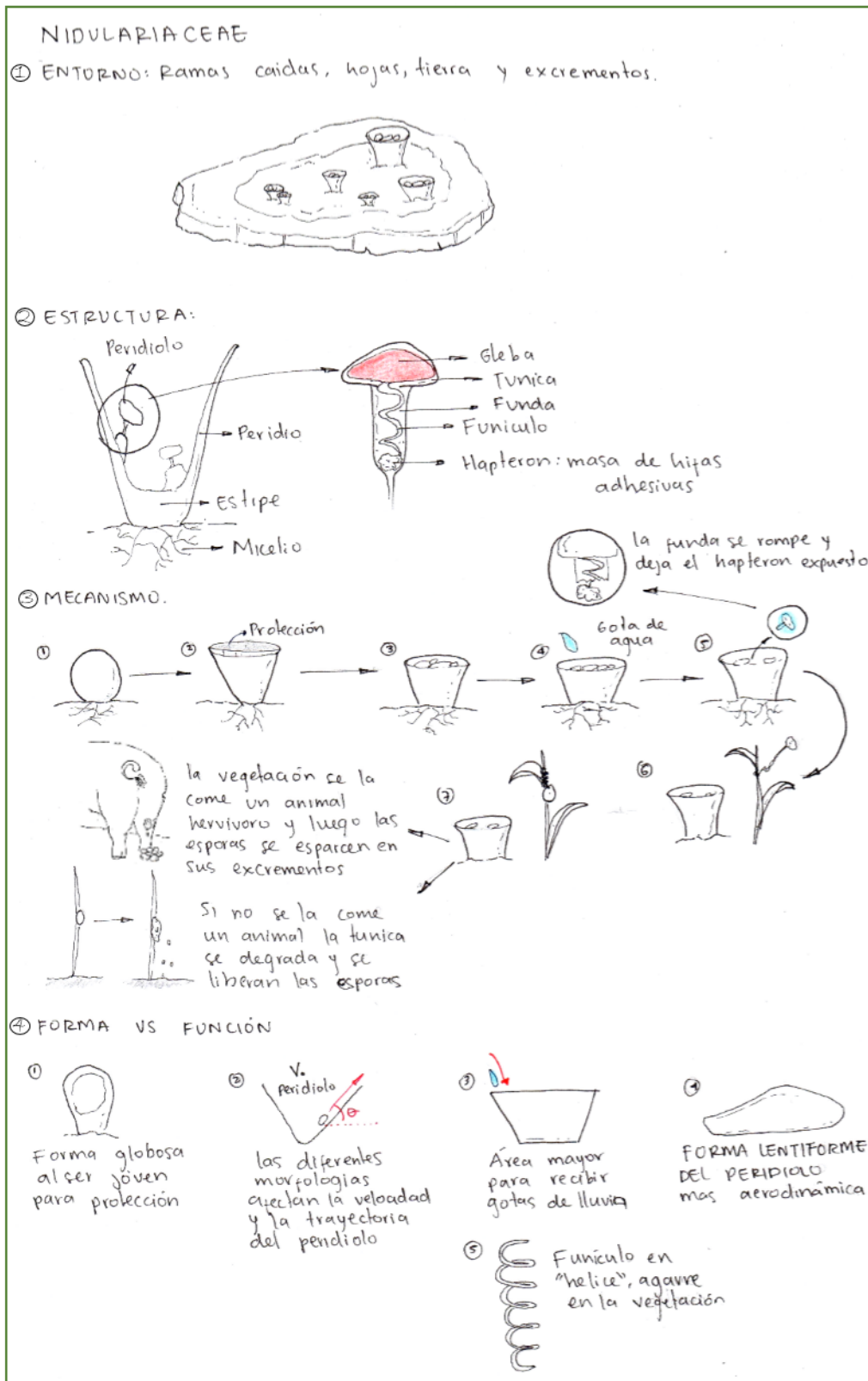


Figura 42. Análisis biomimético de la familia Nidulariaceae, orden Nidulariales, clase Gasteromycetes.
Fuente: Elaboración propia.

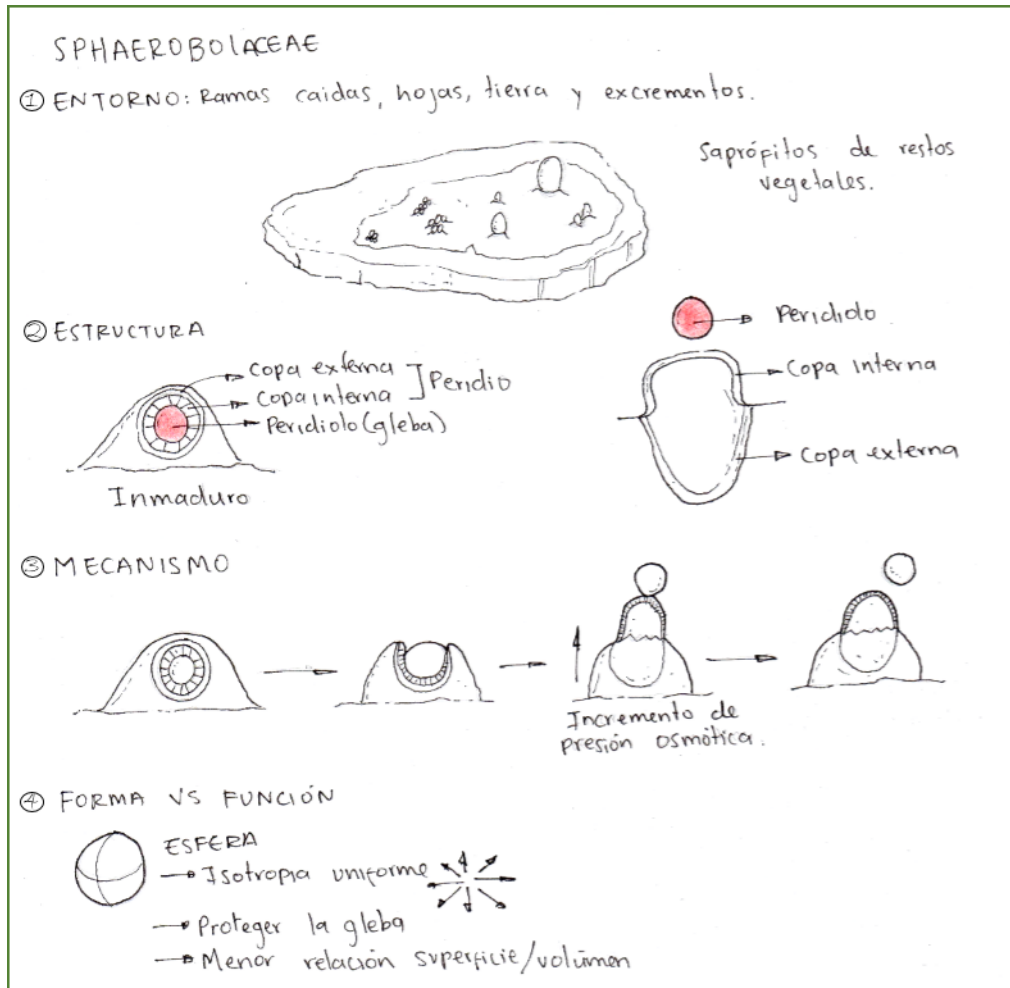


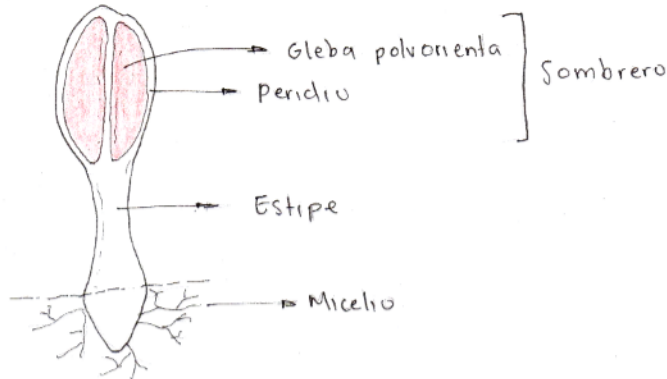
Figura 43. Análisis biomimético de la familia Sphaerobolaceae, orden Nidulariales, clase Gasteromycetes.
Fuente: Elaboración propia.

PODAXALES.

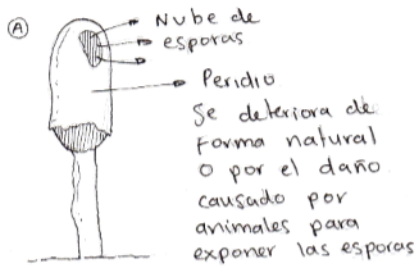
① ENTORNO: Zonas cálidas y secas como saprófitos o micorrizicos.



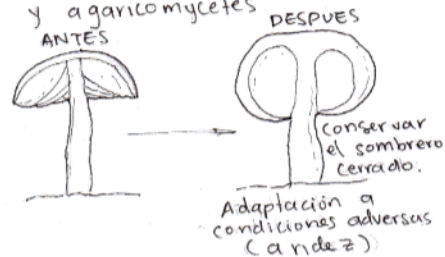
② ESTRUCTURA.




③ MECANISMOS




② Transición entre gasteromycetes y agaricomycetes



④ FORMA-FUNCIÓN

- ESTIPE  Cilindro como columna natural

 Forma globosa del Sombrero para protección
la mayoría es alargado al madurar

- ① Aumenta la inercia rotacional del carpóforo ayudándole a permanecer erguido
- ② Permite elevar la parte superior de la gleba
- ③ Aumenta la superficie de contacto de la gleba con el aire.

Figura 44. Análisis biomimético del orden Podaxales, clase Gasteromycetes.

Fuente: Elaboración propia.

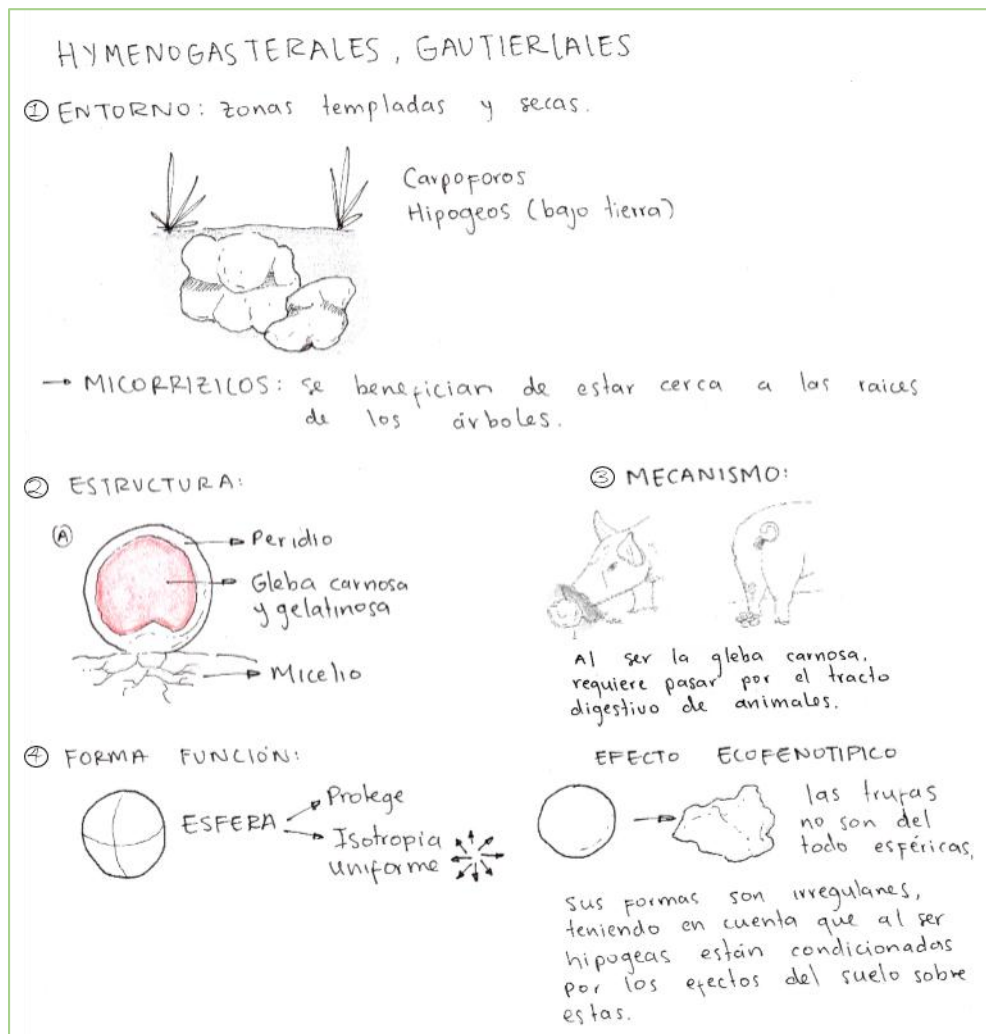


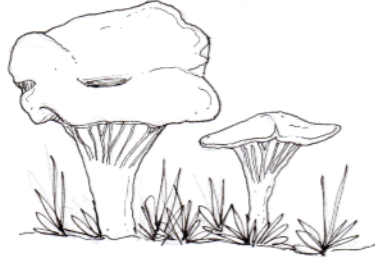
Figura 45. Análisis biomimético de los órdenes Hymenogasterales y Gautieriales, clase Gasteromycetes.

Fuente: Elaboración propia.

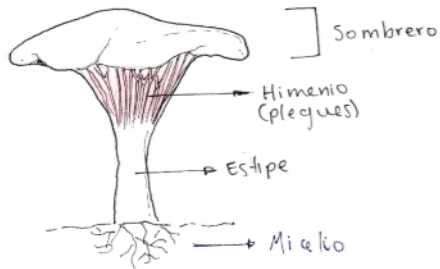
APHYLLOPHOROMYCETES

CANTHARELLAEAS: Himenio con pliegues, coloquialmente denominados rebozuelos.

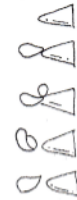
① ENTORNO: Bosques húmedos, terrestres



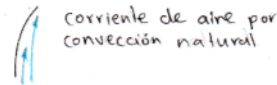
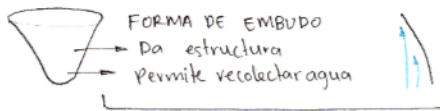
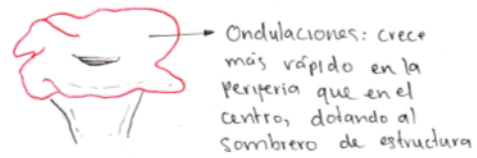
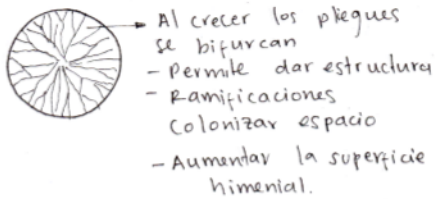
② ESTRUCTURA:



③ MECANISMO: Balitospora.



④ FORMA VS FUNCIÓN



Forma aerodinámica que favorece el arrastre de las esporas por las corrientes de aire generadas por convección natural

Figura 46. Análisis biomimético de los Cantharellaeas, clase Aphyllophoromycetes.

Fuente: Elaboración propia.

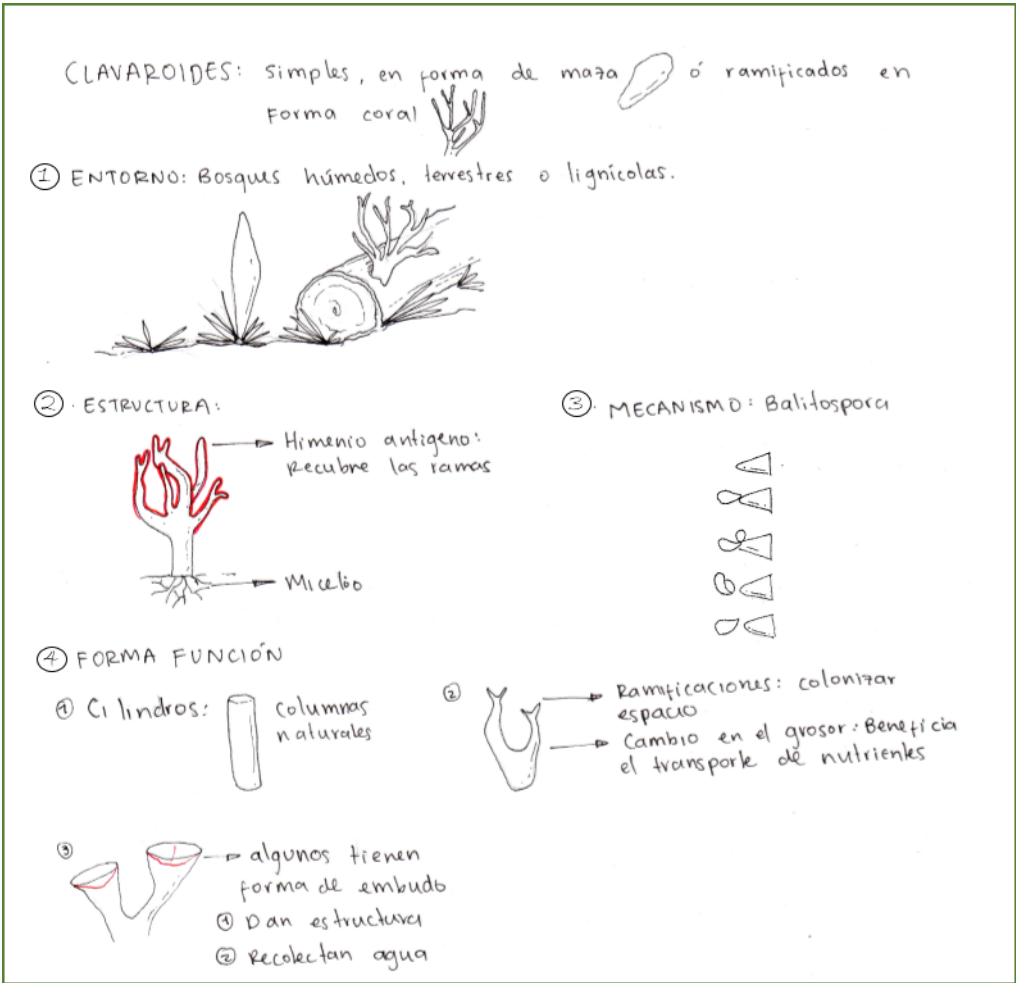


Figura 47. Análisis biomimético de los Clavaroides, clase Aphyllophoromycetes.
Fuente: Elaboración propia.

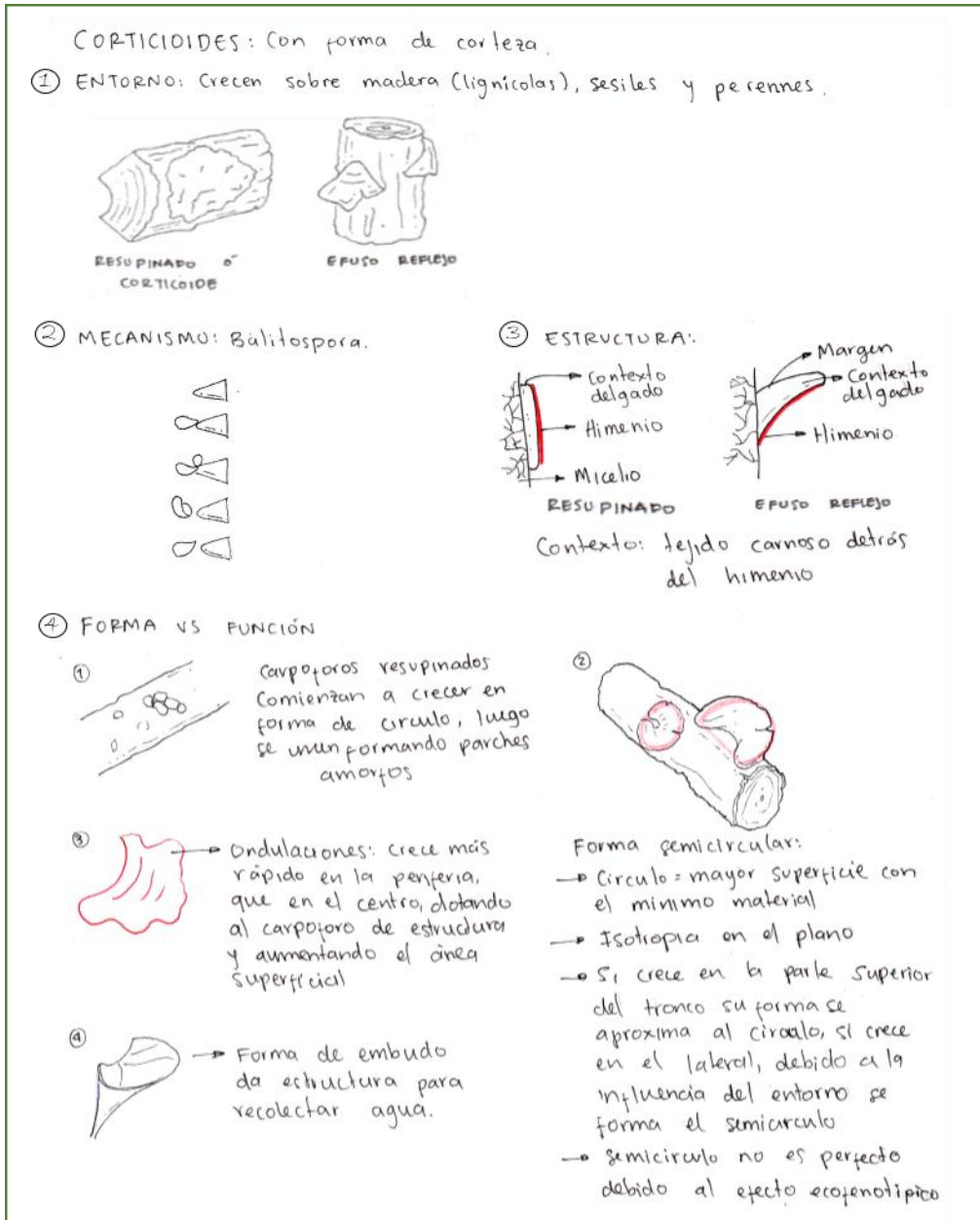
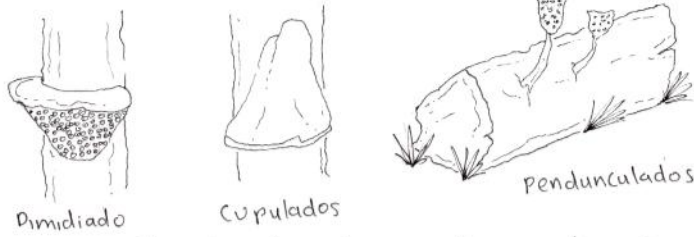


Figura 48. Análisis biomimético de los Corticioides, clase Aphyllophoromycetes.
Fuente: Elaboración propia.

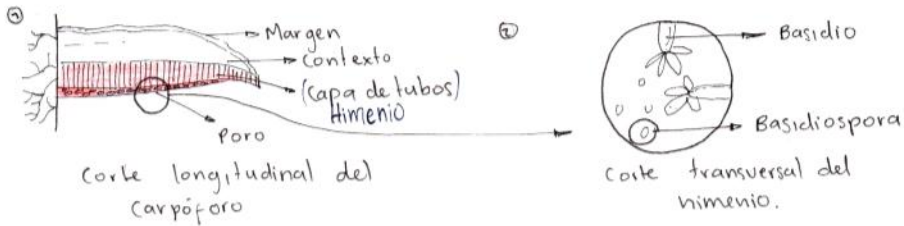
POLYPORALES: Himenio con poros.

① ENTORNO: Bosques húmedos, lignícolas (su mayoría sésiles y perennes)

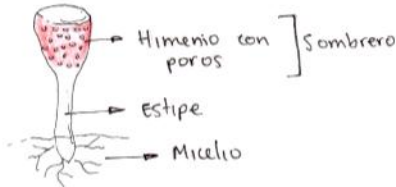


Saprotitos de madera muerta, en algunos casos, patógenos de madera viva.

② ESTRUCTURA:

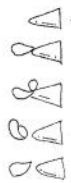


③ Pendunculado (minoria)



③ MECANISMOS:

① Basidiospora.



②



③

Datación mediante capas de poros en los especímenes perennes.



* Algunos viven hasta 90 años

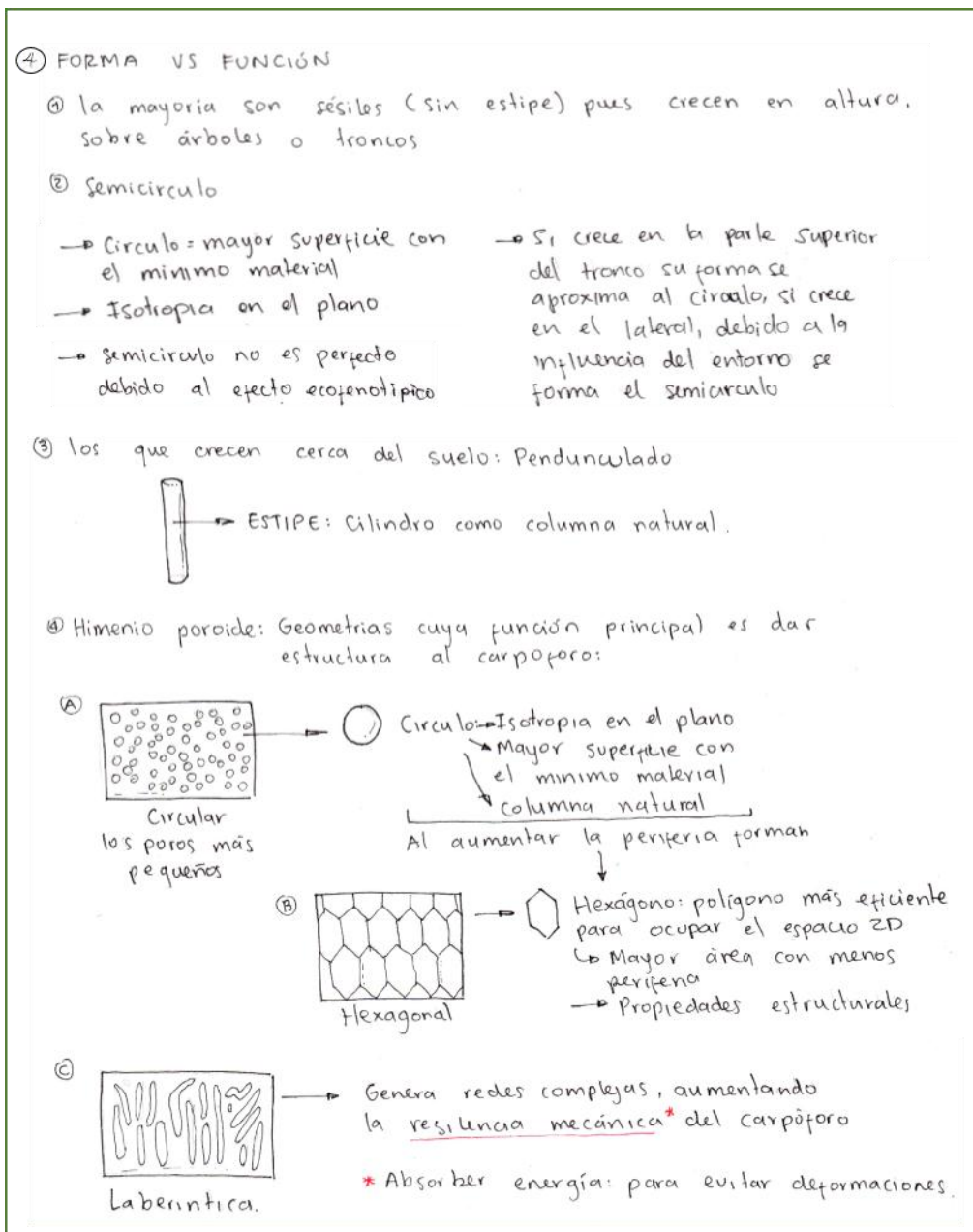
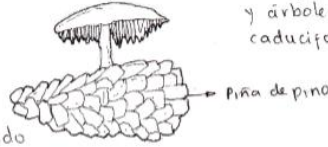


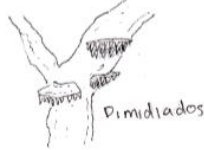
Figura 49. Análisis biomimético de los Polyporales o Poroides, clase Aphyllophoromycetes.
Fuente: Elaboración propia.

HIDNÓIDES: Superficie himenial dentada

① ENTORNO: Bosques húmedos → Terrestres: pendunculados → bajo coníferas y árboles caducifolios



→ lignícolas: Resupinado o dimidiado

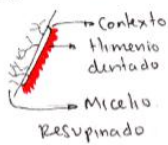


Ectomicorrizas, nutren los árboles

② MECANISMO: Balistospora



③ ESTRUCTURA:



④ FORMA VS FUNCIÓN

① Estipe en los pendunculados: Cíndro como columna natural

② Su carne es más blanda y gelatinosa que el resto de los *aphyllophoromycetes*, lo que permite que por geotropismo positivo su himenio produzca proyecciones con forma de dientes de esta forma aumenta su área superficial.



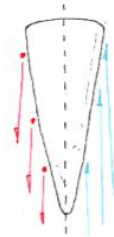
LOS DIENTES

* De manera simplificada se puede abstraer como líneas rectas cuya principal función es colonizar el espacio



③ En realidad, los dientes son cónicos con el propósito de hacer más eficiente la dispersión de esporas

• Facilita que las esporas caigan sin que su trayectoria interfiera con la de los demás.



• Forma aerodinámica que facilita el flujo del aire que sube por convección natural

④ Al tener carpóforos dimidiados y resupinados, el círculo le permite:

- ① Mas superficie con menos material
- ② Isotropía en el plano
- ③ El círculo no es perfecto debido al efecto ecofenotípico.



Figura 50. Análisis biomimético de los Hidnoides, clase *Aphyllophoromycetes*.

Fuente: Elaboración propia.

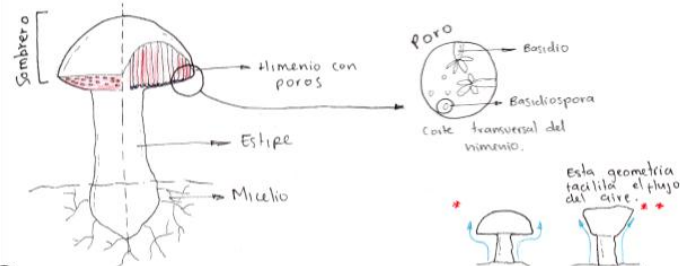
AGARICOMYCETES

BOLETALES: Setas con poros, carne blanda y putrescible.

① ENTORNO: Zonas boscosas o arboladas. (Coníferas o raducifolios)



② ESTRUCTURA: Setas de soporte medio a grande.

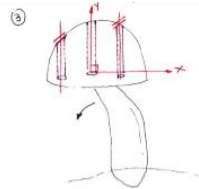
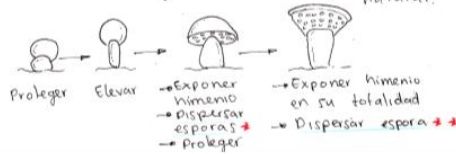


③ MECANISMO:

① Balistospora.



② Desarrollo antogénico



El estipe se curva para garantizar la verticalidad de los poros



Cambiar de color al comprimirse señal toxicidad

④ FORMA-FUNCIÓN

① Esfera en los especímenes jóvenes → Menor relación superficie/volumen → Protección → Isotropía uniforme → Guarda calor

② Especímenes adultos → 1/2 esfera para proteger → Exponer

③ Especímenes muy adultos. • concavidad hacia arriba que facilita el flujo del aire
aire por convección natural

④ POROS → Circulares → Hexagonales
Verticales → Facilitar la liberación de esporas
Geometras cuya función principal es dar estructura
IMPORTANTE
Sombreros grandes y pesados

⑤ Estipe grueso y bulboso (estructura levantar y soportar un cono) Sombrero pesado.

Figura 51. Análisis biomimético del orden Boletales, clase Agaricomycetes.

Fuente: Elaboración propia.

AGARICOMYCETES

SETAS CON LÁMINAS: Agaricales y Russulales

① ENTORNO: Gran variedad de habitats desde el ártico hasta los trópicos

- Parásitos
- Saprófitos
- Micorrízicos

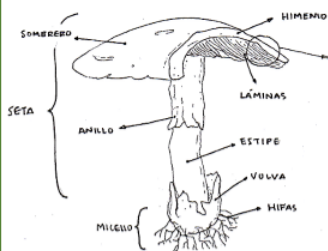
LA MAYORÍA:



OTROS:



② ESTRUCTURA:



* FAMILIA PLEUROTÁCEAS



Carean de pie o tienen pie lateral o excéntrico (lignícolas)

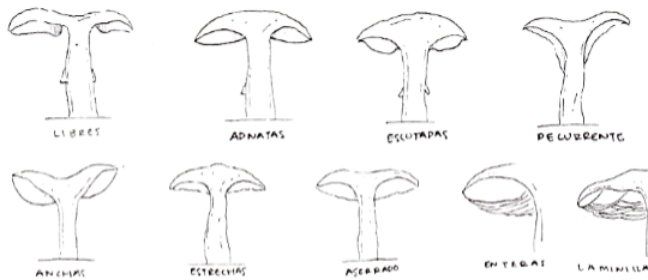


Himenio hacia el suelo

SOMBRERO



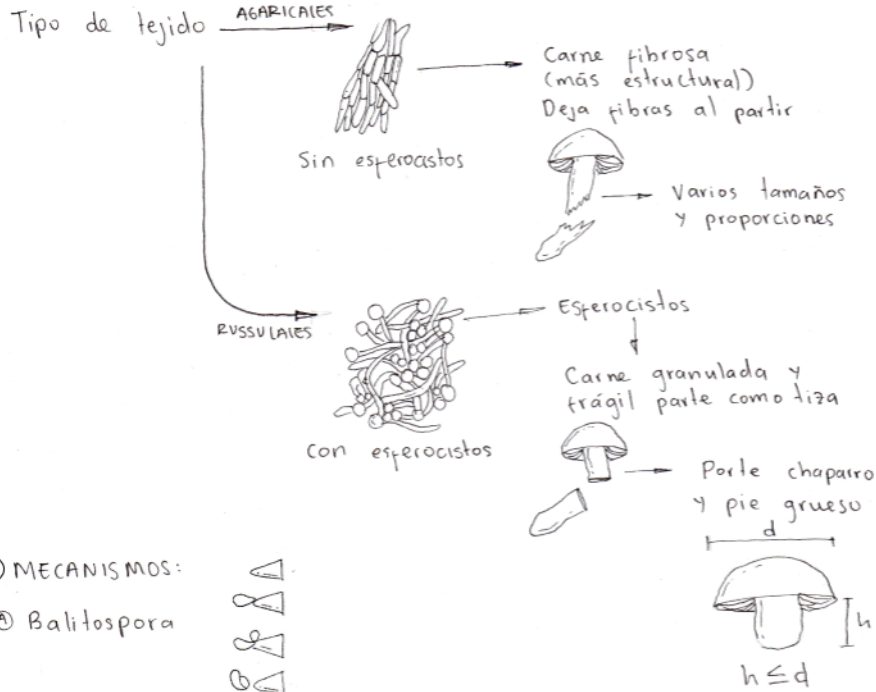
LÁMINAS



Disposición



* PRINCIPAL DIFERENCIA ENTRE AGARICALES Y RUSSULALES:



③ MECANISMOS:

Ⓐ Balitospora

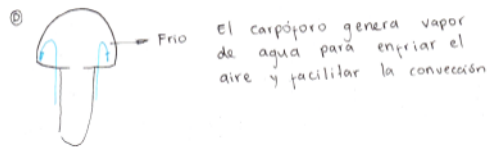


Ⓑ Desarrollo ontogénico



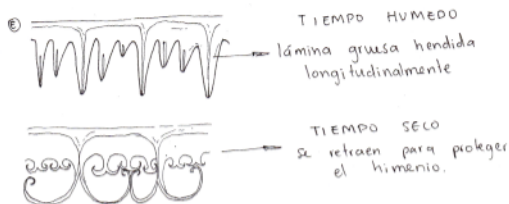
- Proteger
- elevar
- Proteger
- Exponer himenio
- Dispersar esporas *
- Proteger
- Exponer himenio en su totalidad
- Dispersar esporas **
- Hidratar: al madurar, pierden humedad generando cambios en su morfología que le permiten recoger agua.

Ⓒ Dispersar esporas



→ MECANISMOS ESPECIALIZADOS DE DETERMINADAS FAMILIAS:

SCHIROPHYLLACEAS



Ⓔ COPRINÁCEAS



④ FORMA VS FUNCIÓN

①

ESFERA: Menos relación superficie/volumen

- Isotropía uniforme
- Protección
- Guarda el calor

CILINDRO: columna natural

②

ESPECÍMENES JOVENES

GLOBOSO OVOIDE

ESPECÍMENES ADULTOS

CONVEXO CÓNICO MAMELONADO HEMISFÉRICO ACAMPANADO.

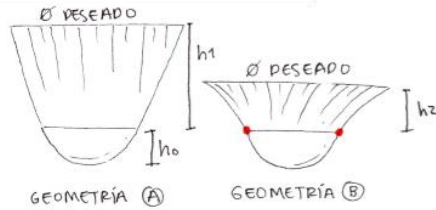
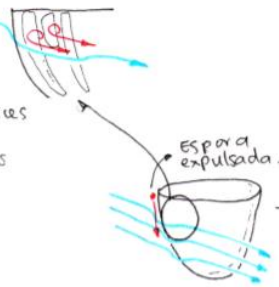
- Proteger de esfuerzos axiales:
 - Ideal hemisférico (Isotropía uniforme): Se rompe por factores externos generando otras curvaturas → Dobles curvaturas positivas
- Exponer el himenio

③ ESPECÍMENES MADUROS

APLANADO UMBILICADO CÓNCAVO

- Recoger agua:
 - Al madurar, pierden humedad generando cambios en la morfología
- Exponer himenio en su totalidad:
 - Dobles curvaturas negativas: (superficies anticlásticas)
 - ↳ Dan estructura
 - ↳ Son más aerodinámicas facilitando el flujo del aire que sube por convección natural.
- Geometría que permite que una espora al caer sea arrastrada por las corrientes de flujo libre por debajo de su punto de expulsión.

RIBIETS: Permiten reducir la resistencia aerodinámica. Generan microvórtices que dan energía para arrastrar las esporas.



→ la geometría A es más aerodinámica que la geometría B, en esta última, se sacrifica un poco esta propiedad con el fin de aumentar la superficie superior para recolectar agua más fácilmente. El punto de inflexión (•) permite aumentar más rápido el diámetro sin necesidad de tanto material ni de incrementar mucho la altura ($h_2 < h_1$)

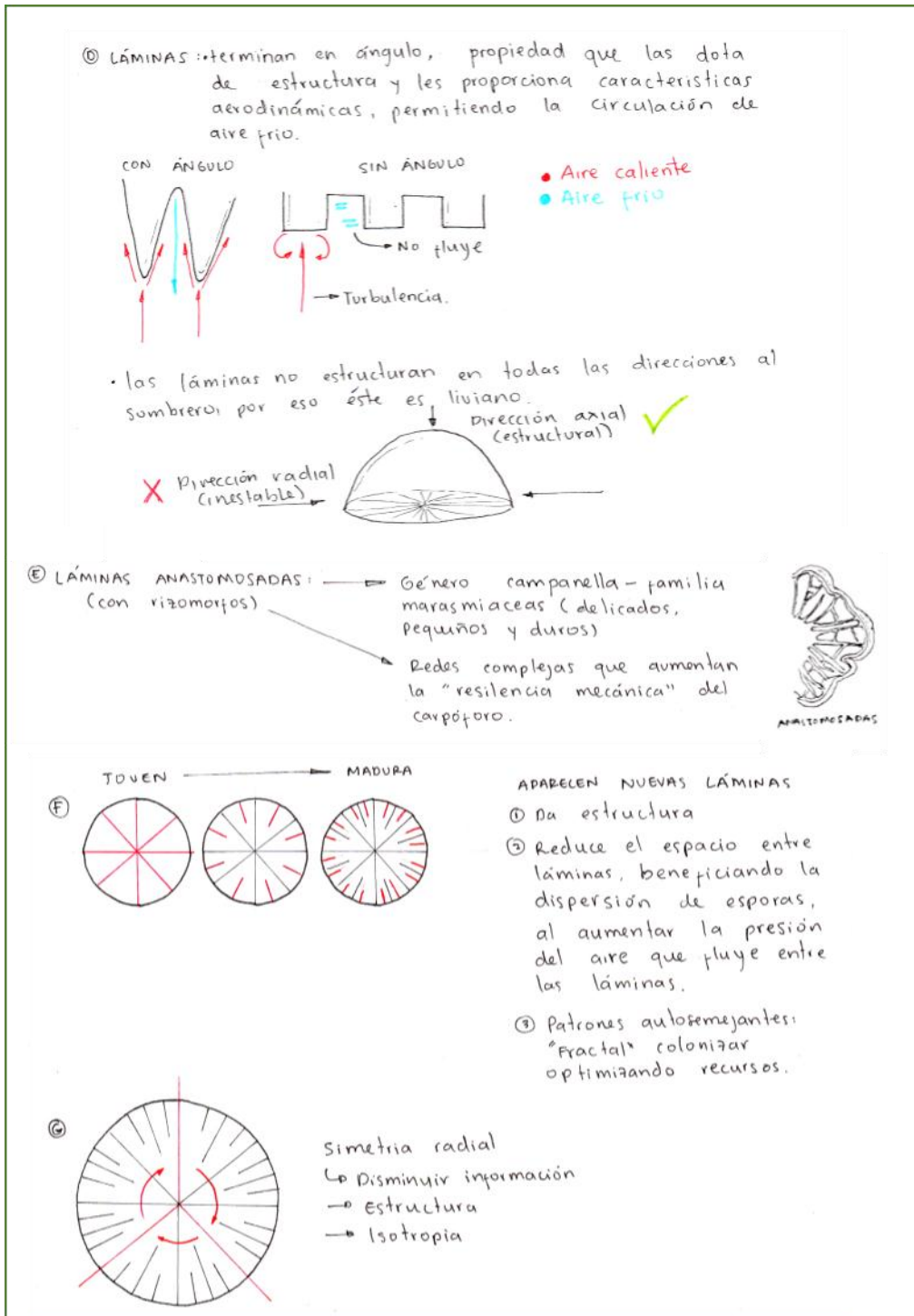


Figura 52. Análisis biomimético de los órdenes Russulales y Agaricales, clase Agaricomycetes.
Fuente: Elaboración propia.

Tras el análisis realizado se concluye que, a pesar de las diferencias morfológicas entre los carpóforos de los diferentes grupos taxonómicos, aumentar el área superficial del himenio para sí aumentar la cantidad de esporas producidas, es una de las funciones principales de las formas de los carpóforos. Las diferencias existentes se deben a adaptaciones evolutivas a diferentes entornos, en donde, además de aumentar el área superficial, el himenio tiene otras funciones de supervivencia, como se explica a continuación. La principal función de las morfologías de los carpóforos de los Tremellomycetes es permitir su adaptación a ambientes de extensas sequías y luego con humedad. En los Gasteromycetes las formas buscan proteger la gleba para luego facilitar la expulsión de la misma mediante agentes externos. En los Aphyllorphomycetes las formas son principalmente estructurales, teniendo en cuenta que los carpóforos son, en su mayoría, perennes, de mediano a gran tamaño, además de carnosos y coriáceos.

Al ser los carpóforos de los Agaricomycetes putrescibles, blandos, de tamaño pequeño o mediano, además de estar, en su mayoría, sobre el suelo, las formas buscan principalmente proteger el himenio en los especímenes jóvenes, y facilitar el arrastre de las esporas por las corrientes de aire que suben por convección natural, especialmente en los especímenes maduros. Es por esto que se considera que las estrategias biológicas de los especímenes de esta clase son las más adecuadas para bioinspirar el diseño del cuerpo de la luminaria, específicamente los especímenes del orden Agaricales, ya que en los Boletales los poros buscan estructurar al sombrero teniendo en cuenta su tamaño y peso, más que facilitar el flujo del aire para arrastrar las esporas de su interior.

5.4. ABSTRAER ESTRATEGIAS BIOLÓGICAS.

Para abstraer estrategias biológicas, se procede a estudiar en profundidad el orden de los Agaricales, especialmente especímenes maduros, con el fin de desarrollar una síntesis geométrica luego de comparar e identificar aquellos elementos formales más relevantes desde lo estético o lo funcional.

Para el estudio se recolectan varias muestras, las cuales son diseccionadas para ver con más detalle las partes pequeñas que constituyen los carpóforos, haciendo uso del estereomicroscopio del Laboratorio de Biotecnología de la Universidad EAFIT. La figura 53 presenta algunas imágenes de los especímenes analizados. El Anexo C registra con mayor detalle las imágenes y las mediciones realizadas.

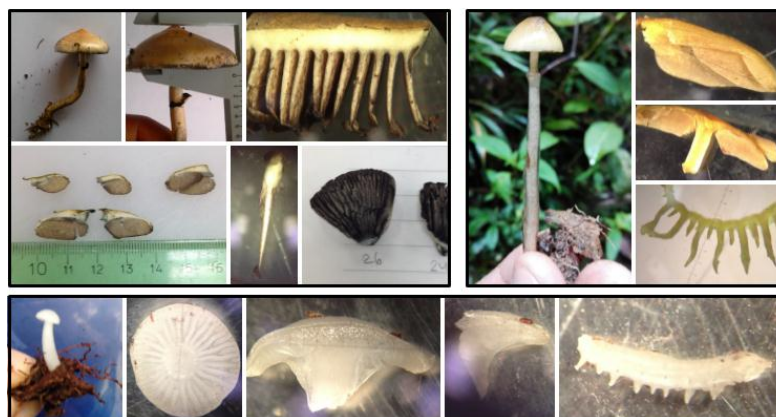


Figura 53. Disección y análisis de muestras de Agaricales.
Fuente: Elaboración propia.

Parte de las estrategias son descritas en la figura 52, al analizar la relación entre la forma y la función de los carpóforos a nivel macroscópico. Esta información se complementa analizando los principios

de la percepción visual planteados en Wallschlaeger y Busic-Snyder (1992), teniendo en cuenta la importancia que tiene el aspecto estético en la luminaria. Los carpóforos de los Agaricales presentan objetos con propiedades similares que forman patrones periódicos, cumpliendo con las leyes de similaridad y periodicidad de la Gestalt. Dentro de los elementos de la composición visual se puede percibir balance con simetría radial, repetición y ritmo, que por la forma periódica de darse, generan equilibrio y armonía.

Para concluir con el proceso de análisis y síntesis, se desarrolla una abstracción simplificada de la forma estudiada, la cual se basa en identificar los elementos generadores de la forma propuestos en Wallschlaeger y Busic-Snyder (1992), es decir, puntos, líneas, planos y volúmenes y en encontrar relaciones geométricas entre ellos. Estos elementos son importantes, ya que además de ser los elementos básicos de cualquier composición artística, arquitectónica o de algún diseño en general, son tipos de datos que determinan la naturaleza del conjunto de valores que puede tomar una variable dentro de un algoritmo.

-*Punto*: El punto es un elemento conceptual, en decir, sin dimensiones, cuya función principal es fijar posición. Se detecta en extremos de líneas, intersecciones y centros geométricos de polígonos y planos.

- *Línea*: Elemento unidimensional. Los atributos a tener en cuenta son longitud, posición y dirección. Puede ser recta o curva. Las líneas articulan planos.

-*Plano*: Elemento bidimensional. Los atributos a tener en cuenta son longitud, ancho, posición, orientación y forma.

-*Volumen*: Elemento tridimensional. Apariencia externa reconocible que se genera mediante la interrelación de puntos (vértices), líneas (bordes) y planos (superficies). Los atributos a tener en cuenta son longitud, ancho, profundidad, posición, orientación y forma.

Los puntos y las líneas más relevantes de la vista inferior de los carpóforos de los Agaricales se muestran en la figura 54. C corresponde al centro geométrico del himenio. PL_0 corresponde al punto inicial de la línea que representa el eje de simetría de la lámina y PL_F al punto final de la misma. $P1_0, P2_0, P3_0, \dots, Pn_0$ corresponden a los puntos iniciales de las líneas que representan los ejes de simetría de las laminillas, mientras que $P1_F, P2_F, P3_F, \dots, Pn_F$ corresponden a sus puntos finales.

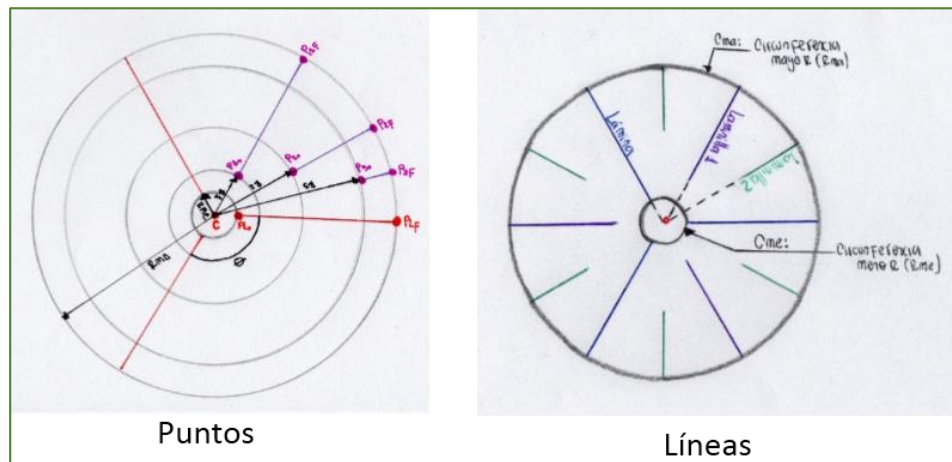


Figura 54. Síntesis geométrica: Puntos y líneas, vista inferior.

Fuente: Elaboración propia.

R_{Me} y R_{MA} , corresponden a los radios de la circunferencia menor (en donde comienzan las láminas) y de la circunferencia mayor (en donde terminan láminas y laminillas) respectivamente. $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ determinan la distancia, medida desde C, a la que se ubica el punto inicial de cada laminilla.

Al analizar el corte longitudinal de los carpóforos se concluye que el espesor inicial de las láminas y laminillas (arco Se) es aproximadamente igual al espacio entre éstas (arco Sd) y que esta separación se trata de conservar. Bajo esta regla, y considerando las proporciones encontradas al medir los carpóforos, se determina la ubicación de los puntos iniciales de cada laminilla en relación con R_{Me} y el ángulo Θ entre láminas. La figura 55 presenta las relaciones geométricas encontradas.

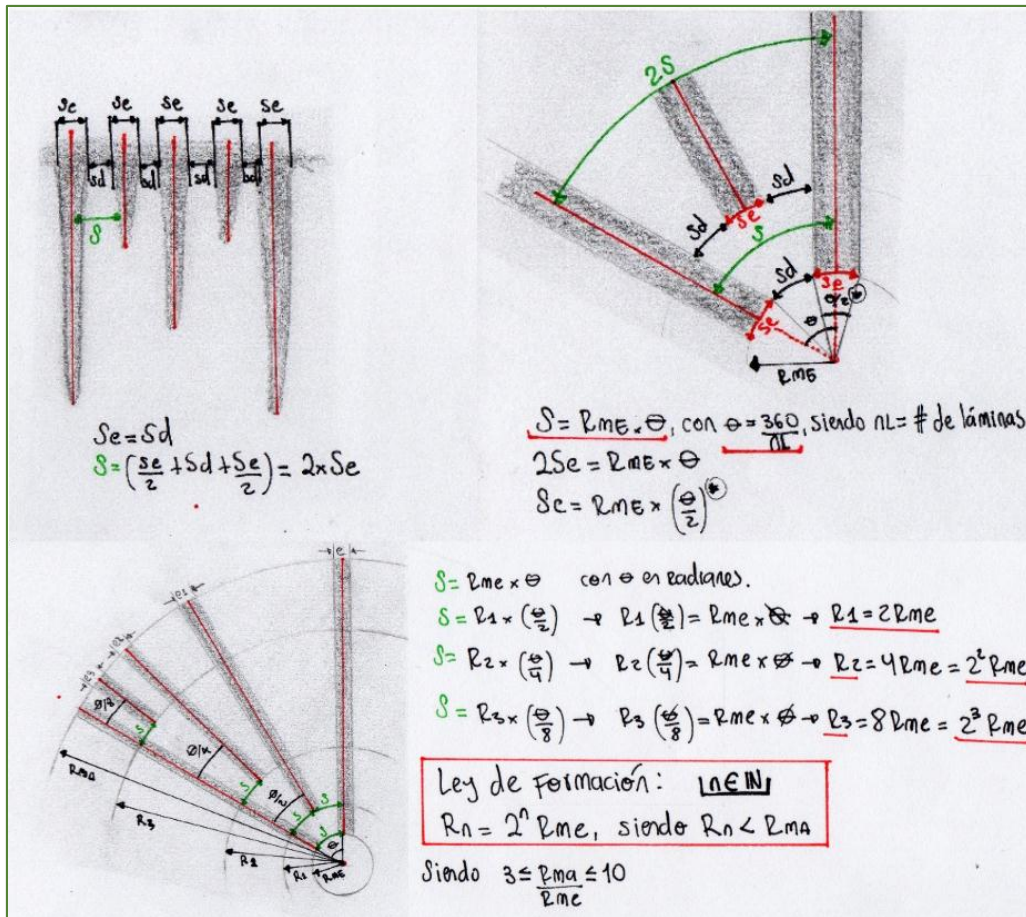


Figura 55. Síntesis geométrica: Ubicación de los puntos iniciales de las laminillas.

Fuente: Elaboración propia.

Como cada laminilla se ubica sobre la bisectriz del ángulo formado por las láminas o laminillas vecinas, se obtiene que la cantidad de laminillas en cada nivel n ($C_{L,n}$), está dada por la fórmula:

$$C_{L,n} = n_L \times 2^{(n-1)}, \text{ donde } n_L \text{ representa el número de láminas.} \quad (3)$$

Para encontrar la cantidad total de láminas y laminillas (C_{Total}), en función de n y n_L , se tiene la siguiente expresión:

$$C_{Total} = n_L + n_L \times 2^{(0)} + n_L \times 2^{(1)} + n_L \times 2^{(2)} + \dots + n_L \times 2^{(n-1)}$$

$$C_{Total} = n_L + n_L \times (2^{(0)} + 2^{(1)} + 2^{(2)} + \dots + 2^{(n-1)}) \quad (4)$$

Analizando la serie formada por las potencias de dos, se tiene:

$$2^{(0)} + 2^{(1)} + 2^{(2)} + \dots + 2^{(n-1)} = 2^{(n-1)+1} - 1 = 2^n - 1 \quad (5)$$

Por tanto,

$$C_{Total} = n_L + n_L \times (2^n - 1) = n_L \times 2^n$$

$$C_{Total} = n_L \times 2^n \quad (6)$$

El valor máximo n se determina calculando el exponente de la potencia de dos más cercana, e inferior, al cociente R_{MA}/R_{ME} .

Luego de ubicar las líneas que representan los ejes de simetría de las láminas y laminillas, se determina la separación e entre las paredes de las mismas, en relación con R_{ME} y el ángulo Θ entre láminas (ver figura 56). e hace referencia a la longitud de la cuerda correspondiente al arco Se .

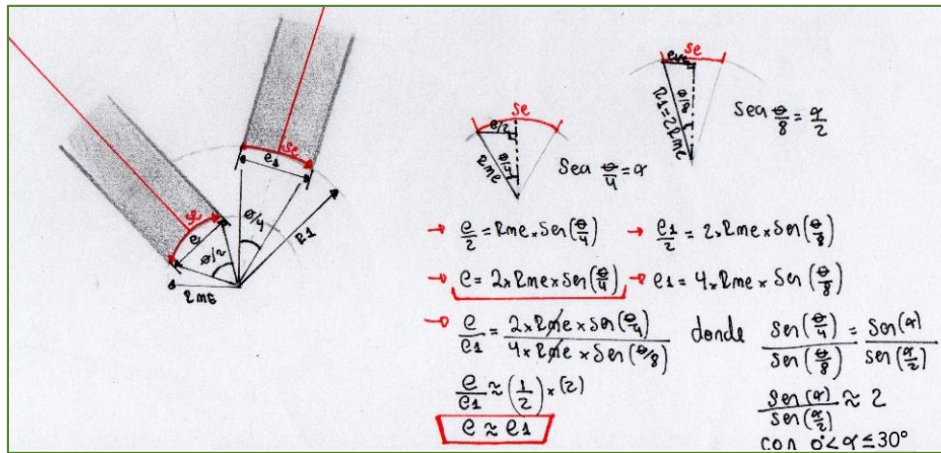


Figura 56. Síntesis geométrica: Separación e entre las paredes de las láminas y laminillas.

Fuente: Elaboración propia.

Aunque Se es igual para láminas y laminillas, la longitud de la cuerda e_n de cada laminilla no es exactamente igual a la de las demás, sin embargo es un valor muy aproximado por estar trabajando con ángulos pequeños. En el análisis se considera $0^\circ < \alpha \leq 30^\circ$ asumiendo un número mínimo de tres láminas (para $n_{L\text{mínimo}}=3$, $\Theta_{\text{máximo}}=120^\circ$ y $\alpha_{\text{máximo}}=30^\circ$), lo que es un caso poco usual. En los especímenes estudiados la cantidad de láminas varía entre 15 y 100, sin embargo, por cuestiones de escala (como se explica en el numeral 6.1, muchas láminas generan espesores muy pequeños e ineficientes en el cuerpo de la luminaria) y para facilitar el análisis y la posterior implementación del algoritmo, este rango se amplía.

La figura 57 presenta los elementos formales identificados al hacer un corte longitudinal por el centro del carpóforo, así como las relaciones entre ellos.

Las líneas y las superficies abstraídas tienen características especiales que se describen a continuación.

- *Superficie mínima:* Para definir el contorno de la superficie en donde se unen las láminas, se desarrolla una superficie mínima, que como se menciona en el numeral 1.1.5.3., tiene la propiedad de ser estructuralmente simple y ligera.

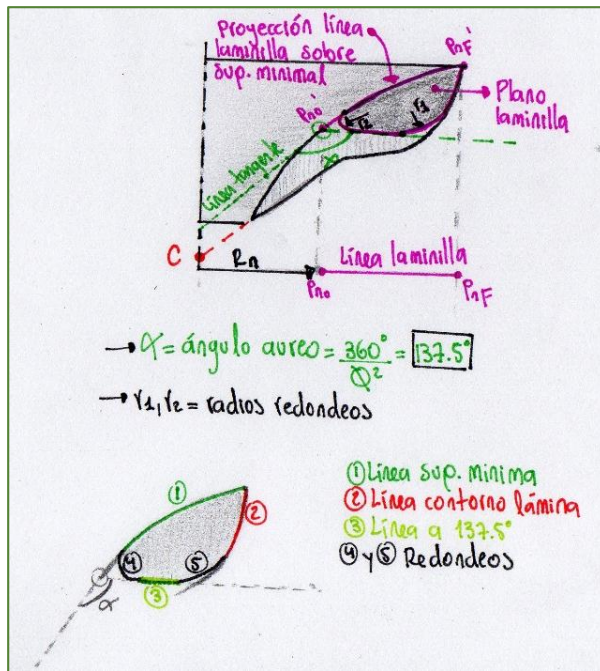


Figura 58. Síntesis geométrica: Elementos y sus relaciones para generar una laminilla.
Fuente: Elaboración propia.

5.5. LLUVIA DE IDEAS BIOINSPIRADAS.

A partir de la síntesis geométrica, se implementa un algoritmo usando Grasshopper®²⁵, basado en los procesos y patrones encontrados. La tabla 11 presenta y caracteriza los parámetros que son manipulados por el algoritmo para obtener el diseño del cuerpo de la luminaria.

El dominio de los valores que puede tomar cada parámetro se establece teniendo en cuenta las mediciones y proporciones realizadas al abstraer las estrategias biológicas, las especificaciones de producto presentadas en la tabla 5, así como condiciones de desempeño y de manufactura que deben cumplir los disipadores térmicos. En algunos casos, el dominio se establece mediante un proceso iterativo de ensayo y error.

Vale la pena aclarar que, dentro del algoritmo, el desarrollo de la superficie mínima se hace empleando un componente de Grasshopper® que genera la superficie luego de ingresarle las curvas de frontera y el valor de qué tan curvada se desea la superficie.

El algoritmo consiste principalmente en ubicar correctamente, respecto a un sistema de referencia establecido, los puntos extremos de las líneas que determinan la forma de las superficies requeridas, en trazar dichas líneas y posteriormente generar las superficies para aplicar operaciones booleanas, como la unión, la intersección y la sustracción y así obtener el volumen que determina la apariencia final de la luminaria. Todo lo anterior se hace teniendo en cuenta las relaciones geométricas descritas en el numeral anterior.

²⁵ Plugin de Rhinoceros 3D orientado al diseño paramétrico que funciona como un editor visual de algoritmos generativos.

Tabla 11. Parámetros del algoritmo generador del cuerpo de la luminaria.





	DESCRIPCIÓN	TIPO DE DATO	DOMINIO	REPRESENTACIÓN
PARÁMETROS GENERALES				
Rma (mm)	Radio mayor del cuerpo.	Entero	[25,200]	
Rma/Rme	Relación entre el radio mayor y el radio menor del cuerpo.	Real	[3,8]	
(2Rma)/h	Relación entre el diámetro mayor y la altura del cuerpo.	Booleano	0 (0°) 1 (0)	
nL	Número de láminas.	Entero	[3,25]	
Curvatura Minimal	Determina el grado de curvatura que se desea en la superficie.	Entero	[1,10]	
PARÁMETROS CONTORNO BÉZIER				
Pendiente Contorno	Ubicación, a lo largo de una línea de construcción sobre el eje de simetría del cuerpo, del punto (P_0) que define la dirección del vector que ubica el primer vértice de control (VC_1) de la curva de Bézier que define el contorno de la lámina.	Real	[0,1]	
AmpSupCont	Amplitud del vector que ubica el primer vértice de control (VC_1) respecto al punto inicial (P_0) de la curva. P_0 se encuentra sobre la circunferencia mayor del cuerpo.	Entero	[0,200]	
AmpInfCont	Amplitud del vector que ubica el segundo vértice de control (VC_2) respecto al punto final (P_F) de la curva. P_F se encuentra sobre la circunferencia menor del cuerpo.	Entero	[0,200]	
PARÁMETROS SUPERFICIE ÓPTICA				
Pendiente Óptica	Ubicación, a lo largo de una línea de construcción sobresobre el eje de simetría del cuerpo, del punto final (P_0) de la curva de Bézier que define la superficie óptica.	Real	[0,1]	
AmpSupOpt	Amplitud del vector que ubica el primer vértice de control (VC_1) respecto al punto inicial (P_0) de la curva.	Entero	[0,500]	
AmpInfOpt	Amplitud del vector que ubica el segundo vértice de control (VC_2) respecto al punto final (P_F) de la curva.	Entero	[0,500]	
Espesor Óptica (mm)	Altura a la que se encuentra la circunferencia que delimita la superficie óptica respecto a la circunferencia mayor del cuerpo.	Entero	[1,5]	
PARÁMETROS PIE				
LargoPieRedo (mm)	Separación, a lo largo del eje de simetría del cuerpo, entre el punto inicial (P_0) y el punto final (P_F) de la curva Bézier que define el contorno del pie. P_0 se encuentra sobre la circunferencia menor del cuerpo.	Entero	[0,100]	
LargoPiePlano	Proporción a la que se corta el pie redondo para aplanarlo.	Real	[0,1]	
AmpSupPie	Amplitud del vector que ubica el primer vértice de control (VC_1) respecto al punto inicial (P_0) de la curva.	Entero	[1,100]	
AmpInfPie	Amplitud del vector que ubica el segundo vértice de control (VC_2) respecto al punto final (P_F) de la curva.	Entero	[0,100]	
Tipo de Pie	Determina el tipo de pie que se desea.	Booleano	0 (Redondo) 1 (Plano)	

Fuente: Elaboración propia.

Al variar controladamente los parámetros y sus relaciones se generan varias propuestas. La tabla 12 presenta los valores asignados a cada parámetro para generar las cuatro alternativas que mejor representan las morfologías identificadas en los carpóforos maduros de los Agaricales. Estas alternativas se evalúan, se corporifican y se detallan en las siguientes fases del proyecto.

El nombre que se le da a cada opción, AGA, es la abreviatura de Agarical, nombre dado a la luminaria en honor al referente que la inspiró.

Tabla 12. Valores de los parámetro para generar las cuatro alternativas iniciales.

ALTERNATIVAS	AGA 1	AGA 2	AGA 3	AGA 4
	 $C_{Total} = 40$	 $C_{Total} = 24$	 $C_{Total} = 30$	 $C_{Total} = 40$
PARÁMETROS GENERALES				
Rma (mm)	75	75	75	75
Rma/Rme	7	7	3,7	3,7
(2Rma)/h	0	1	1	0
nl	10	6	15	20
Curvatura Minimal	8	8	2	3
PARÁMETROS CONTORNO BÉZIER				
Pendiente Contorno	0,4	0,4	0,7	0,7
AmpSupCont	30	30	60	60
AmpInfCont	20	20	10	10
PARÁMETROS SUPERFICIE ÓPTICA				
Pendiente Óptica	0,4	0,6	0,8	0,9
AmpSupOpt	60	60	55	60
AmpInfOpt	30	50	30	50
Espesor Óptica (mm)	3	3	3	3
PARÁMETROS PIE				
LargoPieRedo (mm)	5	15	10	5
LargoPiePlano	0,7	0,7	0,3	0,3
AmpSupPie	3	4	5	3
AmpInfPie	10	5	10	10
Tipo de Pie	1	0	1	0

Fuente: Elaboración propia.

6. CORPORIFICACIÓN

Según Mentor Graphics Corporation (2011), la simulación térmica está desempeñando un papel cada vez más importante al momento de evaluar alternativas de diseño, diagnosticar problemas e iterar hasta llegar a una solución óptima desde el punto de vista térmico, previo a la fase de prototipo. Esto se debe en parte a que las pruebas físicas son costosas y consumen mucho tiempo, pero son muy eficaces para validar el diseño final e identificar problemas de fabricación y materiales. Adicionalmente se necesita hardware de medición sofisticado capaz de medir en detalle el cambio de temperatura del dispositivo físico.

Teniendo en cuenta lo anterior, para emular el proceso de convección natural, proceso que inspiró el proceso de diseño, se hace uso de ANSYS Workbench 17²⁶. Mediante la simulación térmica y el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) se evalúan las alternativas generadas, se implementan mejoras y se determina las propiedades de la mejor alternativa. El análisis térmico se complementa con el análisis fotométrico, para el cual se utiliza Photopia^{TM27} y DIALux²⁸.

A continuación se presentan los análisis realizados para concretizar la solución y sus resultados. Dichos análisis no se hacen en una secuencia lineal, es un proceso iterativo y circular, en donde los resultados de cada análisis retroalimentan los resultados de los demás, lo que permite ir evaluando progresivamente el diseño, a fin de optimizarlo. En el proceso se hace necesaria la selección de algunos componentes internos y de algunos materiales.

6.1. ANÁLISIS TÉRMICO DE ESTADO ESTABLE.

Con este análisis se busca determinar el flujo de calor en el cuerpo de la luminaria al aplicar una carga de 11W en el área donde va el led, considerando el fenómeno de convección natural y asumiendo que el flujo no cambia con el tiempo.

Esta simulación actúa bajo la Ley de enfriamiento de Newton, expresada en la Ecuación 2. Los valores asignados a cada parámetro de la ecuación se describen a continuación.

La carga de 11W se debe a que, inicialmente, se selecciona un led de esta potencia para generar los lúmenes establecidos en las especificaciones de la tabla 5 (ver ficha técnica del led en el Anexo D1). Se asume que toda la potencia eléctrica se convierte en calor, es decir $P = \frac{dQ}{dt}$, como condición extrema. Así mismo se establece una temperatura ambiente $T_{inf} = T_a = 29^{\circ}C$, asumiendo un entorno caluroso.

Para la simulación se selecciona, de la biblioteca de materiales de ANSYS, aleación de aluminio como material para la pieza, teniendo en cuenta que el proceso de manufactura más adecuado a nivel local para la fabricación de la misma sería el de inyección.

A la pieza se le asigna como coeficiente de transferencia de calor por convección un valor $h=5W/m^2C$ (las unidades de h se dan en W/m^2K , pero al ser una medida diferencial, $1W/m^2K =$

²⁶ Software de simulación para análisis de elementos finitos y dinámica de fluidos computacional (CFD).

²⁷ Software de diseño óptico de Iltioptics.









²⁸ Software para calcular y visualizar la luz en proyectos de iluminación de DIAL.

1W/m²C), valor típico para placas verticales en un flujo de aire con una diferencia de temperatura de 30°C, bajo convección natural²⁹.

En las pruebas T_s corresponde a T_d (temperatura en la superficie del disipador).

La tabla 13 presenta los datos obtenidos al correr la simulación para diferentes alternativas.

Tabla 13. Resultados del análisis térmico de estado estable.

DATOS		P (W)	11							
		Ta (°C)	29							
		h (W/m ² C)	5							
	ITEM	Ts teórica (°C)	Tsmax (°C)	Tsmin (°C)	Área disipadora (cm ²)	masa (g)	Uniformidad (°C) (Tsmax-Tsmin)	ΔT (°C) (Tsmax-Ta)	Rth (°C/W) ΔT/P	masa/Área (g/cm ²)
ALTERNATIVAS INICIALES	 AGA1	75,1	76,9	75,2	477,57	316,52	1,7	47,90	4,35	0,66
	 AGA 2	74,6	76,3	74	482,22	332,35	2,3	47,30	4,30	0,69
	 AGA3	69,0	70,3	68,7	549,65	519,91	1,6	41,30	3,75	0,95
	 AGA4	70,6	72,7	70,5	528,75	320,07	2,2	43,70	3,97	0,61
ALTERNATIVAS MODIFICADAS	 AGA2_ED	70,6	73,4	70	528,8	228,19	3,4	44,40	4,04	0,43
	 AGA2_ED_L1_3e	69,7	71,8	69,3	540,21	297,22	2,5	42,80	3,89	0,55
	 AGA2_ED_L1_2e	70,2	72,4	69,6	534,16	259,62	2,8	43,40	3,95	0,49
	 AGA2_ED_L2	66,3	68,5	65,7	589,5	247,92	2,8	39,50	3,59	0,42

Fuente: Elaboración propia.

El análisis comienza evaluando el desempeño térmico de las cuatro alternativas iniciales. Para determinar cuál de las opciones es la más eficiente se consideran varios parámetros, siendo el más importante la resistencia térmica (R_{th}), seguido por la relación masa/área disipadora (A_s) y la uniformidad.

La resistencia térmica (ver Ecuación 7) de un sistema representa su capacidad para oponerse al flujo de calor, especificando el aumento de temperatura de la fuente de calor en función de la potencia disipada.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} \quad (7)$$

²⁹ Dato obtenido de

https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm

El flujo de calor en una luminaria led (ver figura 24) se puede comparar al flujo de corriente en un circuito eléctrico en donde la resistencia térmica del interior del led (R_{jc}), la del TIM³⁰ (R_{TIM}) y la del disipador térmico (R_{da}) se encuentran conectadas en serie como se muestra en la figura 59. R_{ja} representa la resistencia térmica del sistema, siendo $R_{ja}=R_{jc}+R_{TIM}+R_{da}$.

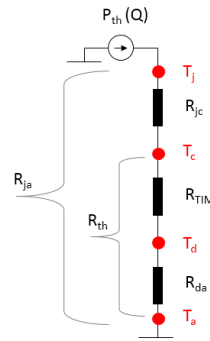


Figura 59. Resistencias térmicas de una luminaria led.

Fuente: Elaboración propia.

Para garantizar el buen desempeño de un led, la temperatura crítica a medir es la temperatura de la unión o juntura (T_j), pero la inaccesibilidad de tal punto hace que sólo se pueda controlar la medición de la temperatura T_c , la cual tiene una relación directa con T_j . Es por esto que, en la mayoría de los casos, los fabricantes de ledes especifican el valor T_c máximo permitido, no el T_j . El valor T_c máximo dado, viene relativo al valor R_{jc} del led, por lo que al hacer los cálculos para encontrar la resistencia del disipador térmico, R_{jc} no se considera.

Teniendo en cuenta lo anterior, para este análisis, la resistencia térmica a evaluar es $R_{th}= R_{TIM} +R_{da}$. Es importante emplear TIM de buena calidad y aplicarlo correctamente (capas muy delgadas) para obtener un valor R_{TIM} bajo (entre $0,1 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ y $0,2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ según MechaTronix (s.f)). Por ser R_{TIM} tan pequeño se asume $R_{th}= R_{da}$, por lo tanto $T_c=T_d=T_s$. Más adelante, al finalizar el análisis térmico, se considera el valor de R_{TIM} para calcular el valor real de T_c .

Entre menor sea el valor de R_{th} , mayor será la capacidad del cuerpo de la luminaria para disipar el calor generado por el led. Es por esto que el objetivo principal de los análisis térmicos desarrollados es minimizar el valor de R_{th} . Para esto se lleva a cabo el siguiente análisis.

Simplificando la Ecuación 2 se obtiene $Q = hA_S\Delta T$. Al despejar queda la igualdad $\frac{\Delta T}{Q} = \frac{1}{hA_S}$.

Teniendo en cuenta la Ecuación 7, por transitividad resulta la Ecuación 8, la cual relaciona R_{th} con h y A_S . Según esta ecuación, se puede reducir R_{th} aumentando el valor de h o de A_S .

$$R_{th} = \frac{1}{hA_S} \quad (8)$$

En el análisis térmico de estado estable, h es una constante. Se busca entonces incrementar el valor de A_S para reducir la resistencia térmica del cuerpo de la luminaria. Para incrementar este valor de forma controlada y eficiente, se busca minimizar la relación masa/ A_S , emulando la eficiencia de los

³⁰Material de interfaz térmica (TIM por sus siglas en inglés). Son materiales que aumentan el rendimiento de la transferencia de calor entre un chip electrónico y un disipador térmico, reemplazando al aire presente en la zona de unión debido a la rugosidad de la superficie de ambos componentes. Al llenar los espacios de aire a nivel micro entre las 2 superficies, disminuye entre 1°C y 3°C el valor de T_c .

sistemas naturales que logran maximizar áreas y volúmenes empleando el mínimo material. Minimizar material permite obtener una luminaria más ligera, así como reducir costos de producción.

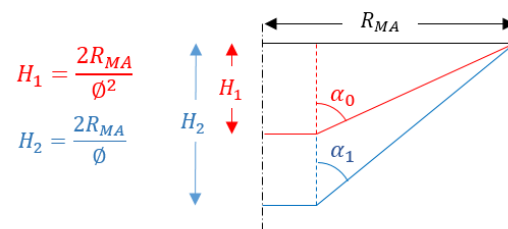
El valor $T_{s_teórica}$ es calculado aplicando la Ecuación 2 para determinar la temperatura a la que llega la superficie del cuerpo. Este valor se encuentra muy próximo al valor T_{smin} , obtenido al correr la simulación, sin embargo, poco dice del comportamiento del flujo de calor en el cuerpo. La ventaja de correr la simulación y obtener los valores T_{smax} y T_{smin} es poder determinar la uniformidad, es decir, que tan homogénea es la distribución de energía térmica sobre el cuerpo. Entre menor sea el valor de esta variable, más homogénea es la distribución. Este parámetro permite identificar zonas de concentración de calor. El valor T_{smax} se considera el valor de T_c , por ser la temperatura de la superficie en contacto directo con el led.

Según los resultados de la tabla 13 todas las alternativas alcanzan un valor T_{smax} inferior al T_{cmax} recomendado por el proveedor del led ($T_{cmax} = 85^\circ$). Esto significa que las alternativas propuestas cumplen con los requisitos de disipación térmica, sin embargo, se procede a evaluarlas para identificar problemas e iterar hasta llegar a una solución más eficiente.

Las alternativas que más calor disipan, es decir, con menor R_{th} , son AGA3 y AGA4. En estas alternativas la proporción R_{MA}/R_{ME} es menor que en AGA1 y AGA2, generando un área superficial mayor. Sin embargo, no son las alternativas más eficientes.

Aunque AGA3 es la alternativa con mayor área, además de ser la más uniforme, su relación masa/ A_S es muy alta. Su masa es aproximadamente 60% mayor que la masa de las demás alternativas, cuyo valor es muy similar.

La desventaja de AGA4, así como de AGA1, es su ángulo de apertura α . Entre mayor sea la proporción $2R_{MA}/H$, mayor es el valor de α , por lo tanto la superficie disipadora se aproxima a un plano horizontal (ver figura 60). Simons (2001), propone una fórmula simplificada para estimar h en placas, tanto verticales como horizontales y muestra como varía el valor de h para una misma placa según su posición, siendo h inferior en las placas horizontales, respecto a la verticales, considerando el comportamiento dinámico del aire alrededor del cuerpo. El tener un ángulo de apertura mayor que AGA2 y AGA3, también disminuye el desempeño fotométrico de AGA1 y AGA4 (numeral 6.3).



$$H_1 < H_2 \Rightarrow \alpha_0 > \alpha_1$$

Si $\alpha \rightarrow 180^\circ$, la superficie disipadora se aproxima a un plano horizontal, reduciendo el valor de h .

Figura 60. Relación entre el ángulo de apertura del cuerpo y el valor de h .
Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que AGA1 es una de las alternativas que más aletas tiene ($C_{Total_AGA1}^{31} = 40$), su área superficial no es la mayor. Esto demuestra que, más que aumentar el número de aletas para aumentar el valor de A_S , es necesario diseñar acertadamente el contorno de las superficies que las general.

Tener muchas aletas puede afectar el desempeño del disipador. Según MechaTronix (s.f), cuando hay muchas aletas y el espacio entre ellas es muy reducido, el aire entre las aletas llega casi a la misma temperatura a la que se encuentra el disipador, por lo que ΔT decrece, afectando el valor de h , a tal punto que si $\Delta T \rightarrow 0$, no se disipa más calor.

Cuando, por tener muchas aletas, se disminuye considerablemente el espesor de las mismas, la energía térmica experimenta cierta resistencia para fluir por el cuerpo. Además, es muy importante que el cambio de espesor no sea brusco para garantizar una buena conducción térmica.

Aunque AGA2 no resultó ser la opción más eficiente en este análisis, si lo fue en el análisis fotométrico del numeral 6.3. Además, tiene la ventaja de tener una buena relación masa/ A_S . Para mejorar su rendimiento térmico, se busca modificar su geometría, excepto la superficie óptica para conservar sus buenas propiedades.

Lo que se hace es intentar comprender aquellos aspectos formales de AGA3 que le permitieron tener el mejor valor R_{th} . La figura 61 presenta la distribución de temperatura en ambas alternativas.

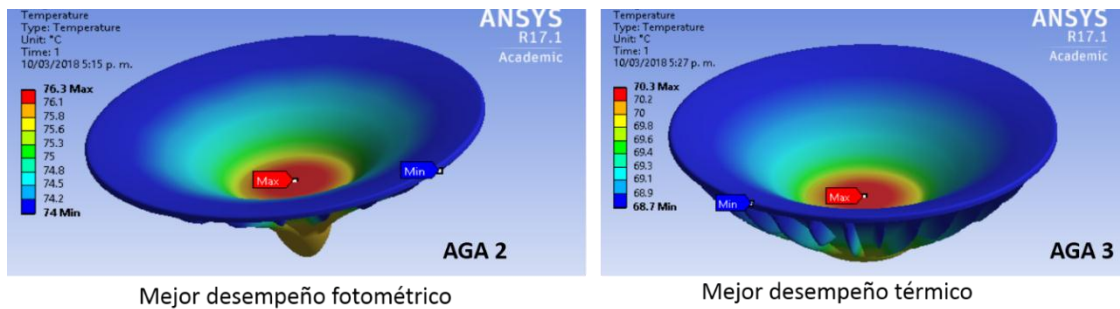


Figura 61. Distribución de temperatura en AGA2 y AGA3
Fuente: Elaboración propia.

Lo primero que se hace es eliminar el volumen de la parte inferior de AGA2, el cual tenía el propósito de aumentar el espesor del núcleo central³² del cuerpo, teniendo en cuenta que esto mejora la conducción térmica. Sin embargo, como a este volumen no llegan aletas, la disipación del calor por convección en esta zona no es buena.

La segunda modificación consiste en incrementar el número de aletas de AGA2. Como la cantidad de aletas de AGA3 es $C_{Total_AGA3} = 30$, se incrementa la cantidad de láminas de AGA2 a 8, para un total de 32 aletas. Como la relación R_{MA}/R_{ME} es diferente en AGA2 y en AGA3, el valor n que representa el nivel máximo de laminillas también es diferente, siendo $n_{AGA2}=2$ y $n_{AGA3}=1$. Si se tiene en cuenta la Ecuación 6, y la condición de que $n_L \in \mathbb{N}$, no es posible que la cantidad de aletas de AGA2 sea exactamente 30.

³¹ El número de aletas corresponde a la cantidad total de láminas y laminillas (C_{Total}).

³² El núcleo central, o de unión, hace referencia a la zona del disipador que está en contacto con la fuente de calor y a la cual se unen las aletas.

La tercera y última modificación consiste en disminuir el valor del espesor entre la superficie óptica y la superficie que contiene las aletas (correspondiente al parámetro *espesor óptica*), para así disminuir la masa del cuerpo.

La alternativa resultante recibe el nombre de AGA2_ED. Según los resultados presentados en la tabla 13, se observa que estas modificaciones logran reducir significativamente la masa de la pieza, además de aumentar el área disipadora. Esto permite obtener mejores resultados para R_{th} y para la relación masa/ A_S . Sin embargo, AGA3 sigue teniendo mejor R_{th} .

El hecho de eliminar el volumen inferior hizo que se concentrará más calor en la zona cerca al led, afectando la uniformidad. Al ser R_{MA} mayor en AGA3 se cuenta con más material cerca al led que, a su vez, está en contacto con aletas, favoreciendo así los procesos de conducción y convección. Con el fin de mejorar la uniformidad, aumentando la cantidad de material cerca al núcleo central del disipador, se rediseña el contorno de las aletas. El nuevo contorno aumenta el área superficial de éstas, especialmente en la zona más cerca al led.

Como se aumenta el área superficial de cada aleta, se busca reducir masa disminuyendo el número de aletas. Es por esto que en las alternativas AGA2_ED_L1_3e y AGA2_ED_L1_2e el valor de n_L se reduce de nuevo a 6 láminas, para un total de 24 aletas. La diferencia entre estas alternativas es que el valor del parámetro *espesor óptica* es 3mm en AGA2_ED_L1_3e y 2mm en AGA2_ED_L1_2e. Esta diferencia se establece con el propósito de identificar los efectos que este parámetro tiene en la disipación térmica.

El valor obtenido para R_{th} es muy similar en ambas alternativas, además inferior al valor R_{th} de AGA2_ED, pero mayor al valor R_{th} de AGA3. La uniformidad también mejora respecto a AGA2_ED, pero no con respecto a AGA3.

Se observa que la alternativa con mayor espesor obtuvo una mejor uniformidad. Al analizar las alternativas que obtuvieron la mejor uniformidad en el análisis inicial (AGA3 y AGA1), se observa que tienen una capa más gruesa de material entre la superficie óptica y la superficie que contiene las aletas, debido al diseño de las mismas. Se concluye entonces que entre más material haya entre estas dos superficies, mejor se da el fenómeno de conducción térmica, lo que se traduce en una distribución más uniforme de la temperatura. El costo que tiene aumentar el espesor de esta capa, es que aumenta la relación masa/ A_S .

Para lograr un valor R_{th} inferior al de AGA3, se decide incrementar el número de aletas de AGA2_ED_L1_2e a 32 aletas, haciendo $n_L=8$. Se conserva el valor de 2mm para el parámetro *espesor óptica* teniendo en cuenta que se le da prioridad a la relación masa/ A_S , además de que la diferencia en la uniformidad entre AGA2_ED_L1_3e y AGA2_ED_L1_2e no es significativa.





Este cambio da como resultado la alternativa más eficiente, AGA2_ED_L2, con un valor de R_{th} y con una la relación masa/ A_S mucho menor que AGA3. La uniformidad es el parámetro que se sacrifica por optimizar los otros dos.

Aunque al aumentar n_L se podría mejorar el valor R_{th} , se decide dejarlo en 8, para conservar el espesor inicial de las aletas alrededor de los 4mm. Valores inferiores generarían cambios bruscos de espesor, afectando el proceso de conducción térmica. Además, al correr la simulación para valores de n_L por encima de 10, se complica el mallado, por quedar un espesor muy pequeño en la parte final de las aletas.

En la síntesis geométrica del numeral 5.4 se establece que la cantidad de láminas de los carpóforos estudiados varía entre 15 y 100. Sin embargo, teniendo en cuenta la escala y las dimensiones de las alternativas propuestas, esta cantidad generaría espesores muy pequeños e ineficientes. Por lo anterior se trabaja con valores inferiores a 15.

La tabla 14 presenta el valor asignado a los parámetros del algoritmo para generar las alternativas analizadas. Los valores en rojo representan los valores que se modificaron de AGA2.

Tabla 14. Valores de los parámetro para generar las alternativas modificadas.

	AGA 2_ED	AGA 2_ED_L1_3e	AGA 2_ED_L1_2e	AGA 2_ED_L2
ALTERNATIVAS MODIFICADAS				
PARÁMETROS GENERALES				
Rma (mm)	75	75	75	75
Rma/Rme	7	7	7	7
(2Rma)/h	1	1	1	1
nL	8	6	6	8
Curvatura Minimal	8	8	8	8
PARÁMETROS CONTORNO BÉZIER				
Pendiente Contorno	0,4	0,9	0,9	0,9
AmpSupCont	30	60	60	60
AmpInCont	20	30	30	30
PARÁMETROS SUPERFICIE ÓPTICA				
Pendiente Óptica	0,6	0,6	0,6	0,6
AmpSupOpt	60	60	60	60
AmpInOpt	50	50	50	50
Espesor Óptica (mm)	2	3	2	2
PARÁMETROS PIE				
LargoPieRedo (mm)	5	5	5	5
LargoPiePlano	0,3	0,3	0,3	0,3
AmpSupPie	3	3	3	3
AmpInPie	5	5	5	5
Tipo de Pie	0	1	1	1

Fuente: Elaboración propia.

6.2. ANÁLISIS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Del análisis anterior se obtienen AGA2_ED_L2 como la más eficiente de las alternativas evaluadas, por ser la de mayor área superficial y por su buena relación masa/ A_S . De ahora en adelante se llamará AGA_EFI.

El análisis CFD busca determinar el valor real h de AGA_EFI, teniendo en cuenta que en el análisis anterior se empleó un valor teórico, aproximando la superficie disipadora del cuerpo a una placa vertical. Así mismo se analiza cómo cambia el valor de h para las diferentes arquitecturas propuestas en la figura 35 y se itera hasta encontrar el mayor valor, pues teniendo en cuenta la Ecuación 8, entre mayor sea el valor de h , menor es la resistencia térmica del cuerpo de la luminaria.

Es importante entender que el coeficiente de transferencia de calor por convención, h , cuantifica la influencia de múltiples parámetros relacionados con el flujo del fluido a través del cual se da la convección, por lo que el cálculo analítico presenta muchas dificultades. Es por esto que se emplea el simulador ANSYS CFX para, además de calcular el valor de h , visualizar el comportamiento, en el tiempo, del aire que rodea al cuerpo de la luminaria al momento de calentarse. Este simulador trabaja con las ecuaciones de Navier-Stokes combinadas con transferencia de calor. Para el desarrollo y el análisis de las pruebas se contó con la ayuda del Grupo de Investigación Ingeniería de Diseño (GRID), de la Universidad EAFIT.

Para el análisis, se prueba el cuerpo de la luminaria en un túnel aerodinámico como el de la figura 62. El tamaño del túnel está pensado para evitar forzar la dirección en la que fluye el aire.

Teniendo en cuenta la simetría radial del cuerpo, la simulación se realiza sólo con un cuarto del mismo, para disminuir el tiempo que toma correr la simulación. Por lo anterior, debe definirse dentro de las propiedades de las paredes que representan el corte a 90° una transferencia de calor adiabática. Las demás paredes son abiertas. La pared inferior y la circular permiten la entrada de aire del exterior (a 29°C), en caso de que el sistema lo requiera; el aire, al calentarse debido al proceso de convección, sale por la pared superior.

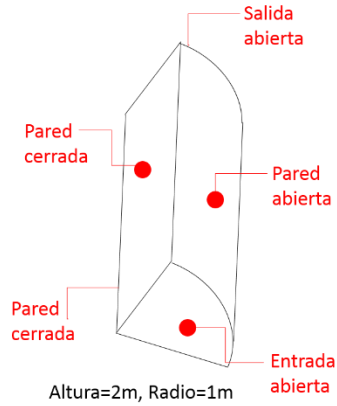


Figura 62. Túnel aerodinámico del análisis CFD.
Fuente: Elaboración propia.

A las paredes del cuerpo que disipan el calor se les asigna una temperatura fija de 75°C. Este valor corresponde al valor más alto de $T_{s_teórica}$ de la tabla 13. Se trabaja con este valor para poder correr el análisis CFD con todas las alternativas bajo las mismas condiciones, en caso de necesitar hacer este análisis con otra de ellas.

Para definir el flujo que circula por el túnel se usa, de la biblioteca de materiales de ANSYS, las propiedades del aire a 25°.

Inicialmente se establece un tiempo de simulación de 10s. Luego de analizar el valor de h cada segundo, se concluye que el sistema se estabiliza alrededor de los 4s (ver figura 63). Por esto, para las últimas pruebas, se establece un tiempo de simulación de 5s.

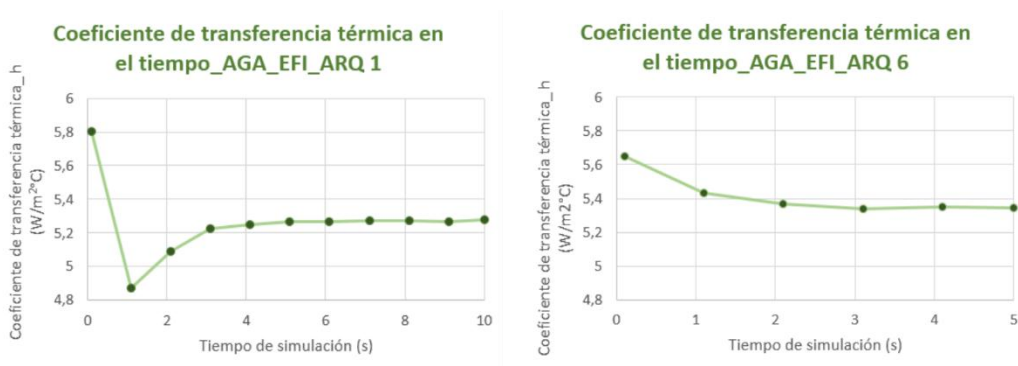


Figura 63. Coeficiente de transferencia térmica en el tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

La caracterización de todas las superficies, tanto del cuerpo de la luminaria como del túnel, la definición de la malla, los detalles del dominio de la simulación y los parámetros del análisis se presentan en el Anexo E.

La tabla 15 presenta los datos obtenidos al correr la simulación para diferentes arquitecturas. La figura 64 presenta la temperatura del aire a lo largo del túnel, y la figura 65 presenta la trayectoria de las partículas de aire y su velocidad.

Tabla 15. Resultados del análisis CFD.

ANÁLISIS CFD						
DATOS	T_r (°C)	75				
	T_a (°C)	29				
	A_r (m ²)	0,05895				
ARQUITECTURA	ARQ_1	ARQ_2	ARQ_3	ARQ_4	ARQ_5	ARQ_6
	INDIRECTA, SIN PANTALLA	INDIRECTA, PANTALLA A 150mm	INDIRECTA, PANTALLA A 240mm	INDIRECTA, PANTALLA INVERTIDA A 240mm	DIRECTA, SIN DIFUSOR	DIRECTA, CON DIFUSOR
h (W/m ² ·C)	5,276	2,855	3,095	3,368	5,643	5,344
$Q_{teórico}$ (W) $Q = h * A_r * (T_r - T_a)$	14,308	7,743	8,394	9,133	15,301	14,493
$R_{th, teórico}$ (°C/W) $R_{th} = \frac{(T_r - T_a)}{Q}$	3,215	5,941	5,480	5,036	3,006	3,174
ANÁLISIS TÉRMICO DE ESTADO ESTABLE (P=11W)						
T_{smax} (°C)	69,8	96,6	94,8	89,9	64,2	66,8
T_{smin} (°C)	62,7	94	87,7	82,8	61,6	64
$T_{s, teórica}$ (°C)	64,365	94,352	89,283	84,401	62,070	63,914
$T_{s, teórica}$ (°C) con $Q = 7,7W$ $Q = 0,7P$	53,755	74,746	71,198	67,781	52,149	53,440

Donde:
 h = Coeficiente de transferencia de calor por convección
 Q = Potencia térmica disipada
 R_{th} = Resistencia térmica del disipador

Fuente: Elaboración propia.

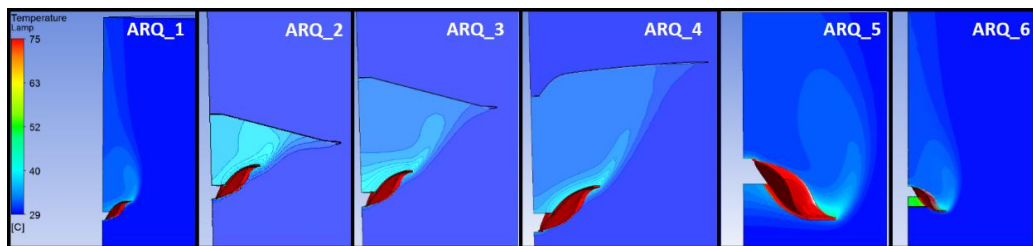


Figura 64. Temperatura del aire para cada arquitectura.

Fuente: Elaboración propia.

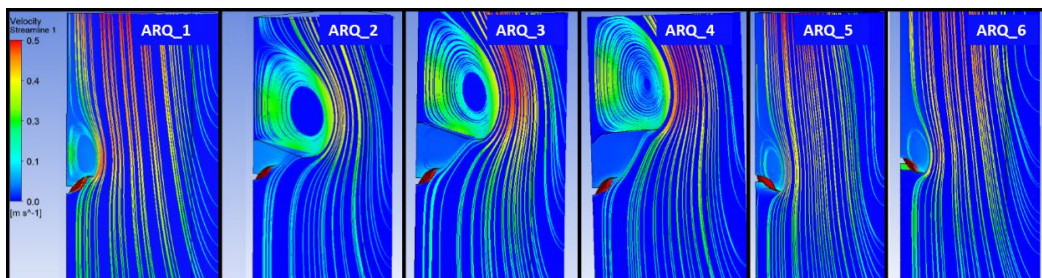


Figura 65. Trayectoria de las partículas de aire y su velocidad, para cada arquitectura.

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de la simulación, se obtiene el valor de h . Aplicando la Ley de Enfriamiento de Newton (Ecuación 2) se calcula el valor de la potencia térmica disipada por el cuerpo ($Q_{\text{teórico}}$), para luego calcular su resistencia térmica ($R_{\text{th_teórico}}$).

Se corre nuevamente el análisis térmico de estado estable para AGA_EFI, ingresando el valor obtenido de h . Esto se hace con el fin de determinar la temperatura que alcanza la superficie del cuerpo según la arquitectura del sistema, al aplicar la misma carga del análisis anterior ($P=11\text{W}$).

Recordar que la carga P corresponde a la potencia eléctrica del led seleccionado. En realidad, la potencia térmica a disipar corresponde al 70% de la potencia eléctrica, siendo $Q = 0,7P = 7,7\text{W}$. Por tanto, se calcula la temperatura real a la que llega el cuerpo ingresando la potencia térmica en la Ecuación 2.

De los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

Cuando se analizó la morfología de los especímenes adultos de los Agaricales (ver figura 52) se llegó a la hipótesis de que, a nivel macroscópico, la forma del carpóforo permitía guiar el flujo laminar del aire que sube por convección natural por la superficie donde están las esporas con baja resistencia aerodinámica, además determinando la dirección de salida del flujo.

Bajo esa hipótesis, en un comienzo se pensó que al ubicar las aletas en la parte inferior del cuerpo de la luminaria su comportamiento aerodinámico iba a mejorar. Sin embargo, al analizar los resultados de ARQ_1, se concluye que esta orientación hace que la superficie óptica sea la que realmente disipa el calor, puesto que el flujo sube por el fenómeno de conducción térmica.

Al invertirla (ARQ_5) se obtiene un mejor valor de h , ya que en esta posición el flujo de calor que sale del led si se dirige hacia las aletas.

En este caso, lo que funciona para arrastrar las esporas, no funciona para arrastrar las partículas de aire caliente, teniendo en cuenta que las esporas al ser expulsada adquieren una velocidad inicial hacia abajo, mientras que las partículas de aire caliente se desplazan hacia arriba (ver figura 66). Sin embargo, al invertir el cuerpo, la geometría de la superficie disipadora ayuda a redirigir de forma más suave el flujo turbulento que se genera en la parte superior (ver figura 65).

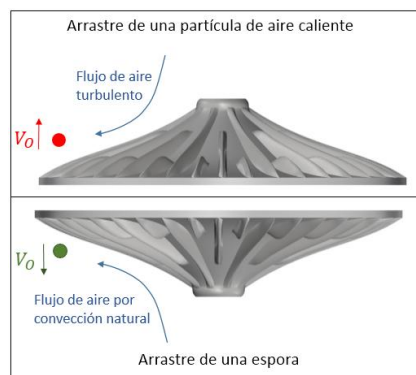


Figura 66. Arrastre de una espora comparado con el arrastre de una partícula de aire caliente.

Fuente: Elaboración propia.

Otra de las ventajas de invertir el cuerpo es la siguiente. Como el calor es disipado a través de la superficie óptica en ARQ_1, el flujo fluye hacia la periferia del cuerpo, por tanto en la parte central superior queda aire frío, cuya densidad es más alta que la del aire caliente que lo circunda. Esto

resulta en un aumento neto de la presión en el área central. Las partículas de aire se desplazan de áreas de mayor a menor presión, razón por la cual se genera el flujo turbulento de la figura 65. En ARQ_5 la parte central queda a mayor temperatura que en ARQ_1, ya que el calor es disipado por este espacio a través de las aletas y del núcleo central. Al ser menor la diferencia de temperaturas entre el área central y la periferia, menor es la diferencia de presión, por tanto, las partículas se mueven con menor velocidad generando menos turbulencia. La figura 67 esquematiza la situación.

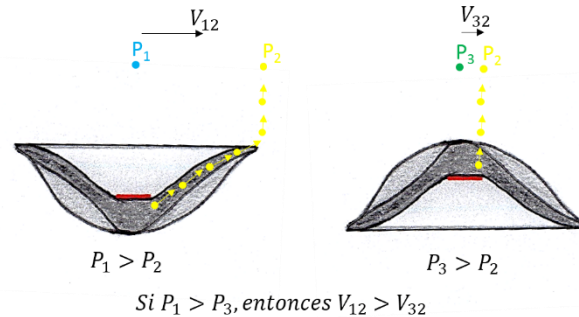


Figura 67. Velocidad de las partículas de aire debido a cambios de presión.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 64 se observa que, tanto para ARQ_1 como para ARQ_5, el aire más caliente se concentra en la zona más alejada del led, lo que favorece el enfriamiento del mismo.

Como en ambas opciones el coeficiente de transferencia térmica h aumenta respecto al coeficiente de una placa vertical, el valor R_{th} disminuye en comparación con el valor obtenido en la prueba térmica de estado estable. Aunque ARQ_5 presenta mejores resultados, la diferencia no es significativa. Se puede apreciar cómo, al disipar la potencia térmica $Q=7.7W$, la diferencia entre las temperaturas que alcanzan las superficies de los cuerpos es aproximadamente $1,5^{\circ}C$.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura sobre la superficie del cuerpo corresponde a la temperatura T_c del led. Los fabricantes de ledes sugieren que dicha temperatura debe estar entre un 20% -30% por debajo del valor T_c máximo recomendado. Para estas arquitecturas dicho valor es aproximadamente 35% inferior, lo que se traduce a un buen rendimiento térmico.

Estas arquitecturas son las más simples por no contar con ópticas secundarias o pantallas. ARQ_1 genera luz indirecta. Al carecer de pantalla, la luz es reflejada por el techo o las paredes circundantes, por lo que sería adecuada para iluminación ambiental, pero no para zonas de trabajo. A pesar de que ARQ_5 genera luz directa, no sería buena opción para zonas de trabajo. Como el haz de luz que sale directamente de un led tiene una distribución focal, esta arquitectura sería adecuada para aplicaciones de luz puntual, en donde se necesite concentrar una gran intensidad de luz en un espacio reducido. En zonas de trabajo es necesario tener una distribución de luz más volumétrica y uniforme para evitar molestias debidas al cambio brusco de iluminación. Otra desventaja es la posibilidad de tener contacto visual directo con el led, lo que genera deslumbramiento.

Las configuraciones de ARQ_2, ARQ_3 y ARQ_4 incorporan una pantalla en la parte superior del cuerpo, con el fin de direccionar los rayos de luz de forma eficiente hacia la zona de trabajo. El interés en estas configuraciones está en que la posición del cuerpo permite visualizar más fácil las láminas y laminillas, generando una estética diferenciadora y un juego de sombras y brillos que podría ser interesante, además de que evita el contacto visual directo con el led.

En el análisis fotométrico del numeral 6.3 se describe el proceso para diseñar la pantalla y para determinar la altura a la que debe ubicarse para obtener una iluminación eficiente en la zona de

trabajo. ARQ_2 corresponde a la configuración con mejor desempeño fotométrico, por tener la pantalla más cerca al led. Sin embargo, la posición de la pantalla obstaculiza la circulación del aire caliente; al éste no fluir se eleva considerablemente la temperatura del cuerpo de la luminaria.

En ARQ_3 la pantalla se encuentra a una distancia mayor del led, lo que disminuye su desempeño fotométrico. Aunque el desempeño térmico mejora, la diferencia no es muy significativa.

ARQ_4 propone una pantalla diferente. Aunque esta pantalla no es eficiente desde el punto de vista fotométrico, ya que el ángulo de apertura evitaría que muchos de los rayos de luz sean dirigidos a la zona de trabajo, se corre el análisis CFD para evaluar la posibilidad de que esta configuración facilite la salida del aire caliente. Efectivamente el desempeño térmico mejora respecto a las dos alternativas anteriores, sin embargo, la luminaria sigue siendo poco eficiente.

En la parte superior de la pantalla se genera un flujo turbulento similar para todas las configuraciones, y mayor que en ARQ_1 y ARQ_5 (ver figura 65). Este flujo se debe a que, dentro de la simulación, a las superficies de las pantallas se les asigna una transferencia de calor adiabática, lo que hace que el aire de la parte superior se encuentre a temperatura ambiente, mucho más frío que el aire del área central de las demás arquitecturas. Esto resulta en una diferencia de presión mayor la cual genera mayor turbulencia.

Al iterar en búsqueda de una pantalla que optimice tanto el flujo de calor como el flujo de luz, se concluye que los cambios en la morfología orientados a mejorar los aspectos lumínicos, afectan los aspectos térmicos y viceversa. Esto se debe a que ambos flujos tienen direcciones opuestas, mientras que el aire caliente sube, la luz debe ser direccionada hacia abajo.

Al calcular la temperatura real (con $Q=7.7W$) a la que llega la superficie del cuerpo, y por lo tanto el T_c , se concluye que todas las configuraciones llegan a un valor seguro, por estar por debajo de $85^{\circ}C$. Si se trabaja con un led que genere una potencia térmica mayor, éste puede verse afectado.

Con el fin de cubrir el led para evitar el deslumbramiento y lograr luz volumétrica, ARQ_6 cuenta con un difusor óptico. En el numeral 6.3 se describe el análisis realizado para determinar la ubicación más conveniente del difusor.

La figura 68 muestra cómo varía la temperatura del aire a través del tiempo de simulación. El aire que se calienta por estar en contacto con la superficie óptica que queda por encima del difusor, no tiene salida, lo que disminuye el desempeño térmico del cuerpo.

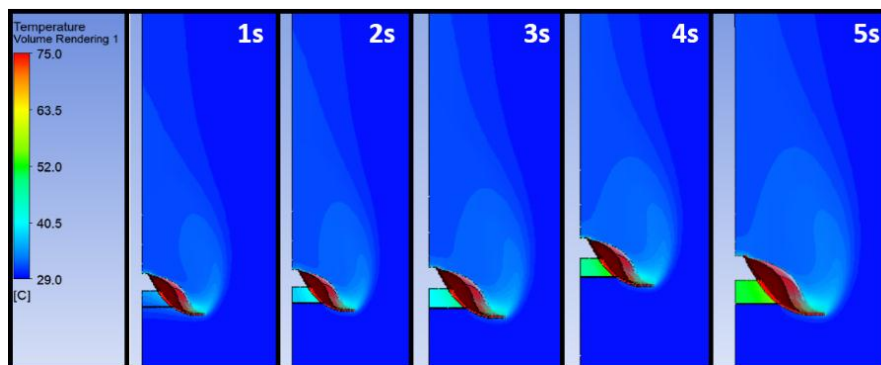


Figura 68. Velocidad de las partículas de aire debido a cambios de presión.

Fuente: Elaboración propia.

Aunque el valor de la temperatura del aire se incremente en esta zona, la temperatura sobre la superficie del cuerpo no se ve tan afectada como en el caso de tener una pantalla, pues el calor concentrado en la zona central puede fluir hacia arriba y ser disipado por las aletas. Por el contrario, la pantalla obstaculiza, casi en su totalidad, la circulación del flujo.


Aunque el desempeño térmico de ARQ_6 disminuye respecto a ARQ_5, no es muy significativa la diferencia, incluso, es un poco mejor que el desempeño de ARQ_1. Se concluye entonces que lo más conveniente para obtener un desempeño térmico eficiente es tener las aletas hacia arriba.

ARQ_6 representa la configuración que mejor desempeño tiene considerando el flujo térmico y lumínico, por lo tanto se selecciona como la arquitectura de la luminaria a desarrollar.

Teniendo en cuenta que la resistencia térmica del cuerpo para ARQ_6 es $R_{th} = 3.174 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, aplicando la Ecuación 7, se tiene que la potencia térmica máxima que el cuerpo puede disipar (asumiendo $T_s = T_c = 85^\circ\text{C}$) a 29°C es $Q = 17.63\text{W}$. De esta forma, bajo esta arquitectura, la luminaria puede trabajar con ledes de hasta 25W de potencia eléctrica, considerando que $Q = 0.7P$.

Para obtener un flujo luminoso mayor que el entregado por el led inicial ($\phi = 1500\text{lm}$), se decide trabajar con un led de mayor potencia, dado que la resistencia térmica del cuerpo lo permite. Se selecciona un led puntual de 16W (ver ficha técnica en el Anexo D2), trabajando al 87% de su capacidad ($P = 14\text{W}$) con el fin de generar un flujo luminoso de 2000lm. La tabla 16 presenta los datos técnicos del módulo led seleccionado para la luminaria.

Tabla 16. Datos técnicos del módulo led de la luminaria.

 <p>Conector Φ 40mm</p> <p>Tc Measurement Point</p>	Fabricante COB	Lextar	
	Fabricante Conector	BJB	
	Tipo de led	Media Potencia	
	ICR	Ra	>80
	TCC	K	4000
	P	W	16
	I_f	mA	450
	Eficacia típica con Tc=85°C	lm/ W	147
	ϕ típico con Tc=85°C	lm/ W	2309
	V_f típico con Tc=85°C	V	34,8

Fuente: Elaboración propia.

Al trabajar con este módulo, la potencia térmica a disipar es $Q = 0.7 \times 14 = 9.8\text{W}$. Aplicando la Ecuación 7 se obtiene que la temperatura que alcanza el cuerpo al estar en un ambiente a 29°C es $T_s = 60.105^\circ\text{C}$ (29% menor que el valor T_c máximo).

La figura 69 presenta la distribución de la temperatura en el cuerpo luego de correr el análisis térmico de estado estable, ingresando la potencia térmica del módulo seleccionado, $Q = 9.8\text{W}$, y el coeficiente de transferencia térmica calculado para la configuración AGA_6, $h = 5.344\text{W/m}^2\text{C}$. En el diagrama los límites de la escala de temperatura representan la temperatura ambiente (azul) y el valor T_c máximo (rojo), con el fin de identificar en que zona queda la temperatura del cuerpo, así como su uniformidad.

Se puede observar que el cuerpo queda en una zona de temperatura intermedia. Una de las ventajas de obtener el valor $T_s = 60.105^\circ\text{C}$, es que el sistema por estar cerca de los 60°C , no se ve gravemente afectado por la transferencia de calor por radiación (VS Lighting Solutions, 2015).

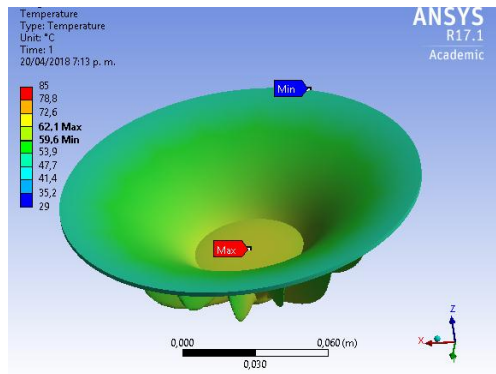


Figura 69. Distribución de la temperatura en el cuerpo de la luminaria a desarrollar.
Fuente: Elaboración propia.

Recordar que para simplificar el análisis se asumió $R_{th} = R_{da}$. El valor R_{th} calculado con las simulaciones corresponde a la resistencia térmica del disipador R_{da} . Si ahora se considera la resistencia térmica del TIM, $R_{th} = R_{TIM} + R_{da}$. Asumiendo $R_{TIM} = 0.2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, se tiene que la resistencia térmica del sistema es $R_{th} = (0.2 + 3.174) = 3.374 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. De esta forma $T_c > T_s$. Al aplicar la carga $Q = 9.8\text{W}$, $T_c = 62.065 \text{ } ^\circ\text{C}$, aproximadamente $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ mayor que T_s .

Por razones que se explican en el siguiente numeral, esta temperatura puede disminuir según el acabado superficial que se le dé al cuerpo.

6.3. ANÁLISIS FOTOMÉTRICO.

Con el fin de satisfacer los valores establecidos para las magnitudes fotométricas de las especificaciones de diseño de la tabla 5 y garantizar el desarrollo de una luminaria eficiente, se analiza el comportamiento del flujo de luz para cada una de las cuatro alternativas iniciales, haciendo uso de Photopia™.

Se realizan dos análisis, cada uno evalúa arquitecturas diferentes para la luminaria.

El primer análisis se realiza para la arquitectura propuesta en la figura 35, en donde el haz de luz emitido por el led es direccionado hacia arriba y posteriormente redirigido hacia la zona de trabajo por una pantalla, prescindiendo del difusor óptico (configuración (b)). Sin embargo, al realizar el análisis CFD de esta arquitectura (ver numeral 6.2), se concluye que esta orientación hace que la superficie óptica sea la que realmente disipa el calor, teniendo en cuenta que el flujo de calor sube por el fenómeno de conducción térmica. Además, el tener una pantalla en la parte superior del cuerpo dificulta la circulación de aire caliente, haciendo ineficiente la disipación térmica.

Para este análisis se trabaja con un led en forma de anillo (ver Anexo D1) que permite ensamblar el elemento central que conecta al cuerpo con la pantalla (ver montaje de la tabla 17). El diseño de la pantalla se hace de forma paramétrica e iterativa, variando sus dimensiones (H_p y α) hasta obtener la mejor eficiencia para una configuración con una altura inicial $H_L = (2R_{MA}) \times \Phi$. La figura 70 presenta las relaciones paramétricas entre las dimensiones de la luminaria bajo esta arquitectura y los valores que toman (en mm) teniendo en cuenta el valor establecido R_{MA} .

Siendo $R_{MA} = 75\text{mm}$, $H_L = 240\text{mm}$. Al correr la simulación con este valor para H_L se obtienen eficiencias inferiores al 80%, por lo que se analiza el sistema con $H_L = (2R_{MA}) = 150\text{mm}$. Disminuir H_L incrementa la eficiencia, logrando estar por encima del 80% en algunas de las alternativas, la

desventaja es que el cuerpo queda más escondido y cerca a la pantalla, lo que dificulta la circulación de aire caliente que sube por convección.

La tabla 17 presenta el valor asignado a las variables requeridas para correr la simulación, así como el montaje de la prueba. La tabla 18 presenta los resultados de la misma.

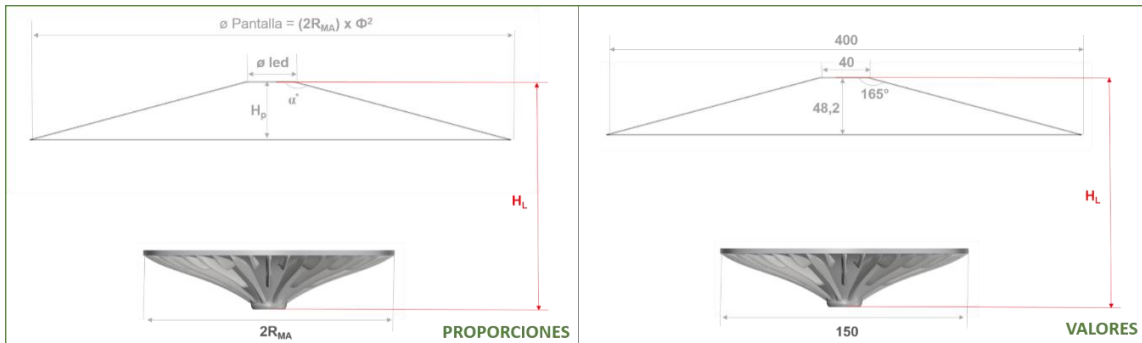


Figura 70. Relación paramétrica de las dimensiones de la luminaria con pantalla y sus valores.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Valores de las variables requeridas para el análisis fotométrico de la luminaria con pantalla.

Parámetros de entrada		
Pieza	Material	Reflectancia
Cuerpo	Pintura electrostática blanca brillante	83
Pantalla	Reflector blanco brillante	96
Optica del led		85
Características del led	11W_1500lm	
Cantidad de rayos iniciales	25000000	
Cantidad de reacciones de los rayos	25	
Montaje de la prueba		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Resultados del análisis fotométrico de la luminaria con pantalla.

ITEM	$H_L=240\text{mm}$			$H_L=150\text{mm}$		
	ϕ Luminaria (lm)	Eficiencia (ϕ Fuente/ ϕ Luminaria)	Eficacia (lm/w) (ϕ Luminaria/P)	ϕ Luminaria (lm)	Eficiencia (ϕ Fuente/ ϕ Luminaria)	Eficacia (lm/w) (ϕ Luminaria/P)
AGA 1	758	52,3%	69	1162	77,5%	106
AGA 2	943	62,9%	86	1275	85,0%	116
AGA 3	898	59,8%	82	1272	84,8%	116
AGA 4	748	49,9%	68	1074	71,6%	98

Fuente: Elaboración propia.

De este análisis se concluye lo siguiente:

Para el cuerpo y la pantalla es necesario seleccionar materiales con alta reflectancia³³, teniendo en cuenta que cuando se tiene iluminación indirecta las superficies en donde se refleja la luz deben tener reflectancias de por lo menos 80%.

Además de la alta reflectancia, otra ventaja de cubrir el cuerpo de la luminaria con pintura electrostática blanca es que incrementa el coeficiente de emisividad³⁴ de su superficie, lo que influye notablemente en el efecto de radiación, el cual contribuye al enfriamiento del led en la ausencia de corrientes de aire forzadas. Como se explicó anteriormente (numeral 3.3.1), el proceso de radiación se hace notorio cuando la superficie alcanza temperaturas por encima de los 60°C, por esto mismo en el desarrollo de las pruebas térmicas se busca que el cuerpo no llegue a temperaturas superiores a este valor, para controlar desde el diseño sólo los procesos de convección y conducción térmica. A pesar de esto, es importante considerar la emisividad de los materiales. Estas pruebas se hacen asumiendo que el material del cuerpo es aleación de aluminio sin ningún tratamiento, el cual es el peor de los casos, teniendo en cuenta que aunque el aluminio tiene buena emisividad, al corroerse este coeficiente disminuye por debajo de 0.5, siendo 1 el valor ideal. Al anodizar la superficie o al cubrirla con pintura con buenas propiedades de emisividad, este valor puede subir alrededor de 0.94 (MechaTronix, s.f). Según el Departamento de Innovación y Desarrollo de Luxycon, lo anterior se traduce en una disminución notable (entre 5°C y 20°C) en el Tc del led, siendo más efectiva la pintura electrostática blanca que el anodizado (casi 5°C por debajo).

Como se observa en la tabla 18, las alternativas más eficientes son AGA 2 y AGA 3. Lo que estas alternativas tienen en común es la relación $2R_{MA}/h = \phi$, proporción que les permite tener un cuerpo con mayor profundidad, logrando que los rayos de luz que salen del led (con ángulo de apertura de 120°) reboten en la superficie óptica y sean redirigidos a la pantalla. Como en AGA 1 y AGA 4 el cuerpo no es tan profundo, muchos de los rayos que salen del led no rebotan en la pantalla y se pierden (ver figura 71).

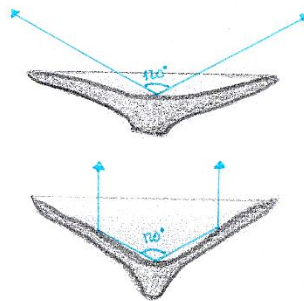


Figura 71. Trayectoria de los rayos de luz según la profundidad a la que se encuentra el led.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 72 muestra la trayectoria de los rayos de luz de AGA 2, la alternativa más eficiente, para cada valor de H_L . Se puede apreciar que cuando $H_L = 240\text{mm}$ muchos de los rayos de luz se pierden al dirigirse hacia arriba, por no rebotar en la pantalla. Esto se ve reflejado, no solo en una eficiencia más baja, comparado al caso en que $H_L = 150\text{mm}$, sino en menor intensidad luminosa (I) en la zona de trabajo, tal como se aprecia en la figura 73, la cual muestra las curvas fotométricas³⁵ de ambos casos.

³³ Mide la cantidad de luz reflejada por una superficie, se expresa en porcentaje.

³⁴ Indica la eficacia con que una superficie emite radiación térmica.

³⁵ Teniendo en cuenta la simetría de la luminaria, solo se muestra la mitad de la curva.

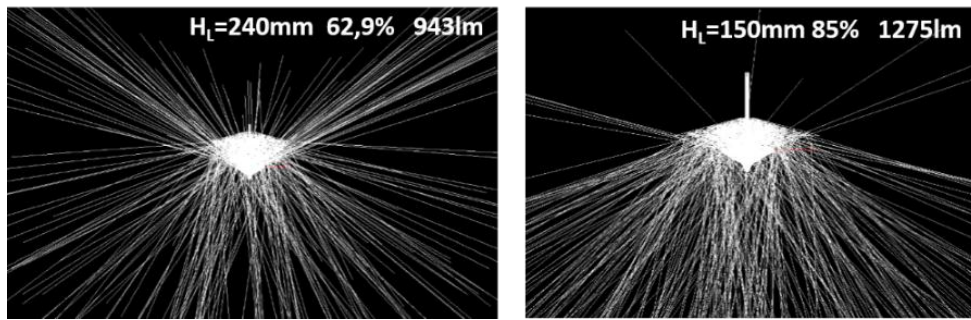


Figura 72. Distribución lumínica de AGA 2 para cada valor de H_L .
Fuente: Elaboración propia.

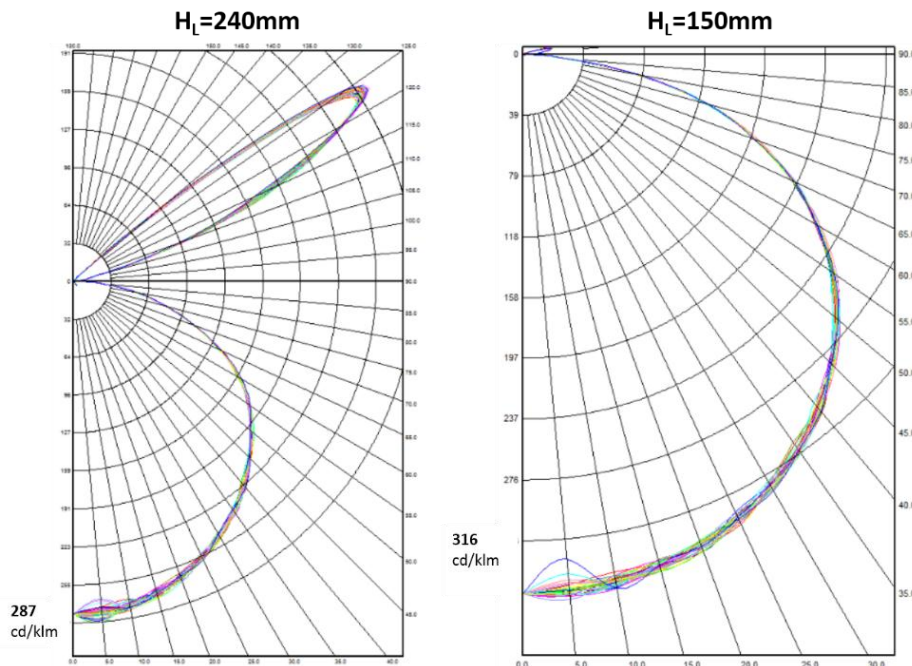


Figura 73. Curvas fotométricas de AGA 2 para cada valor de H_L .
Fuente: Elaboración propia.

Considerando que lo más conveniente es tener el haz de luz emitido por el led direccionado hacia abajo, directamente hacia la zona de trabajo, se hace necesario el uso de un difusor óptico, con el fin de generar un haz más ancho para iluminar un área mayor, así como para evitar el contacto visual directo con el led, disminuyendo el deslumbramiento.

Esta prueba busca determinar cuál de las configuraciones propuestas en la figura 35, para el caso en que el haz de luz es direccionado hacia abajo, es la más eficiente. Para esto se evalúa si lo más conveniente es tener el difusor en el extremo de la superficie óptica, cubriendo el interior de la luminaria (a); en una zona intermedia (b) o inmediatamente después del led (c).

La tabla 19 presenta el valor asignado a las variables requeridas para correr la simulación. La tabla 20 presenta los resultados de la misma.

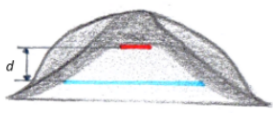
Tabla 19. Valores de las variables requeridas para el análisis fotométrico de la luminaria con difusor óptico.

Parámetros de entrada			
Pieza	Material	Reflectancia	Transmitancia
Cuerpo (AGA2_ED_L2)	Prueba 1: Aluminio anodizado claro	79	-
	Prueba 2: Pintura electrostática blanca brillante	83	-
Difusor óptico	Polycarbonato (PC) translúcido de 1mm de espesor	-	61
Optica del led		85	-
Características del led	14W_2000lm		
Cantidad de rayos iniciales	25000000		
Cantidad de reacciones de los rayos	25		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Resultados del análisis fotométrico de la luminaria con difusor.

DATOS DEL LED	P (W)	14
		ϕ Fuente (lm)

CONFIGURACIÓN	ACABADO	ϕ Luminaria (lm)	Eficiencia (ϕ Fuente / ϕ Luminaria)	Eficacia (lm/w) (ϕ Luminaria/P)	
	(a) d=12mm	Anodizado	1528	76,4%	109
	(b) d=20mm	Anodizado	1519	76,0%	109
		Pintado	1802	90,1%	129
	(c) d=28mm	Anodizado	1519	76,0%	109

Fuente: Elaboración propia.

De este análisis se concluye lo siguiente:

Al tener iluminación directa se puede considerar trabajar con materiales de menor reflectancia que en el caso de la iluminación indirecta. Es por esto que inicialmente se selecciona el aluminio anodizado como acabado para las superficies del cuerpo, teniendo en cuenta el valor semántico que éste puede tener para comunicar el hecho de que el cuerpo de la luminaria es también su disipador térmico. Además, los reflejos que se pueden generar cuando inciden rayos de luz del entorno sobre la superficie, es otro motivo por el cual se selecciona este acabado desde el punto de vista estético.

La fuente de luz empleada en esta simulación es el led puntual descrito en la tabla 16, trabajando al 87% de su capacidad ($P=14W$, $\phi=2000lm$).

El difusor óptico consiste en un disco de 1mm de espesor de policarbonato translúcido, considerando la buena resistencia al impacto y al calor de dicho material. El ser translúcido le da la propiedad de dejar pasar la luz pero sin dejar ver a través de él, además le permite generar luz difusa o volumétrica, la cual ayuda a la uniformidad.

Al analizar los resultados de las simulaciones para el cuerpo en aluminio anodizado, se observa que, al variar el valor de d , los valores de las variables fotométricas no se afectan notablemente. Aunque por un pequeño porcentaje la opción (a) resulta ser la más eficiente, no es la mejor opción, pues entre más cerca esté el difusor óptico del led, mayor deslumbramiento se genera afectando el confort visual. Por recomendación del Departamento de Innovación y Desarrollo de Luxycon, se selecciona la configuración (b) para la luminaria, teniendo en cuenta que la distancia d que ellos recomiendan para ubicar el difusor óptico es mínimo 20mm, y que, al estar el difusor en una zona

intermedia, parte de los rayos de luz que lo atraviesan inciden sobre la superficie óptica que queda expuesta, generando un efecto estético agradable.

Aunque para todas las configuraciones el valor de la eficacia está por encima del valor mínimo (100 lm/w) especificado en la tabla 5, el valor de la eficiencia, aunque está cerca, está por debajo del mínimo establecido (80%). Esto se debe en parte a que la reflectancia del aluminio anodizado no es lo suficiente alta, así como la transmitancia³⁶ del policarbonato translúcido.

Con el fin de incrementar la eficiencia se corre una segunda simulación para la configuración (b), cambiando el acabado del cuerpo de aluminio anodizado a pintura electrostática blanca, por su alta reflectancia. Como se observa en la tabla 20, este cambio mejora considerablemente el rendimiento fotométrico de la luminaria.

La figura 74 muestra la trayectoria de los rayos de luz en el cuerpo pintado. Se puede observar que son pocos los rayos que inciden sobre la superficie óptica expuesta, por lo que el papel que ésta juega en el direccionamiento del haz de luz no es relevante comparado con el de la superficie óptica interna, es decir, la que está entre el led y el difusor óptico.

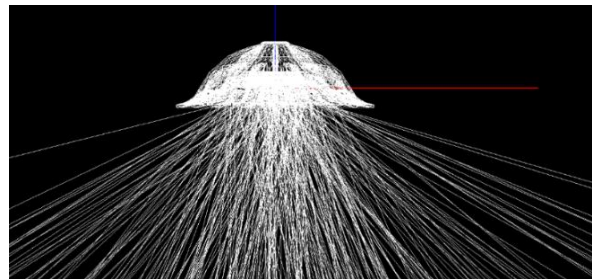


Figura 74. Distribución lumínica del cuerpo pintado.
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se decide conservar las superficies del cuerpo de la luminaria en aluminio anodizado, aprovechando los aspectos semánticos y estéticos ya descritos, pero pintando la sección de la superficie óptica interna con pintura electrostática blanca (ver figura 75). Esto permite aprovechar las propiedades reflectantes del material, minimizando la pérdida de energía lumínica en el interior del cuerpo. Además, el hecho de que la emisividad de la pintura sea mejor que la del aluminio anodizado, favorece el enfriamiento del led por radiación.



Figura 75. Acabados del cuerpo de la luminaria.
Fuente: Elaboración propia.

³⁶ Cantidad de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda.

La figura 76 presenta la curva fotométrica definitiva de la luminaria, es decir, con la superficie óptica pintada. Al compararla con las curvas fotométricas de la figura 73, se puede apreciar un incremento considerable (272 cd/klm) en la intensidad luminosa.

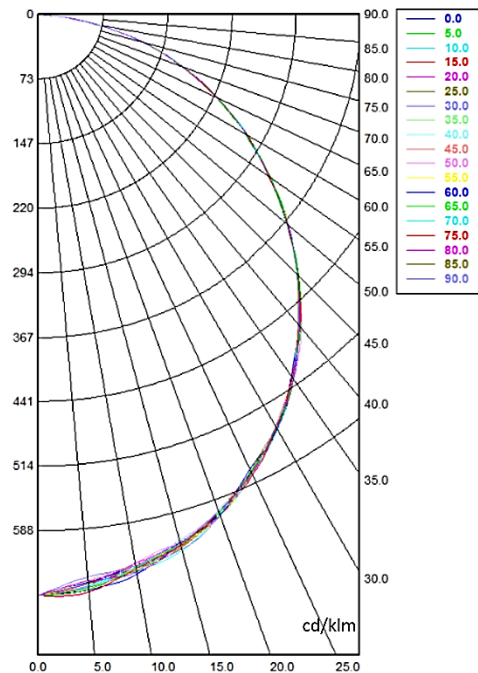


Figura 76. Curva fotométrica de la luminaria.

Fuente: Elaboración propia.

6.4. ANÁLISIS DE ILUMINACIÓN INTERIOR.

En todo proceso de diseño es importante considerar el contexto para el cual se diseña. Entender el entorno que rodea al producto orienta el proceso de toma de decisiones hacia un resultado exitoso. Como se explicó en el numeral 4.5, la luminaria a diseñar está pensada para alumbrado interior en lugares de trabajo general de la industria alimenticia, específicamente para restaurantes alta gama de cocina abierta.

Los niveles de iluminancia y de uniformidad requeridos para este tipo de contexto, así como el control del deslumbramiento, son requerimientos de diseño que dependen del entorno de la luminaria.

Con el fin de verificar si la luminaria cumple con los valores establecidos por la norma RETILAB para estos requerimientos, se realizan cálculos de iluminación interior para visualizar el comportamiento de la luz en un contexto virtual simulado, haciendo uso del software DIALux.

Con la ayuda del Departamento de Innovación y Desarrollo de Luxycon se simula un área de trabajo con las condiciones del contexto seleccionado (ver figura 77). Para esto se definen los parámetros del local, los cuales hacen referencia a las dimensiones geométricas de local, su forma específica (local redondo, cuadrado etc.), colores, texturas y reflectancias efectivas. El Anexo F presenta los valores asignados a estos parámetros y los reportes de las simulaciones.

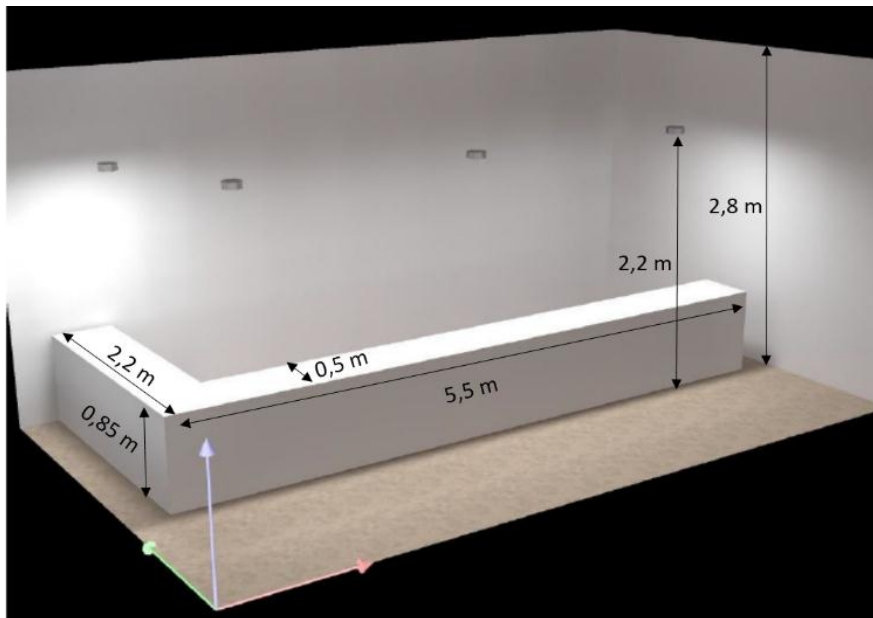


Figura 77. Área de trabajo simulada en DIALux.
Fuente: Elaboración propia.

Mediante un proceso iterativo se determina la cantidad de luminarias necesarias para cumplir con los valores establecidos, en la tabla 5, para los requerimientos. En el análisis se comparan los niveles de iluminación del local usando luminarias en aluminio anodizado y luminarias con pintura blanca. La figura 78 presenta los resultados de las simulaciones más relevantes del análisis. Estos resultados incluyen los niveles de iluminancia en la zona de trabajo, los valores de la iluminancia promedio (E_m), la mínima (E_{min}), la máxima (E_{max}), la uniformidad (E_{min} / E_m) y el índice UGR. Los puntos rojos representan las luminarias ubicadas en el local.

En las tres simulaciones se obtiene un índice UGR de 22, el cual es apropiado para la zona de trabajo por ser menor de 25. El valor de la uniformidad es muy similar en los tres casos; al ser mayor de 0,4 se garantiza que la zona de trabajo es iluminada de manera uniforme. En la primera simulación se muestra como, al ubicar cuatro luminarias en aluminio anodizado, se logra una iluminancia promedio de 259lx, valor que se encuentra dentro del rango establecido por la norma RETILAB (200lx-500lx), pero por debajo del valor objetivo (300lx). Con el fin de obtener este valor, se decide correr la simulación con cinco luminarias, logrando un valor de 320lx. Teniendo en cuenta que el análisis fotométrico del numeral 6.3 muestra que la luminaria pintada es más eficiente que la anodizada, se decide reemplazar las cuatro luminarias anodizadas de la primera simulación, por luminarias pintadas. Este cambio permite obtener una iluminancia de 305lx, valor que se encuentra por encima del valor objetivo, sin necesidad de aumentar el número de luminarias.

Según lo anterior, el aumentar la eficiencia de la luminaria permite obtener niveles deseados de iluminación con menos ejemplares, hecho que corrobora la decisión de pintar la superficie óptica interna de la luminaria.

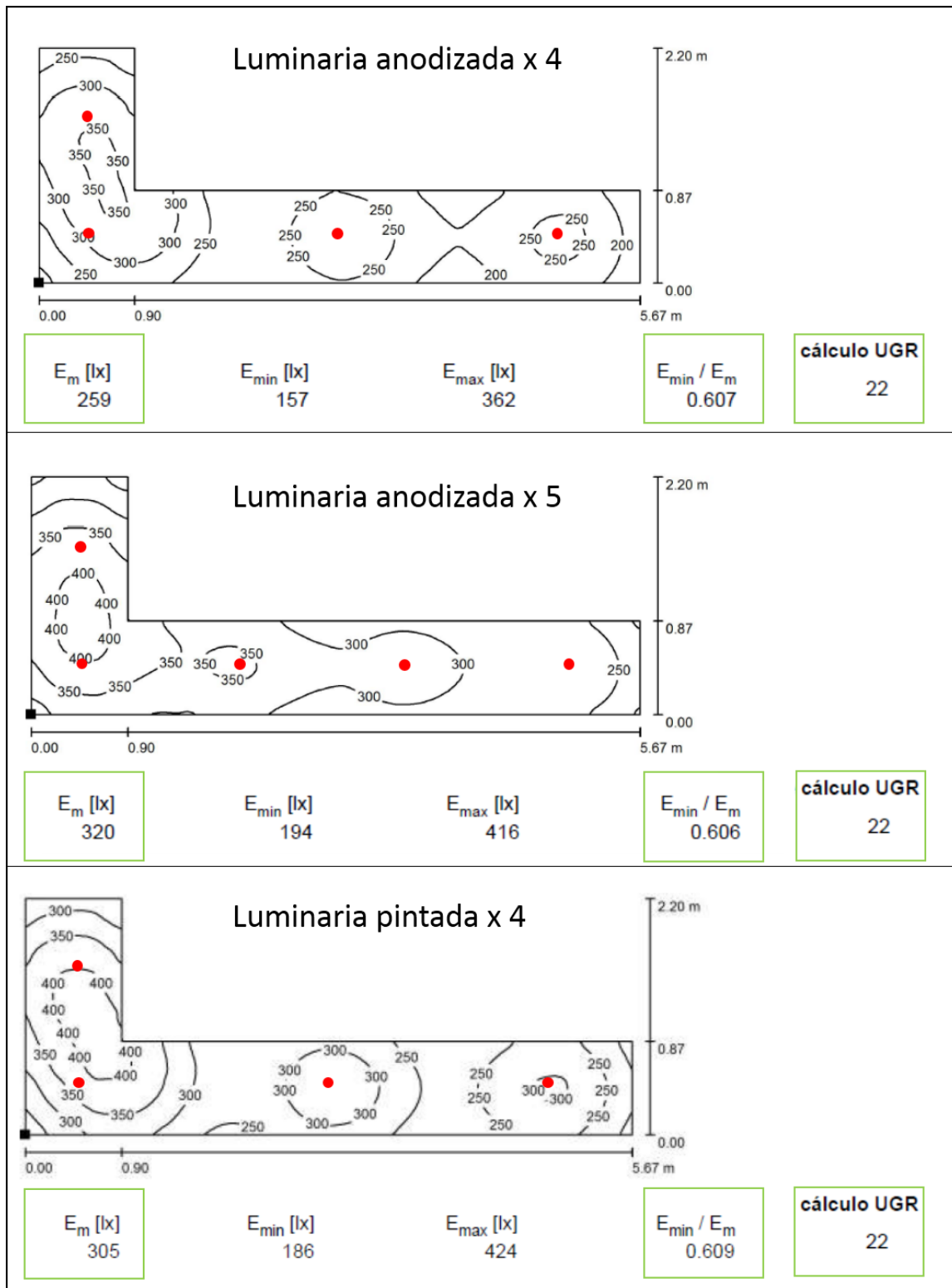


Figura 78. Resultados de los cálculos de iluminación interior
Fuente: Elaboración propia.

7. DISEÑO DE DETALLE

Del análisis anterior resulta AGA_EFI como la alternativa más eficiente, siendo la mejor arquitectura aquella que le permite generar luz directa y volumétrica, empleando un difusor óptico. Se concluye también que su eficiencia térmica y lumínica mejora al aplicarle un acabado anodizado al cuerpo, además de pintura electrostática blanca sobre la superficie óptica cubierta por el difusor. El acabado anodizado a su vez permite incrementar la resistencia a la corrosión y al desgaste.

En esta última fase se afina la alternativa desarrollada considerando el diseño para el ensamble. En el proceso se detallan las piezas y los ensambles de dos subsistemas, el de iluminación (ver figura 79) y el de suspensión (ver figura 80). También se exploran procesos de fabricación y más opciones de materiales para el cuerpo de la luminaria.



Figura 79. Vista en explosión y detalles del ensamble del subsistema de iluminación.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 80. Vista en explosión y detalles del ensamble del subsistema de suspensión.
Fuente: Elaboración propia.

7.1. DISEÑO DE DETALLE DE LOS COMPONENTES DE LA LUMINARIA.

La mayoría de los elementos de sujeción son piezas estándar, otros fueron diseñados exclusivamente para la luminaria (ver figura 81 y 82), con el fin de facilitar y asegurar el ensamble del cable sin sacrificar la estética del cuerpo.

Para eliminar el uso de los prisioneros estándar, cuya función es evitar que el cable se desprenda de la conexión eléctrica, se diseña una abrazadera en HT PLA³⁷. Esta abrazadera permite tener un diseño más limpio por quedar en el interior del cuerpo, además facilita el ensamble por entrar a presión.

La pared externa de la abrazadera tiene un ángulo de semiapertura de 3°, de tal forma que al introducirla al cuerpo en donde se ensambla, ésta se cierra apretando el cable con sus dientes (ver figura 81). Cuando el relieve de la superficie externa encaja con la muesca del cuerpo en donde ensambla, se asegura el ensamble (ver figura 82).

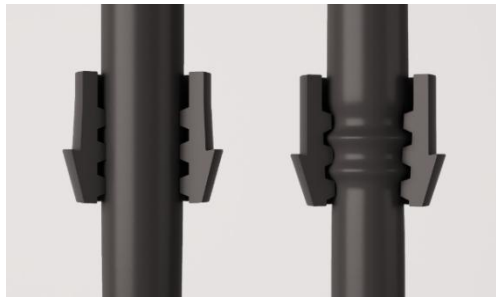


Figura 81. Vista en corte de la abrazadera, antes y después del ensamble.

Fuente: Elaboración propia.

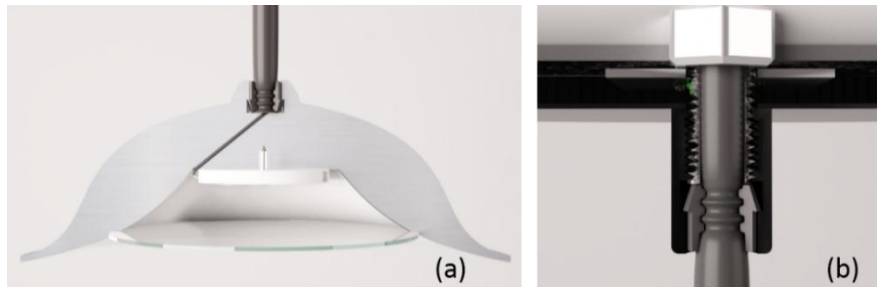


Figura 82. Vista en corte del ensamble de: (a) el cuerpo de la luminaria y (b) el buje de suspensión.

Fuente: Elaboración propia.

Al evaluar la luminaria desde el punto de vista sostenible se hace necesario ser eficiente en el uso de los recursos y cumplir con los objetivos propuestos en la tabla 4. Es por esto que se selecciona como material para la abrazadera el HT PLA, por ser un termoplástico biodegradable capaz de resistir altas temperaturas (hasta 150°C). Su proceso de fabricación sería por inyección.

La perforación diagonal de la figura 82a permite el paso de los dos hilos de cable eléctrico que suministran energía al led. Como esta perforación está ubicada en la zona de mayor temperatura, es importante que el cable tenga aislamiento termoestable cuya temperatura máxima de servicio

³⁷ Ácido poliláctico de Alta Temperatura.

es 90 °C. Por seguridad, se recomienda el uso de funda termoencogible sobre los cables, por tener una temperatura de operación de 125°C.

La figura 82b presenta la vista en corte del buje diseñado para el ensamble del cable y la abrazadera con el subsistema de suspensión.

Los otros elementos diseñados son el perfil de lámina y la carcasa del sistema de suspensión. Los procesos para fabricar el perfil son el punzonado y el doblado de metales. Para la carcasa se sugiere el repujado.

Se selecciona un controlador de corriente constante que permite ajustar su corriente de salida para obtener niveles deseados de iluminación. Dicho valor se conserva después de ser instalado. Permite además manipular la intensidad de la luz por medio de un atenuador. La referencia Philips Advance Xitanium 25W 0.1-0.7A 54V 0-10V INT (ver figura 83) se adapta a los requerimientos de la luminaria.



Figura 83. Controlador Philips Advance Xitanium 25W 0.1-0.7A 54V 0-10V INT
Fuente: www.usa.lighting.philips.com

7.2. PROCESOS DE PRODUCCIÓN Y MATERIALES DEL CUERPO DE LA LUMINARIA.

En un comienzo se pensó usar tecnologías de manufactura aditiva con metal, utilizadas para la fabricación de prototipos y producción a pequeña escala. Algunas de sus ventajas son la producción de piezas complejas (ver figura 84), alta flexibilidad geométrica, manufactura de ensambles en un solo paso, alta precisión, poco desperdicio de material, bajo volumen de producción, entre otras.

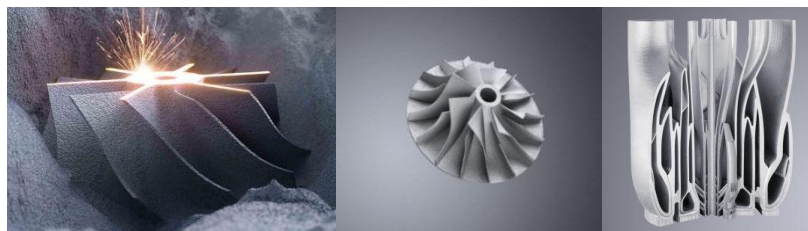


Figura 84. Piezas manufacturadas con impresión metálica en 3D
Fuente: www.trumpf.com

Como estas tecnologías permiten fabricar piezas directamente del modelo CAD³⁸, son la mejor opción para aquellos productos desarrollados a partir del diseño asistido por algoritmos, el cual permite la personalización de productos y variaciones formales en el tiempo.

La figura 85 muestra dos versiones de la luminaria ingresando diferentes valores de los parámetros al algoritmo. Esta tecnología da la posibilidad de fabricar ambas opciones en poco tiempo y sin la necesidad de moldes o procesos de mecanizado complejos.

³⁸ Diseño Asistido por Computador.



Figura 85. Render de las alternativas AGA2_ED y AGA_EFI
Fuente: Elaboración propia.

Además de las ventajas mencionadas, Ventola (2014) muestra como mejora el desempeño de los disipadores térmicos fabricados por sinterizado directo de metal por láser (DMLS), con respecto a los disipadores fabricados por las tecnologías de mecanizado convencionales. Según Ventola, la tecnología DMLS produce una rugosidad superficial en la microestructura del material que mejora el desempeño del disipador alrededor entre un 20% y un 50%.

Considerando las ventajas mencionadas y para cumplir con el requerimiento propuesto en la tabla 5 de tener bajos volúmenes de producción, se cotiza la fabricación de la pieza en impresión 3D de aluminio³⁹. El valor cotizado fue 1.788.00 dólares (alrededor de 5'300.000.00 pesos colombianos), valor que supera en gran medida el costo sugerido de la luminaria en la tabla 5. Además, la empresa encargada de realizar la impresión es extranjera, lo que demora el tiempo de producción.

Se descarta esta opción teniendo en cuenta su alto costo y el hecho de que estas tecnologías aún no están disponibles a nivel local. A continuación se describen otras opciones.

El mecanizado CNC⁴⁰ con tres ejes requiere de dos montajes, es costoso y se genera mucho desperdicio. La fundición por cera perdida o en moldes de arena, a pesar de no ser tan costosa, es un proceso muy artesanal que toma mucho tiempo, el acabado superficial no es el mejor y se pierde precisión. Comercialmente el más viable es el proceso de inyección, además de ser el más barato para producción en masa.

Los procesos que permiten bajos volúmenes de producción, o son costosos, o no ofrecen la precisión requerida para garantizar el buen comportamiento térmico del cuerpo de la luminaria. Por este motivo fue que se decidió hacer pruebas virtuales y no físicas para evaluar las alternativas en el numeral 6.

Aunque dentro de los requerimientos de la tabla 5 se especifica bajos volúmenes de producción para aprovechar la flexibilidad que ofrece el diseño asistido por algoritmos, si se quiere comercializar la luminaria a nivel local el mejor proceso es el de inyección, aunque toque pensar en producción en masa.

³⁹ Cotización realizada por C2R Engineering S.A.S

⁴⁰ Control Numérico Computacional.

Como ya se mencionó, para mejorar el desempeño lumínico de la luminaria, se decide cubrir la superficie óptica con pintura electrostática blanca. Este proceso incrementa el costo de fabricación del producto y por lo tanto su precio de venta. Sin embargo, como se demostró en el numeral 6.4, este acabado mejora la eficiencia de la luminaria, permitiendo reducir la cantidad de unidades requeridas para obtener los niveles de iluminación deseados para un espacio. El costo neto de un proyecto de iluminación en donde se requieran varias unidades puede verse favorecido por este acabado.

Aunque la conductividad térmica del cobre (385 W/mK) es mejor que la del aluminio (205W/mK), su reflectancia es mucho menor, lo que afecta sus propiedades ópticas. Además es un material mucho más costoso⁴¹. Por estos motivos se selecciona el aluminio como material para el cuerpo de la luminaria, específicamente la aleación Alsi12, considerando el proceso de inyección.

⁴¹ Kg de Cobre: 21.000.00 pesos colombianos. Kg de aluminio: 6.000.00 pesos colombianos.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. SOBRE EL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS

El resultado de este proyecto es Agarical, luminaria led diseñada a partir de geometrías paramétricas, inspiradas en las estrategias de los Agaricales para dispersar esporas. La morfología de estos especímenes facilita el flujo de aire para el arrastre de esporas, por lo que fue seleccionada para inspirar el diseño del cuerpo de la luminaria, que al ser el mismo disipador térmico, requiere optimizar el flujo de aire a su alrededor para evitar el sobrecalentamiento del led.

Las pruebas térmicas de estado estable y de dinámica de fluidos computacional demuestran que las formas obtenidas con el algoritmo implementado permiten que la temperatura que alcanza la superficie del cuerpo de la luminaria sea 30% inferior a la temperatura máxima permitida, lo que garantiza el buen comportamiento térmico del led.

Las pruebas fotométricas demuestran que la eficiencia lumínica de Agarical es casi 90%, valor que supera la eficiencia de la mayoría de las luminarias colgantes decorativas, lo que la hace apta para zonas de trabajo.

Al iterar para encontrar la opción más eficiente se logró obtener una pieza liviana y multifuncional, que protege los componentes internos, disipa el calor y a su vez funciona como reflector óptico. Esto, sumado al hecho de trabajar con tecnología led y emplear materiales reciclables, demuestra cómo la luminaria logra ser eficiente en el uso de los recursos.

Desde un comienzo se asumió que, al Agarical imitar las formas naturales, su estética iba a ser agradable. Sin embargo, se hizo un pequeño sondeo inicial con un prototipo físico del cuerpo a escala, impreso en PLA (ver figura 86), el cual mostró que la mayoría de las personas se sintieron atraídas por las formas del producto. Vale la pena aclarar que para validar la forma sería necesario realizar una encuesta con una muestra significativa.



Figura 86. Prototipo a escala del cuerpo de Agarical, impreso en PLA.
Fuente: Elaboración propia.

Todo lo anterior demuestra que Agarical satisface el objetivo principal de este proyecto, al ser un producto eficiente que logra un equilibrio entre lo estético, lo funcional y la economía de los recursos.

8.2. SOBRE LA METODOLOGÍA

Al inicio del proyecto, el reto más grande fue encontrar una metodología de diseño que diera igual de importancia a los aspectos formales y funcionales de un producto, y que a su vez, diera herramientas para entender las estrategias de la naturaleza e incorporarlas en el diseño humano.

La metodología diseñada para integrar el pensamiento biomimético con el proceso de la ingeniería de diseño de producto y de la formalización a partir de la búsqueda natural es uno de los resultados más relevantes de este proyecto. Seguirla paso a paso permitió hacer intersecciones importantes entre los aspectos funcionales y formales, tanto de los referentes estudiados, como del producto a diseñar.

Comprender la función que las formas más básicas tienen en la naturaleza desde el principio del proyecto, facilitó el análisis de estructuras más complejas y la comprensión de cómo las morfologías de los diferentes organismos están condicionadas por los efectos que el entorno ejerce sobre éstos.

Vale aclarar que al intentar comprender las estrategias biológicas de los carpóforos de las diferentes clases de hongos, el análisis de la forma macroscópica no fue suficiente. Indagar sobre los mecanismos para dispersar las esporas a nivel microscópico, permitió comprender las marcadas diferencias entre las morfologías macroscópicas de los diferentes especímenes.

Hacer trabajo de campo también fue crucial para comprender la función de las morfologías de los carpóforos. Observar los especímenes por varios días consecutivos dentro de su entorno permitió sacar conclusiones importantes sobre la forma en que éstos se adaptan a él. Este proceso de observación corroboró el hecho de que el entorno es el principal factor influyente en el proceso de selección natural de Darwin. Los organismos vivos determinan un entorno, pero a su vez, este entorno influye en la evolución de los organismos que lo habitan.

Esta misma relación recíproca aplica para el hombre y su cultura. El hombre diseña productos que suplen sus necesidades, a su vez, dichos productos determinan el clima cultural e intelectual de una sociedad. Es por esto que los diseñadores tienen un gran poder para influenciar la sociedad a la que pertenecen a través de los productos que diseñan y de la semántica implícita en ellos.

El entorno es un factor influyente a la hora de evaluar un buen diseño, no solo desde el punto de vista semántico, sino también pragmático. Definir el contexto de uso de la luminaria facilitó la toma de decisiones y la evaluación de la eficiencia de la misma.

Hubiera sido ideal poder evaluar la luminaria con un prototipo físico en un contexto real, pero considerando los altos costos de manufactura de las piezas diseñadas y la precisión que requieren debido a los fenómenos térmicos y ópticos involucrados, no fue posible desarrollar pruebas físicas.

Sin embargo, la simulación térmica y fotométrica fue una excelente opción para evaluar y afinar la luminaria. Estas simulaciones permitieron detectar problemas o aspectos indeseados en las alternativas. Su corrección y optimización se facilitó por tener la pieza diseñada a partir de geometrías paramétricas. Con sólo variar los valores de los parámetros del algoritmo, la forma de la pieza se modificaba hasta optimizar alguna condición. El proceso fue iterativo, manual e intuitivo.

Este tipo de análisis se puede beneficiar de la computación evolutiva, en la cual son los mismos algoritmos los que varían los valores de los parámetros hasta obtener un resultado satisfactorio.

Aunque la simulación térmica permite llegar a una buena solución, no sustituye, sino que complementa los ensayos físicos y la experimentación. Las pruebas físicas se hacen necesarias para determinar y consolidar el diseño final de la solución, identificando problemas de producción, ensambles y materiales. También se recomiendan para evaluar el desempeño de la luminaria en ambientes menos controlados que aquellos de la simulación, en donde se pueda verificar cómo influye el proceso de radiación térmica, así como los flujos de aire paralelos al plano transversal de la pieza.

De los aspectos a resaltar del proyecto, fue la importancia del trabajo colaborativo entre profesionales de diferentes áreas del saber. En el proyecto participaron biólogos, ingenieros, físicos, diseñadores, arquitectos, profesionales de la industria y la academia. Todos dieron su punto de vista, fue importante saber integrar todos los conocimientos y enfocarlos hacia el desarrollo de una solución exitosa.

El mayor de los retos fue trabajar con los biólogos, ya que desde su experticia lograban describir detalladamente las morfologías de los organismos analizados, sin embargo, cuando se les preguntaba el porqué de ciertas formas, ellos no tenían la respuesta. Al compartirles las hipótesis generadas sobre las causas de dichas formas, mostraron gran interés en entender los principios físicos y estructurales que podrían determinar las variaciones morfológicas evolutivas de los organismos.

Desarrollar herramientas metodológicas que permitan involucrar a los biólogos en el proceso de diseño, más allá de la fase de investigación, podría facilitarles la transición entre las diferentes áreas del saber y permitirles tener un rol más activo en el proceso.

Otro de los retos metodológicos fue la implementación del algoritmo. Aunque se tengan claras las relaciones entre los parámetros, se hace difícil imponer ciertos límites y restricciones para controlar el caos de todos los resultados posibles. La definición del dominio de cada parámetro y de algunas restricciones se hizo de forma intuitiva, por ensayo y error.

Lo interesante del diseño a partir de algoritmos, es que al diseñar los procesos para generar las formas de los objetos no se sabe de antemano el resultado. Esto complicó un poco la comunicación con los colaboradores del proyecto en las etapas iniciales, pues están acostumbrados a visualizar el estado final de lo que se desea diseñar. Una vez se implementó el algoritmo fue sorprendente la cantidad de resultados que se obtenían con solo variar los parámetros.

En el algoritmo se tuvo que modificar algunos de los valores abstraídos al realizar la síntesis geométrica de los Agaricales, pues al pasar de la escala del hongo a la escala de la luminaria, los espesores resultantes no eran eficientes para los procesos térmicos involucrados.

Es muy común en un proceso de diseño, que al hacer un estado del arte de las soluciones existentes, el diseño final sea una copia o una adaptación de las mismas. La ventaja de emplear la biomimesis en el proceso creativo para el desarrollo de un producto, es que son muchas las cosas que pueden descubrirse de los organismos naturales. Al inspirarse en ellos, y no en los productos ya existentes, la solución puede ser mucho más innovadora.

8.3. SOBRE EL PRODUCTO

La ficha técnica de la figura 87 resume las características físicas, eléctricas y fotométricas de Agarical, luminaria desarrollada en este proyecto.



Figura 87. Ficha técnica de Agarical.

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 88 y 89 presentan un render de Agarical en su contexto de uso. El espacio fue diseñado teniendo en cuenta las pruebas de iluminación desarrolladas en el proyecto.



Figura 88. Agarical en contexto 1.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 89. Agarical en contexto 2.
Fuente: Elaboración propia.

Aunque el producto desarrollado es sólo un concepto, las pruebas virtuales sugieren que Agarical es una luminaria eficiente desde el punto de vista térmico y fotométrico y que cumple con las especificaciones de desempeño propuestas en la tabla 5.

Como ya mencionó, hace falta el desarrollo de pruebas físicas para evaluar el comportamiento real del cuerpo de la luminaria, así como de los demás componentes seleccionados, en especial del difusor óptico y de la abrazadera.

Al analizar el estado del arte de los disipadores térmicos del mercado, se calcula que para disipar potencias entre los 12W y 16W, se ofrecen disipadores con un R_{th} mínimo entre 3,5°C/W y 5°C/W. La resistencia térmica calculada del cuerpo de Agarical es $R_{th} = 3.174$ °C/W, lo que demuestra su buen desempeño térmico. La ventaja de los demás disipadores es que tienen menor tamaño y masa, pero hay que tener en cuenta que el cuerpo de Agarical es más que un disipador y que cumple con otras funciones. Sin embargo, su relación masa/As aún puede mejorar.

Su desempeño lumínico supera el de otras luminarias colgantes decorativas.

Otros de los aspectos a mejorar es que, por seguridad, la temperatura de la superficie del cuerpo no debe superar los 50°C y la temperatura calculada está alrededor de los 62°C. Al ser una luminaria colgante es importante ubicarla a una altura que evite el contacto humano, mientras se garantiza una temperatura inferior en su superficie.

Agarical fue pensada para ser fabricada usando tecnologías de manufactura aditiva con metal, sin embargo son tecnologías costosas y no disponibles a nivel local. Aunque la inyección de aluminio requiere altos volúmenes de producción, incumpliendo una de las especificaciones de diseño, es el proceso comercial y económicamente más viable a nivel local, en caso de llegar a fabricar la luminaria.

BIBLIOGRAFÍA

- Alexopoulos, C.J. y Mims, C.W. (1985). *Introducción a La Micología*. Barcelona, España: Omega.
- Baxter, M. (1995). *Product Design: Practical methods for the systematic development of new products*. Londres, Inglaterra: Chapman & Hall
- Benyus, J.M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. Nueva York, EEUU: William Morrow
- Biomimicry 3.8, (2016). *Perspectiva de diseño, LA BIOMÍMESIS*. [en línea]. Disponible en: <<https://biomimicry.net/designers-5-new-designlens-translations-now-available/>> [Consulta: 20, Octubre, 2016].
- Castro, F.J. y Moreno, A. (2014). *Recolección de hongos silvestres*. Madrid, España: Paraninfo
- Crocker, J.R. (2014). *A function of fascination*. Nueva York, EEUU: Instituto Pratt
- Cross, N. (2008). *Engineering design methods: strategies for product design*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- Deacon, J. W. (2005). *Fungal Biology*, (4th ed). Malden, EEUU: Blackwell Publishing
- French, M. (1985). *Modelos de fases*. En Roozenburg N. F. M. Y Eekels J. (1995). *Product Design: Fundamentals and Methods*. Delft, Holanda: John Wiley & Sons.
- Gayoso, E. (2013). *Biónica y Gaudí*. [En línea]. Disponible en: <segundapielarquitectura.blogspot.com.co/2013/10/bionica-y-gaudi.html> [Consulta: 31, Enero, 2017].
- Hansmeyer, M. (2012). *Michael Hansmeyer: Building unimaginable shapes*. [video en línea]. Disponible en: <<https://www.youtube.com/watch?v=dsMCVMVTdn0>> [Consulta: 05, Julio, 2015].
- Howard, T. J. Culley, S. J. y Dekoninck, E. A. (2010). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design Studies*.
- Karlen M., Benya J.R. y Spangler C. (2012). *Lighting Design Basics*. Nueva Jersey, EEUU: John Wiley & Sons, Inc.
- Kennedy, S. (2004). Biomimicry/biomimetics: general principles and practical examples. *The Science Creative Quarterly*. [En línea]. Disponible en: <<http://www.scq.ubc.ca/biomimicrybimimetics-general-principles-and-practical-examples>> [Consulta: 25, Enero, 2017].
- Kuhn, T.S. (1996). *The Structure of Scientific Revolutions*, (3rd ed). *University of Chicago Press*. Chicago, EEUU.
- Lisnovsky, M. (2008). *El Hexágono, la Fuerza de la Naturaleza aplicada a la Arquitectura*. [En línea]. Disponible en: <<http://arquitecturamashistoria.blogspot.com.co/2008/04/sc-61-el-hexgono-la-fuerza-de-la.html>> [Consulta: 5, Diciembre, 2016].
- Liu, F. et al. (2017). Asymmetric drop coalescence launches fungal ballistospores with directionality. *Journal of The Royal Society Interface*. Londres, Inglaterra: The Royal Society Publishing.

- Lodato, F. (2017). Franco Lodato, diseñador industrial. *Revista Diario Libre*. [En línea]. Disponible en: <<http://www.diariolibre.com/revista/franco-lodatodiseador-industrial-HLDL121512>> [Consulta: 1, Febrero, 2017]
- McCormack, J., Dorin, A. e Innocent, T. (2004). Generative Design: a paradigm for design research en Redmond, J. et al (ed) *Proceedings of Futureground*, Design Research Society, Melbourne.
- Méndez, L.M. y Otalvaro, V. (2006). *Estudio de la biónica como metodología aplicable en ingeniería de diseño de producto y su formalización a través de una propuesta de investigación del semillero HECAS-ID de la Universidad EAFIT*. Medellín, Colombia: Trabajo de grado Universidad EAFIT.
- MechaTronix, (Sin fecha), *LED Cooling Basis*. [En línea]. Disponible en: < <https://www.led-heatsink.com/led-cooling-basics> > [Consulta: 30, Abril, 2018].
- Mentor Graphics Corporation. (2011). *Solving the System-Level Thermal Management Challenges of LEDs*. [En línea]. Disponible en: <http://images.connect2communities.com/pdf/mentorpaper_47723.pdf> [Consulta: 11, Noviembre, 2016].
- Mondragón, S. (2002). *Semiótica. XIV Congreso Internacional de ingeniería Gráfica*. Santander, España.
- New Brunswick Museum. (2007). *Natural History Of Fungi*. [en línea]. Disponible en: <<http://website.nbm-mnb.ca/mycologywebpages/NaturalHistoryOfFungi/Home.html>> [Consulta: 11, Diciembre, 2017].
- Nordin, A., Hopf, A., y Motte, D. (2013). Generative design systems for the industrial design of functional mass producible natural-mathematical forms. *Proceedings of the 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research - IASDR'13* (pp. 2931-2941). Tokyo, Japón: International Association of Societies of Design Research (IASDR).
- Noblin, X., Yang, S. y Dumais, J. (2009). Surface tension propulsion of fungal spores. *Journal of Experimental Biology*. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
- Noblin, X. et al. (2012). The Fern Sporangium: A Unique Catapult. *Science*, 335(6074), 1322.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. (2007). *Engineering design: a systematic approach* (3rd ed.). Springer.
- Patiño, E. y Arbeláez, E.M. (2009). *Generación y transformación de la forma*. Medellín, Colombia: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.
- Pottmann, H. et al. (2007). *Architectural Geometry (1st ed)*. Pennsylvania, EEUU: Bentley Institute Press.
- Pugh, S. (1991). *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Harlow: Addison-Wesley Publishing Company.
- Ravichandra, N. G. (2013). *Fundamentals of plant pathology*. Delhi, India: PHI Learning Pvt. Ltd.
- Ritchey, T. (1998). *General Morphological Analysis: A general method for non-quantified modeling*. [En línea]. Disponible en: < <http://www.swemorph.com/ma.html>> [Consulta: 10, Octubre, 2017].
- Sanin, P. (2014). *A Study of Additive Manufacturing Applied to the Design and Production of LED Luminaires*. Milán, Italia: Politécnico de Milán.

- Simons, R.E. (2001). *Simplified Formula for Estimating Natural Convection Heat Transfer Coefficient on a Flat Plate*. [en línea]. Disponible en: <<https://www.electronics-cooling.com/2001/08/simplified-formula-for-estimating-natural-convection-heat-transfer-coefficient-on-a-flat-plate>>. [Consulta: 1, Marzo 2018].
- Stevens, P.S. (1987). *Patrones y pautas en la naturaleza*. Barcelona, España: Salvat Editores, S.A.
- Stewart, I. (1995). *Nature's numbers: the unreal reality of mathematics*. Nueva York, EEUU: BasicBooks.
- Stone, R.B. y Wood, K. (2000). Development of a Functional Basis for Design. *Journal of Mechanical Design - J MECH DESIGN*.
- Suárez, J. y Sánchez, M. (2007). Morfogénesis del objeto de uso. *Actas de Diseño N°2* (pp.223-227). Buenos Aires, Argentina: Universidad de Palermo.
- Thompson, D.W. (1945). *On growth and form*. Nueva York, EEUU: Macmillan
- The Bionic Enterprises Group. (2012). *The Bionics principle*. [en línea]. Disponible en: <<http://bionic-enterprises.com/>>. [Consulta: 2, Febrero, 2017].
- Torres, G. (2013). *Diseño de productos - Diseño en Ingeniería*. [en línea]. Disponible en: <<https://es.slideshare.net/torresgiovanni/diseo-de-productos-diseo-en-ingeniera>> [Consulta: 20, Junio, 2017].
- Ulrich, K.T. y Eppinger S. D. (2012). *Product design and development (5th ed)*. Nueva York, EEUU: McGraw- Hill Education.
- VDI. (1986). Guideline 2221 - Systematic approach to the design of technical systems and products. *VDI-Verlag*.
- Ventola, L. et al. (2014). Heat Transfer Enhancement by Finned Heat Sinks with Micro-structured Roughness. *Journal of Physics: Conference Series. Vol. 494. No. 1*. IOP Publishing
- VS Lighting Solutions. (2015). *Thermal Design of LED Luminaires*. [en línea]. Disponible en: <https://www.vs-lighting-solutions.com/fileadmin/user_upload/Thermisches_Design_GB_140909.pdf> [Consulta: 15, Julio, 2017].
- Volstad, N.L. y Boks, C. (2008). Biomimicry—a useful tool for the industrial designer? *DS 50: Proceedings of NordDesign 2008 Conference*. Tallinn, Estonia.
- Wagensberg, J. (2004). *La rebelión de las formas*. Barcelona, España: Tusquets Editores.
- Wallschlaeger, C. y Busic-Snyder, C. (1992). *Basic Visual Concepts and Principles for Artists, Architects and Designers*. Ohio, EEUU: McGraw-Hill Higher Education.
- Zaffaroni, R. E. (1988). *Criminología aproximada desde un margen*. Bogotá, Colombia: Ed. Temis S.A.
- Zeisel, E. (2001). *Eva Zeisel en la lúdica búsqueda de la belleza*. [video en línea]. Disponible en: <http://www.ted.com/talks/eva_zeisel_on_the_playful_search_for_beauty?language=es> [Consulta: 30, Noviembre, 2016].
- Zeisel, E. (2004). *On Design: The magical language of thing*. Nueva York, EEUU: Overlook Duckworth.