

TERMOREGULACIÓN NATURAL EN ESPACIOS CERRADOS CON BASE EN EL
MECANISMO DE LAS PIÑAS DE CONÍFERAS

MONOGRAFÍA

Christian Camilo Rayo Ochoa

Isabella Vidal Correa

ASESORES:

David Andrés Torreblanca

Alejandro Zuleta Gil

Universidad Pontificia Bolivariana
Facultad de Diseño Industrial
MEDELLÍN
2016

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN / INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

TÍTULO

RESUMEN

PALABRAS CLAVE

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- 1.1 TEMA GENERAL DEL PROYECTO
- 1.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
- 1.3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN IDENTIFICADO – PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN
- 1.4 ELEMENTOS DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

- 2.1 VALIDEZ DEL PROYECTO EN EL CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN EN DISEÑO INDUSTRIAL
- 2.2 VALIDEZ DEL PROYECTO EN EL CONTEXTO DEL DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS

3. OBJETIVOS

- 3.1 OBJETIVO GENERAL
- 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

- 4.1 CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL PROBLEMA.
- 4.2 ANTECEDENTES

5. METODOLOGÍA

- 5.1 ACTIVIDADES PARA LA OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN
 - 5.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN MORFOLOGICA DEL CONO DE CONIFERA
 - 5.1.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS PATRONES NATURALES, RELACIONADOS CON LA MORFOLOGIA DE LAS CONIFERAS
 - 5.1.3 ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE APERTURA Y CIERRE A PARTIR DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL
 - 5.1.4 RELACIONAR LOS PATRONES MORFOLOGICOS Y FUNCIONALES PARA VERIFICAR CUALES PERMITEN MAYOR FLUJO DE AIRE

- 5.2 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA OBTENCIÓN Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN
- 5.3 OBJETOS DE ESTUDIO UTILIZADOS
- 5.4 CONDICIONES PARTICULARES DEL OBJETO DE ESTUDIO
- 5.5 INSTRUMENTOS DE REGISTRO DE INFORMACIÓN
- 5.6 INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 RESULTADOS

- 6.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN MORFOLÓGICA DEL CONO DE CONÍFERA
- 6.1.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS PATRONES NATURALES Y RELACIÓN CON LA MORFOLOGÍA DE LAS CONÍFERAS
- 6.1.3 RELACIÓN DE LOS PATRONES MORFOLÓGICOS Y FUNCIONALES PARA VERIFICAR CUÁLES PERMITEN MAYOR FLUJOS DE AIRE

6.2 DISCUSIÓN

- 6.2.1 ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE APERTURA Y CIERRE A PARTIR DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL
- 6.2.2 VERIFICACIÓN DE LA RELACIÓN MÁS ÓPTIMA ENTRE LA MORFOLOGÍA Y EL MATERIAL EN RELACIÓN CON EL FLUJO DE AIRE, A TRAVÉS DE LA CREACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DE UN MODELO EXPERIMENTAL QUE PERMITA VALIDAR DICHA RELACIÓN.
- 6.2.3 SEGUNDA FASE DE VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL PATRÓN ESCOGIDO.

7. CONCLUSIONES

- 7.1 HALLAZGOS MÁS IMPORTANTES DE LA INVESTIGACIÓN
-

8. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

TERMOREGULACIÓN NATURAL EN ESPACIOS CERRADOS BASADA EN EL MECANISMO DE LAS PIÑAS DE CONÍFERAS

Resumen

A partir de la biomimética, se estudió cómo los organismos, en este caso las piñas coníferas, utilizan su mecanismo de defensa de apertura y cierre para resguardar las semillas de los cambios climáticos extremos; posteriormente, se emplearon estos principios para su implementación en el desarrollo de una fachada de doble piel con la finalidad de aplicarlos en espacios cerrados y generar una mayor eficiencia en cuanto a la circulación del flujo de aire en su interior. Gracias a la morfología de las coníferas, se llevó a cabo la identificación de patrones y el comportamiento de cada uno de sus elementos para el análisis de su mecanismo de apertura y cierre en relación a su configuración material. A partir de la configuración geométrica que se logró identificar de los patrones de las coníferas, se pretende adaptar este principio a un sistema de ventilación natural mediante el comportamiento y la disposición de las fibras de chapillas de madera natural ante la presencia y ausencia de humedad que presentan para generar un mayor flujo de aire en espacios cerrados.

Palabras Clave: *Biomimética, Ventilación natural, Espacio cerrado, Conífera, Mecanismo.*

INTRODUCCIÓN

La ventilación es la principal estrategia de climatización utilizada en los climas cálidos, tanto secos como húmedos. La ventilación natural permite la renovación del aire al interior de un espacio cerrado, el cual se produce por la acción del viento o por el cambio de temperaturas en el punto de entrada y salida del aire; en ambientes cálidos y eventualmente húmedos, el movimiento de aire alrededor del cuerpo humano provoca un mayor intercambio térmico con el cuerpo y por lo tanto enfriamiento, por lo que amplifica el rango de la sensación de confort, y al mismo tiempo este flujo de aire ayuda a eliminar contaminantes u olores presentes en el interior del espacio cerrado.

Por medio de la biomimética se busca dar solución a este problema tomando como referente natural a las piñas de conífera, las cuales poseen un mecanismo de apertura y cierre les permite su reproducción y adaptación a ambientes exteriores. Dicho mecanismo es analizado con el fin de encontrar como el comportamiento de las piñas puede ser empleado para permitir la termorregulación natural en espacios cerrados. Dicho mecanismo es analizado con el fin de encontrar como el comportamiento de las piñas puede ser empleado en una superficie de doble piel para permitir la termorregulación natural en espacios cerrados, basado en la relación más óptima entre la abstracción morfológica y material de la piña de conífera. Los cuales en espacios cerrados reaccionan al calor y a la humedad (transpiración y respiración) generada por el cuerpo de las personas que interactúan constantemente y al calor producido por la posible maquinaria en dicho espacio.

1. PLANTEAMIENTO

1.1. Tema general del proyecto: Biomimética y termorregulación

1.2. Características generales del proyecto de investigación.

Por medio de la caracterización de la morfología de las coníferas y del análisis de su mecanismo de apertura y cierre, considerando además su configuración material, se llevó a cabo la identificación de patrones y comportamientos de cada uno de sus elementos; a través de la abstracción de dichos patrones se realizaron una serie de modelos experimentales, esto con el objetivo de identificar la relación más óptima entre la morfología y las características materiales, para adaptarla en un sistema que permita un mejor flujo de aire al interior de espacios cerrados.

1.3. Problema de investigación identificado- Pregunta de investigación.

En algunos espacios cerrados se identifican dos situaciones, en las cuales puede presentar o un alto consumo energético debido al permanente uso de ventilación artificial, o por el contrario se evidencia una ventilación inadecuada o insuficiente, por la ausencia de fuentes de convección natural de aire, lo cual provoca problemas salud y crea un ambiente poco propicio para ser habitados, lo que altera el comportamiento de las personas que se encuentran dentro de este. En el primer caso, el uso de ventilación artificial tiene un alto impacto medioambiental a causa de las emisiones de CO₂, al alto consumo de energía y los

elevados costos de inversión y sostenimiento. Por otra parte, en el segundo caso, al tener una ventilación inadecuada se pueden generar problemas de salud en los usuarios debido a que se reduce el porcentaje de oxígeno en el ambiente como consecuencia del aumento de la cantidad de CO₂ y concentración de calor. Estos problemas se derivan de la colocación y orientaciones incorrectas de los puntos de entrada y salida del aire, la cantidad de máquinas que irradian calor y generen gases, además de la transpiración y respiración de las personas que habitan ese espacio; generando así estratificaciones y zonas no ventiladas.

Hipótesis o pregunta de investigación

¿Es posible optimizar el flujo de aire en un espacio cerrado por medio de la ventilación natural, para mejorar el confort de las personas que lo habitan, tomando como referente el mecanismo de apertura y cierre, y la morfología de las piñas coníferas?

1.4. Elementos del problema de investigación

- Ventilación natural
- Flujo y corriente del viento
- Morfología (forma, disposición de las fibras, composición, etc.) del cono de pino
- Mecanismo de cierre y apertura del cono de pino
- Smart material
- Termorregulación en espacios cerrados

2. JUSTIFICACIÓN

2.1. Validez del proyecto en el contexto de la de investigación en diseño industrial.

A partir de una investigación preliminar, se identificó una problemática y se generaron propuestas o posibles soluciones para la generación de un producto que cumpla con el objetivo de optimizar el flujo de aire en un espacio cerrado para mejorar las condiciones del ambiente, donde los usuarios realizan y desarrollan sus actividades cotidianas, y adicionalmente disminuir el consumo energético. Seguido a este proceso de investigación, el diseño industrial busca aplicar el conocimiento y los resultados obtenidos a un producto o servicio que aporta tanto a una mejora en la salud de los usuarios como una permanente conservación del medio ambiente, brindando así soluciones sostenibles y atractivas para subsanar los problemas emergentes actuales relacionados con la calidad de vida de las personas y la contaminación ambiental.

A demás esto le da valor a la investigación en el contexto del diseño industrial puesto que estos resultados pueden ser también empleados para el diseño de producto y en el ámbito arquitectónico, planteando una nueva alternativa metodológica que permita realizar la caracterización morfológica de elementos naturales a través de abstracciones que puedan ser incorporadas a la industria en general.

2.2. Validez del proyecto en el contexto del desarrollo de nuevos productos.

La investigación realizada permitió la recolección de información y el desarrollo de experimentaciones que permitieron analizar el comportamiento de las piñas coníferas, arrojando una serie de parámetros o logros significativos que pueden ser utilizados para la solución de diversas problemáticas. El objetivo de este trabajo es el de optimizar el flujo de aire en un espacio cerrado por medio de ventilación, pero con base a los hallazgos encontrados durante la investigación se abrieron nuevas posibilidades para la solución de problemáticas empleando las metodologías planteadas en esta investigación.

Es importante tener en cuenta que las nuevas problemáticas a nivel mundial relacionadas con el medio ambiente, ofrecen oportunidades de diseño que por medio de la biomimética son posibles de abordar. El paso del uso de energías convencionales a alternativas son también un campo en crecimiento, al igual que el objetivo de construir un mundo sostenible. Las piñas de conífera hacen parte de la naturaleza, y como tal tienen un comportamiento y una forma determinada y perfecta de cómo sobrevivir y reaccionar a las condiciones ambientales; su mecanismo, material y conformación morfológica serán temas de gran ayuda para buscar soluciones a problemas ambientales y de sostenibilidad.

En ésta investigación se llevó cabo la creación de nuevos sistemas de doble piel basados no solo en la aplicabilidad de componentes morfológicos con un alto funcionamiento, sino también en el uso de mecanismos basados en las propiedades intrínsecas que tienen los materiales que reaccionan a la humedad, los cuales permiten una mejora mucho más eficiente de la función que prestaría cada uno de los componentes que conforman un sistema de doble piel (exoesqueleto) en una edificación.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Verificar la relación más óptima entre la morfología, el material y mecanismo de apertura y cierre de la piña de conífera en relación con el flujo de aire presente en un espacio cerrado, mediante el diseño de un modelo experimental.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la composición morfológica del cono de conífera de la especie *Pinus Canariensis*
- Identificar patrones y/o principios morfológicos en las coníferas
- Analizar la relación entre los mecanismos de apertura y cierre con respecto a la disposición del material del cono de conífera
- Relacionar los patrones morfológicos y funcionales para verificar cuales de estos permiten mejor flujo de aire
- Verificar la relación más óptima entre la morfología y el material en relación con el flujo de aire, a través de la creación y experimentación de un modelo.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. Conceptualización de elementos del problema

Para el análisis de la adaptación de las piñas como referente natural a la ventilación natural, se identifican los comportamientos de éstas durante la reproducción de sus semillas con el fin de comprender cómo las semillas salen del cono o piña ovulífero y germinan al caer sobre la superficie terrestre. En la Figura 1 se muestra cómo es este proceso de reproducción y el paso a paso de cómo el polen se acumula en las ovocélulas para ser finalmente una semilla.

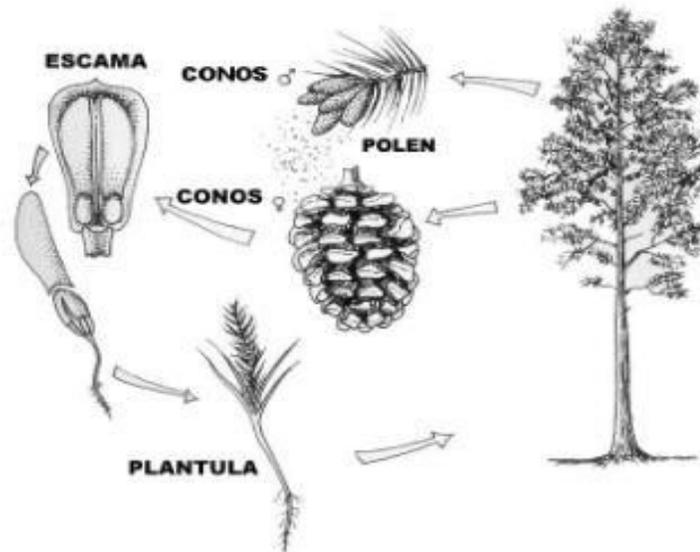


Figura 1. Proceso de reproducción del pino

Las semillas están ubicadas en el interior de la piña femenina, las cuales están protegidas por unas escamas externas que disponen de un mecanismo de cierre y apertura para permitir la salida de las mismas dependiendo del clima inmediato del entorno. En la

Figura 2 se muestra la ubicación de cada una de las semillas y su exposición en una piña gimnosperma.

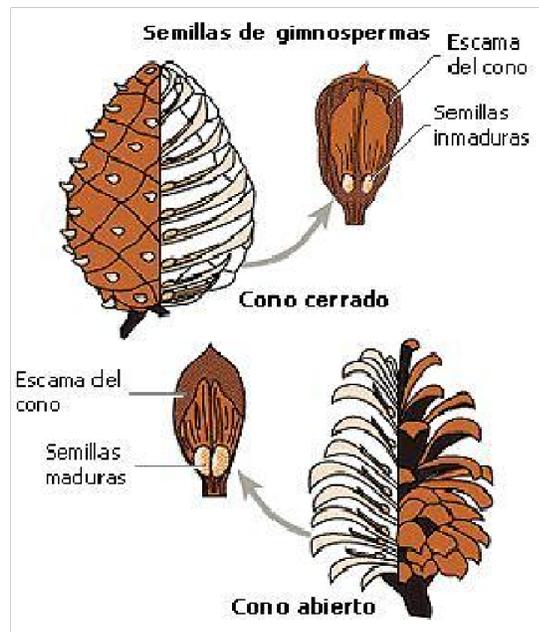


Figura 2. Ubicación de las semillas en una piña gimnosperma.

Actualmente es un tema de interés en el mundo investigativo, entender el mecanismo de las piñas con el fin de llevarlo a aplicaciones industriales, como lo son los materiales tecnológicos que responden a agentes climáticos o externos. En un estudio realizado en el 2013 (Randall M. Erb, 2013, p. 3) investigaron acerca del cambio de forma en la naturaleza y analizan en ella los materiales naturales que cambian de forma usando microfibras en orientaciones específicas con el fin de contraerse o expandirse en respuesta a agentes externos del ambiente; los investigadores replican este comportamiento en materiales sintéticos fabricados en compuestos artificiales. La técnica que utilizan se basa en la orientación de mecanismos con y sin refuerzo, combinando estas orientaciones de las fibras se crean compuestos que varían en su microestructura, lo cual genera movimientos reversibles, efectos de torsión y cambios de forma en lugares específicos de la estructura.

En la Figura 3 (a) y (b) se muestra la caracterización de las fibras en las escamas de la piña, la morfología de ésta en estado de humedad o clima seco y su respuesta a estos estímulos (apertura o cierre).

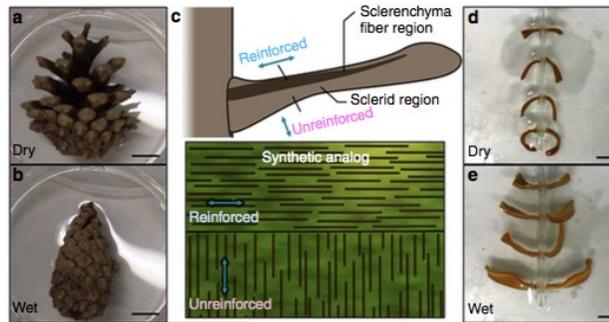


Figura 3. Caracterización las piñas. (a) experimentaciones realizadas en materiales compuestos que imitan la constitución de las microestructuras de las piñas, se replican las orientaciones de las microfibras y la reacción a la humedad. (Randall M. Erb, 2013)



Figura 4. Materiales compuestos con diferente orientación de fibras (Randall M. Erb, 2013).

Otro de los estudios relevantes acerca del mecanismo de la piña se realizó en el 2009 por la escuela de ingeniería y ciencias aplicadas de la universidad de Harvard (E. Reyssat, 2009), quienes consideraban objetos naturales o artificiales que responden a la humedad en el ambiente cambiando su forma; para esto usaban la piña de pino como ejemplo por su mecanismo, identificaban su geometría, mecanismos y dinámica de cierre y apertura en sus

tejidos y estructura. A partir de esto realizaron una comparación entre el comportamiento de una doble capa conformada por papel y polímero, la cual reacciona al vapor; cada uno de estos materiales le brinda al mecanismo y a la geometría un comportamiento o reacción diferente.

Inicialmente E. Reyssat y L. Mahadevan estudiaron el ángulo de acuerdo a la posición de las escamas, tomando como punto de referencia la posición de la escama cuando está cerrada, es decir, cuando la piña reacciona a la humedad. Esto se observa en la Figura 5.

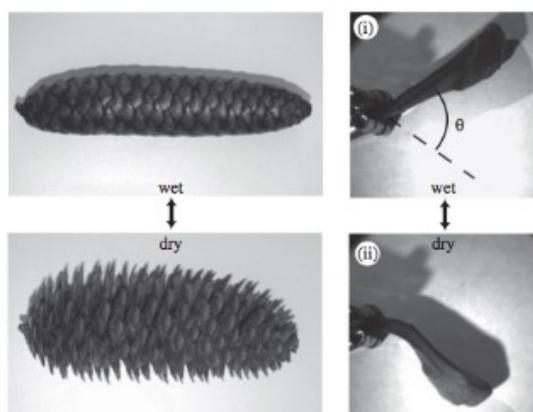


Figura 5. Mecanismo de apertura y cierre de la piña conífera

Después de realizar este análisis de la piña se replica en una capa conformada por plástico y papel, la cual es sensible a la humedad también. Cuando un extremo se pone en contacto con un baño de agua, el agua invade la textura por capilaridad, induciendo así un cambio en la curvatura. En la Figura 6 se aprecian los cambios significativos de ésta.

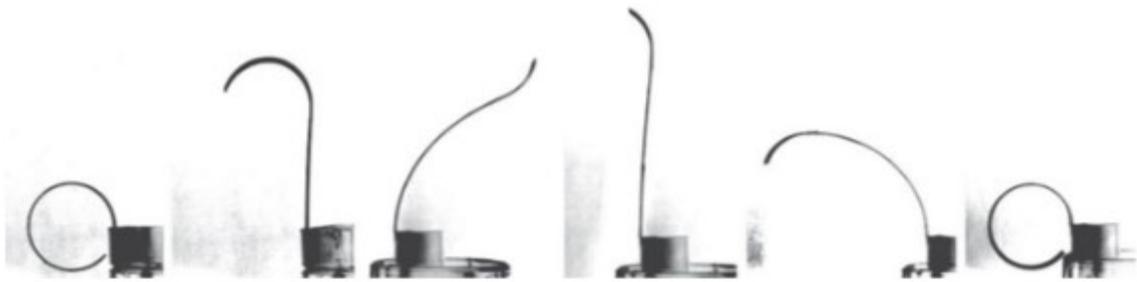


Figura 6. Curvaturas tomadas según el grado de humedad (E. Reyssat, 2009)

Otro de los experimentos realizados es el de la imitación de una flor, la cual tiene las mismas capas de plástico y papel. La flor es sumergida en agua y los pétalos se abren mientras que cuando se extrae las capas se seca y la flor se seca. En la figura 7 se observa este proceso.

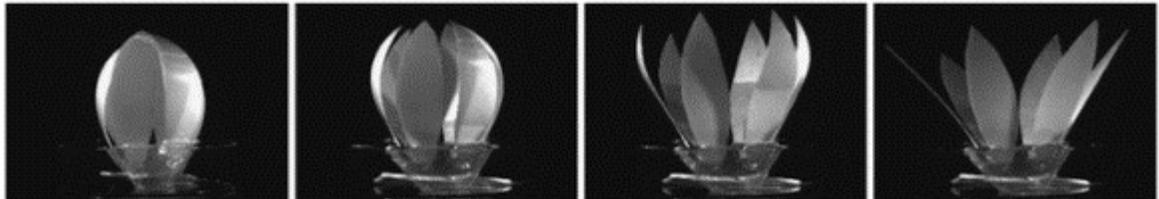


Figura 7. Comportamiento de una doble capa, compuesta por polímero y papel

Para el estudio de la morfología de la piña, se han usado técnicas o métodos relacionados con el número de Fibonacci, el cual es basa en estudiar la distribución en espiral de la piña y catalogar el tipo de piña según el número de eslabones hacia la derecha o izquierda, esto también está ligado a la evolución de las mismas (E. Roberts, 2015, p. 13). En la figura 8 se muestra cómo se aplica este estudio en las piñas.

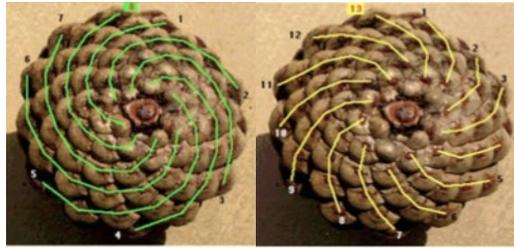


Figura 8. Distribución en espiral de la piña ambos sentidos (derecho e izquierdo)

Las semillas en el cono están organizadas en forma de espiral, de hecho, hay pares de espiral, si se pone el cono en posición vertical mirando al cielo y se traza una espiral hacia arriba, se puede ver que uno va hacia la derecha y el otro hacia la izquierda (en forma de espiral). Las espirales tienen diferentes inclinaciones, una más pronunciada que la otra, a veces es la derecha y otras la izquierda. Esto se observa en la figura 9.

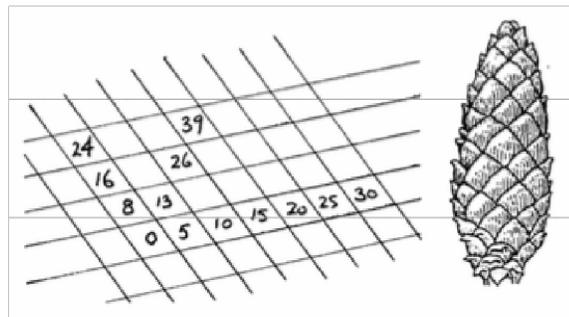


Figura 9. Aplicación método Fibonacci en las piñas

Todos estos conceptos serán llevados a la aplicación en la ventilación natural, con el objetivo de optimizar el flujo de viento en espacios cerrados, para esto se identifican los tipos de ventilación natural, ventilación cruzada y vertical, las cuales se logran a partir de aperturas que aprovechan las presiones altas y bajas de los vientos dominantes. De acuerdo con los conceptos analizados de la piña se busca implementar una superficie de doble piel que permita el paso del viento, esta superficie se diseña a partir de los patrones morfológicos

identificados y del mecanismo, y dinámica de apertura y cierre de las piñas, con el fin de disminuir el consumo energético y hacer uso de la ventilación natural como suministro o recurso natural. Se busca complementar e integrar los conceptos de ventilación y el comportamiento de la piña, con el fin de encontrar un punto de equilibrio entre conceptos relacionados con la morfología y mecanismos de la piña y los conceptos derivados de la ventilación natural, como lo son las aperturas que permiten la entrada y salida del viento; hasta el momento son pocos los estudios que se han realizado para definir este equilibrio, y más aún en aplicaciones directamente en diseño industrial.

En la figura 10 se identifica el flujo de aire en una construcción de espacios cerrados, teniendo en cuenta que la ventilación natural es la que predomina en este caso, específicamente la ventilación cruzada.

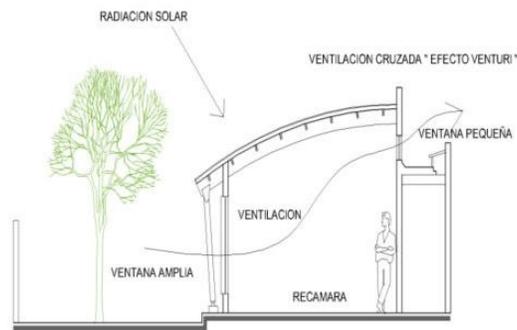


Figura 10. Ventilación cruzada en construcción de espacio cerrado

4.2. Antecedentes

Water Reaction

Water Reaction es un diseño basado en la biomimética de la piña de los pinos, creada por el diseñador Chao Chen; que, por las propiedades del material, cambia la forma de sus componentes automáticamente al detectar la humedad, sin ningún sistema mecánico o eléctrico (Figura 11), aún continúa siendo un prototipo al cual se le buscan hacer mejoras de los componentes para su fabricación con materiales más resistentes. (Chen, 2015)

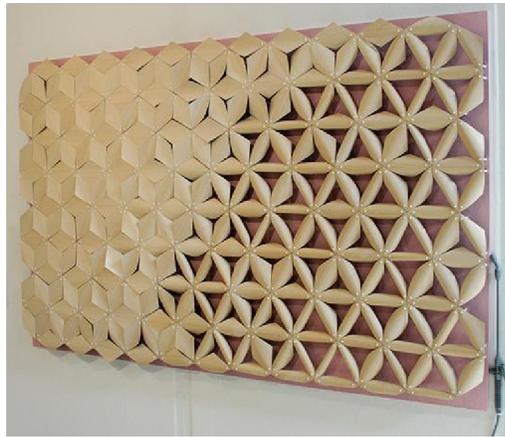


Figura 11. Sistema de doble piel o fachada que incorpora el Water Reaction que permuta la forma de los componentes individuales en presencia de humedad.

Utilizado como techo para estructuras exteriores (Figura 12); cuando está seco las tejas se abren y permite que los rayos del sol entren. Por el otro lado, cuando llueve el material se expande y cierra los espacios, para funcionar como cubierta.

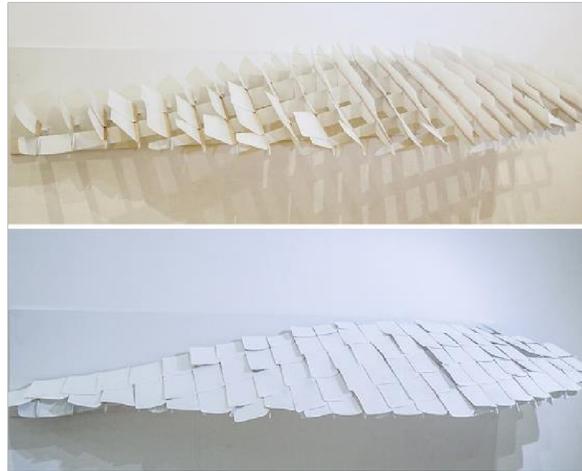


Figura 12. Techo con tejas que reaccionan al agua, se abre cuando el ambiente está seco y se cierra en presencia de lluvia.

Implementan material laminado que reacciona al agua imitando el funcionamiento de los conos de pino que reaccionan de acuerdo a las variaciones del clima. Al estar secas, las escamas seminíferas están naturalmente abiertas. Al contacto con la lluvia, las escamas se cierran (Chen, 2015) tal como se muestran en la Figura 13



Figura 13. Lámpara conformada por el Water Reaction la cual contrae las escamas en presencia de agua, protegiendo el sistema de iluminación en el interior

Lámpara Zappy diseñada por Shneid

La lámpara se compone de paneles ligeros de fresno o roble inspirados en cono de pino (Figura 14). Cada pieza es elaborada a mano de madera sin tratar, con certificación FSC cosechado en el norte de Alemania, y sus fabricantes están dedicados a asegurar que sus productos son ambientalmente sostenibles, ya que son estéticamente atractivo. Zappy ganó

el segundo lugar en el 2014 concurso Premio Producto Verde de Europa, y ha aparecido en revistas como ELLE Deco. (Shneid, 2015)



Figura 14. Lámpara inspirada en la piña de las coníferas, consiste en una abstracción de la morfología de las piñas.

Hygroscope por Steffen Reichert y Stuttgart

Diseñado en el Instituto de Diseño Computacional (ICD), que forma parte de la Universidad de Stuttgart, en Alemania, la estructura responde a los cambios del clima circundante a través de la "piel" (Figura 15.). Funciona imitando la forma verdadera de la piel del cono de piña, el material compuesto de láminas delgadas de madera es capaz de responder a las fluctuaciones de la humedad, a través de la apertura y cierre de sus aberturas. (Stuttgart, 2013)

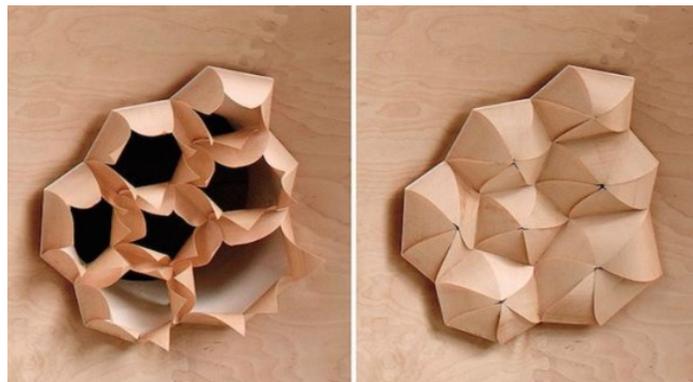


Figura 15. Apertura y cierre de las láminas de madera

5. METODOLOGÍA

5.1 Actividades para la obtención de la información

5.1.1 Caracterización de la composición morfológica del cono de conífera:

Inicialmente se realizó la caracterización de la composición morfológica del cono de conífera, donde se tuvieron en cuenta variables como geónes principales, dimensiones y geometría de cada una de las partes de la conífera, incluyendo patrones naturales, procedencia, edad y características de las semillas.

5.1.2 Identificación de los patrones naturales, relacionados con la morfología de las coníferas

En relación con la segunda fase, donde se identifican los patrones naturales, relacionados con la morfología de las coníferas, se realizó un estudio por medio del cual se analizó cómo se representa en la conformación geométrica de la piña la sección áurea, el número de Fibonacci y el comportamiento de un fractal.

5.1.3 Análisis de los mecanismos de apertura y cierre a partir de las propiedades del material

Con el fin de que el modelo final cumpla con los comportamientos determinados a partir de la piña, se analizaron los mecanismos de apertura y cierre a partir de las propiedades del material que constituye las escamas del cono de conífera (distribución interna de las fibras que la componen).

5.1.4. Relacionar los patrones morfológicos y funcionales para verificar cuáles permiten mayor flujo de aire:

Después de haber realizado el análisis y estudiar los casos anteriores, relacionados con el mecanismo y los materiales. Se desarrolló la siguiente fase, en la cual se relacionaron los patrones morfológicos y funcionales para verificar cuáles permiten mayor flujo de aire. Las experimentaciones realizadas se hicieron teniendo en cuenta las siguientes variables:

- Material
- Patrón
- Dimensiones

Inicialmente se realizaron experimentaciones con papel, acetato y chapilla de diferentes tipos. Se tuvo en cuenta el espesor del material, la dirección de las vetas de la chapilla, para optimizar el movimiento de estas al cambio de temperatura por medio de adición de agua (a temperatura ambiente) con un spray y aire caliente (60°) por medio de un secador.

Para realizar este proceso se tuvieron en cuenta los patrones escogidos de la matriz explicada en la pág. 24, donde se muestra cómo sería la disposición o distribución de cada uno de los patrones sobre una pared de doble piel. Para la experimentación se construyeron varios prototipos del patrón, en dimensiones de 19 x 20 cm, se construyeron tres marcos con palillos de bambú para darle rigidez a la estructura y poder sostener la chapilla y facilitar su observación todas bajo las mismas condiciones. Posterior mente se construyeron cinco modelos adicionales a una escala mayor, con marcos de pino de 28 x 28cm, donde el patrón

fue cortado a laser siguiendo el sentido de la beta de las diferentes chapillas, dicho patrón se fijó al marco a través de un listón de MDF que lo atraviesa de forma longitudinal, en el cual el patrón es sostenido por un aro de Triplex de 23 cm de diámetro con un desfase de 1cm hacia adentro que soportaba los extremos de los geónes, y un circulo de Triplex de 5.7 cm de diámetro que comprimía el extremo donde inician los geónes para generar el principal punto de apoyo del mecanismo.

5.1.5. Verificación de la relación más óptima entre la morfología y el material en relación con el flujo de aire, a través de la creación y experimentación de un modelo

Una vez elaborados los marcos se sometieron a una prueba de corroboración de la forma en pos del material, dicha prueba consto de rosear con un spray lleno de agua cada uno de los modelos y observar cómo fue su reacción ante la humedad aplicada. Este proceso se realiza 3 veces con cada modelo para verificar que los datos obtenidos si fueran concisos.

Luego de elegir el modelo que cumplió con la relación más óptima entre morfología y el material en cuanto al funcionamiento (reacción de ante la humedad y al aire caliente de un secador de cabello), se realizó una prueba en un túnel de aire casero, en el cual el marco encajaba con una leve precisión en la mitad del túnel de aire, en esta parte del túnel tenía un recuadro en acetato que permitió obtener el registro de lo que pasaba en el interior. En uno de los extremos había un extractor y en el otro un pequeño orificio por donde se hacía pasar humo proveniente de una mezcla de hielo seco y agua caliente.

5.2. Técnicas utilizadas para la obtención y recolección de información

- Recolección y almacenamiento de muestras en su ambiente natural (Parque Arví y Cementerio Jardines de Monte Sacro)
- Fichas de caracterización morfológica de las piñas de conífera
- Registro fotográfico y de video
- Marcos de madera
- Túnel de viento (comprobación de flujos de aire)

5.3. Objetos de estudio utilizados

La especie de piñas que se eligió para el estudio fueron las que produce el pino radiata o insignis. Entre las características más importantes de este pino se encuentran: nombres comunes que recibe: Pino candelabro, pino (Col); Pino insigne (Ecu, Perú, Chile, Arg.)

- No resiste frío, ni soporta heladas, habita cerca de los 800 – 1600 msnm
- Tronco cónico y recto, talla media (30 m)
- Corteza externa café agrietada; corteza interna crema- rosáceo, segrega una resina transparente
- Copa alargada y cónica.
- Hojas aciculares en fascículos de tres.
- Fruto cono o estróbilo leñoso, grande parecido a una piña, contiene semillas aladas, son grandes y asimétricos por la base.

5.4. Condiciones particulares del objeto de estudio

- Para el análisis de las piñas estas deben estar completas para permitir un análisis uniforme y observar bien sus componentes.
- Para un mejor análisis del mecanismo es preferible que sea una piña joven para que el movimiento de apertura y cierre funcione mejor

5.5. Instrumentos de registro de información

- Fichas de caracterización
- Cámara Nikon D3100

5.6. Instrumentos y técnicas de análisis de información.

- Análisis de fotográficos tomados con una cámara Nikon D3100, donde se examina la morfología de las piñas de conífera
- Fichas comparativas y de caracterización las cuales contrastan los tamaños, formas de las diferentes partes que componen las piñas de conífera
- Matriz e doble entrada donde se ponen en relación directa patrones y principios encontrados durante la investigación con las formas abstraídas de la caracterización de las piñas de conífera.
- Hielo seco y agua hirviendo para producir una reacción química que genere una mayor cantidad de vapor de agua (humo más denso) que permita observar mejor el flujo del aire al interior del túnel de viento

- Túnel de viento casero permite realizar la experimentación de flujo de aire bajo condiciones controladas, permitiendo una mejor observación del modelo durante dicha experimentación

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Resultados

6.1.1 Caracterización de la composición morfológica del cono de conifera:

En la figura 16 se observa la observación directa y la experimentación con cada una de las piñas recogidas en el cementerio Monte sacro y de Santa Elena, se analizan aproximadamente 10 piñas.



Figura 16. Caracterización de las piñas

Estas variables se registran en las fichas de caracterización adjuntas al final del trabajo, donde se muestra detalladamente cada uno de los datos obtenidos.

Con base en el artículo del autor J.M Climent, donde se explica la variabilidad morfológica de las piñas (CLIMENT, 2014) se definen ciertos parámetros y conceptos a tener en cuenta en el análisis de las muestras.

En la figura 17 se observan los tipos de apófisis y qué medida corresponde a cada elemento que compone a la escama, en este caso el umbo (u) y el apófisis (a). Los tipos de apófisis definidos en el artículo estudiado son las siguientes:

- a: Apófisis plano
- b: Apófisis piramidal
- c: Apófisis prominente
- d: Apófisis revuelta hacia la base

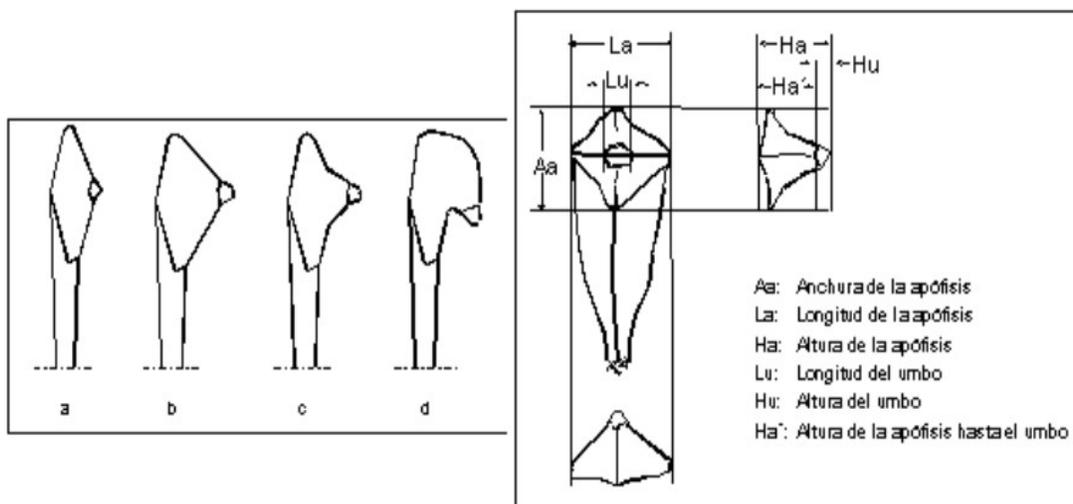


Figura 17. Tipos de apófisis y dimensiones umbo (CLIMENT, 2014)

En la figura 18 se observa la caracterización según la forma del cono, de acuerdo a esta tipología se asignan los nombres en la tabla de caracterización de las piñas.

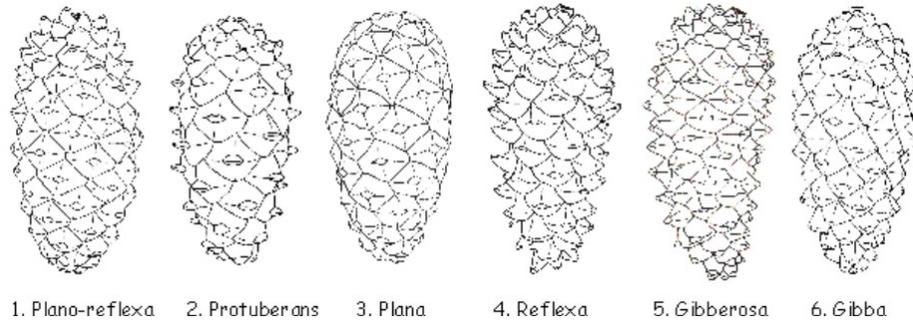


Figura 18. Clasificación según forma cono (CLIMENT, 2014)

Luego de final esta fase se observó que:

- Las piñas más jóvenes tienen un color verdoso y contienen mayor humedad, por el contrario, las de mayor edad son color café oscuro con algunas zonas blancas y su textura es porosa, seca y escamosa.
- Al realizar un corte transversal en una piña joven (color verde) y una de mayor edad (café oscuro) se evidencia las piñas verdes mantienen su forma intacta, es decir, tienen un porcentaje de humedad alto, mientras que las piñas de color café tienden a fragmentarse con mayor facilidad debido a que presentan un bajo grado de humedad.
- Las piñas encontradas en el cementerio Monte Sacro son de dimensiones mayores a las provenientes del Parque Arví, su geometría tiende a ser más esférica y simétrica, mientras que las demás eran cónicas y alargadas.
- El número de escamas varía según su procedencia, esto está relacionado con el clima y la temperatura en la que se realice la reproducción y el crecimiento.
- El geon que predomina es el cono Gibba y Reflexa
- El tamaño de la apófisis está relacionado directamente con el tamaño de la piña.
- El tipo de apófisis más común es el piramidal

6.1.2 Identificación de los patrones naturales, relacionados con la morfología de las coníferas:

Desde la geometría, la piña se define como un conjunto de espirales que se van retorciendo hasta llegar a unirse en un punto que es el que se une al tallo. Hay ocho espirales en la dirección de las manecillas del reloj, mientras que hay 13 que se acercan más rápidamente a la punta en contra de las manecillas del reloj. (Romero, 2005). Para entender este principio y aplicarlo en la composición de la piña se analiza entonces cada representación de su geometría, para esto se estudia la definición teórica de cada uno de ellos y se realiza una observación y experimentación formal con la piña.

El primer principio, es la sección áurea. Se define como la proporción que guardan los elementos; esto determina su simetría y, por lo tanto, que su apariencia y distribución formal (Rosenfel, 2014). La sección áurea también es conocida como «proporción divina» debido a que determina el ideal de belleza. La belleza estética radica en la simetría del objeto, en la proporción que guarda entre los elementos que la componen. En la Figura 19 se observa cómo se visualiza la sección áurea en la conífera.

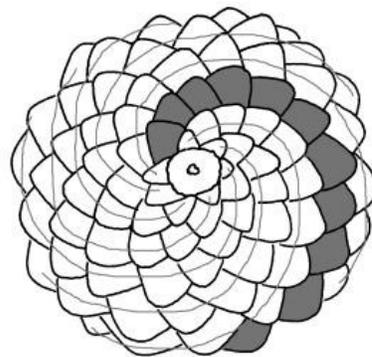


Figura 19. Representación de la sección áurea

El segundo principio, es el número de Fibonacci. Se define como aquellos números que forman parte de la sucesión infinita de números naturales donde cada número se calcula sumando los dos anteriores a él. (Ecured, 2010) La sucesión de Fibonacci es la siguiente sucesión de números enteros positivos: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 88, 144, ..etc. También se puede escribir como una "regla": la regla es $x_n = x_{n-1} + x_{n-2}$ donde: x_n es el término en posición "n" x_{n-1} es el término anterior (n-1) x_{n-2} es el anterior a ese (n-2)

Las semillas en el cono están organizadas en forma de espiral, de hecho, hay pares de espiral, si se pone un cono en posición vertical y se traza un espiral hacia arriba, se observa que uno va hacia la derecha y el otro hacia la izquierda. Los espirales tienen diferentes inclinaciones, una más pronunciada que la otra, a veces es la derecha y otras la izquierda; como se observa en la Figura 20.

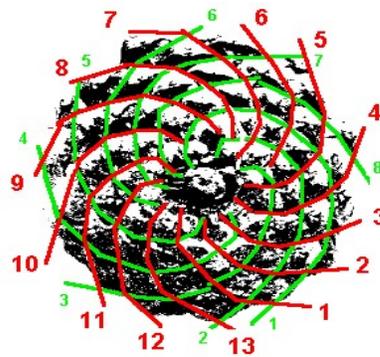


Figura 20. Representación Número de Fibonacci

Es interesante observar que si se empieza en cualquier punto del cono y se siguen los dos espirales hasta que se encuentran en la parte de atrás de éste, y se cuentan los pasos a lo largo de cada espiral siempre se obtendrá un par de números Fibonacci (Parveen, 2013).

Los conos se nombran dependiendo del conteo de los pasos. Los conos más grandes tienden a ser 5-8 o 8-5. También hay unos que son 8-13, son los más grandes. Los conos que ahora son 8-5 en su momento fueron un 5-3, por lo tanto, estos conos han evolucionado a través del tiempo y se puede ver en esta Figura 21

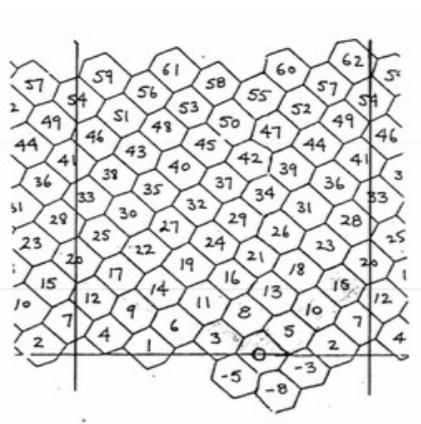


Figura 21. Disposición número de Fibonacci

El tercer principio, es la fractalidad. Un fractal es una forma o comportamiento matemático que describe fenómenos naturales. Son auto similares y teóricamente repiten en sí mismos su propio modelo a diferentes escalas una y otra vez hasta el infinito. Dicho de otro modo, un fractal es un patrón geométrico que se autorreplica infinitamente a escalas menores para producir formas y superficies irregulares que escapan de los dominios de la geometría clásica. Cada porción de un fractal, por más pequeña que esta sea, proyecta la figura completa a una escala más pequeña (Attenborough, 2010).

Las naturalezas de un fractal radican principalmente dos variables: la irregularidad al nivel de la forma, y el patrón a nivel del ritmo. Mientras que su característica intrínseca es el desdoblamiento autosemejante. En la Figura 22 (a) y (b) se observa esta ley de fractalidad en las piñas.

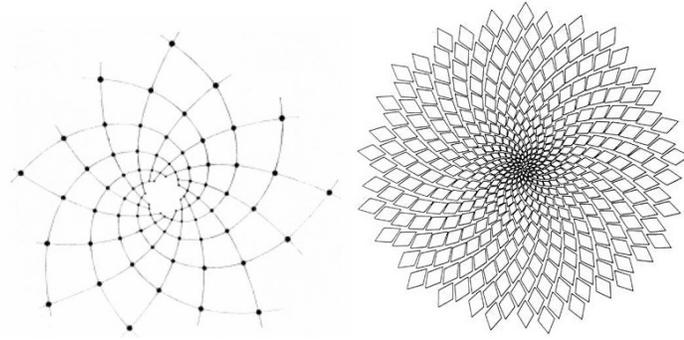


Figura 22. (a) y (b) Comportamiento fractal en las piñas

Teniendo en cuenta cada uno de estos principios y analizando la disposición morfológica de la piña, se extraen tres patrones naturales (ver Figura 23 (a), (b) y (c)), con los cuales se trabajarán y desarrollarán los patrones abstractos finales. Estos patrones finales serán la base para el diseño de la pared de doble piel, la cual cumplirá con las características morfológicas y el comportamiento de apertura y cierre, es decir, el mecanismo de adaptación al ambiente externo de las piñas.

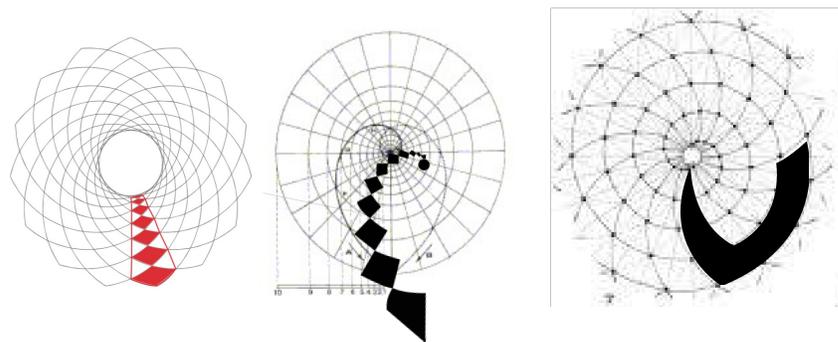
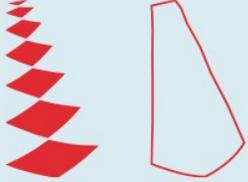
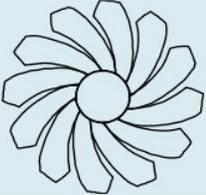
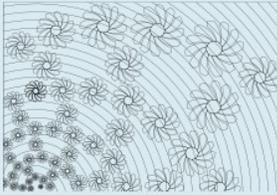
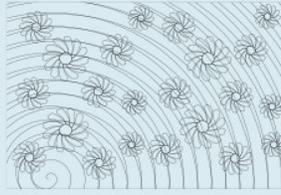
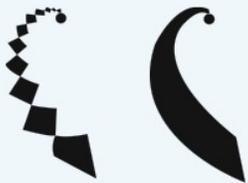
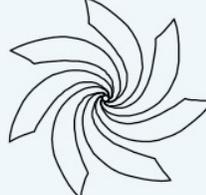
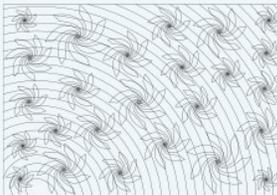
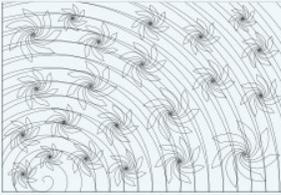
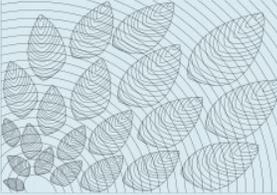
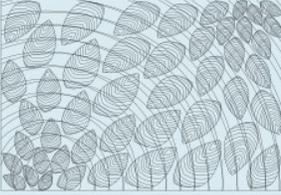


Figura 23 (a), (b) y (c): Patrón natural 1, 2, 3

Con base a estos patrones naturales definidos y los principios de la geometría explicados anteriormente se desarrolla una matriz con el fin de cruzar cada uno de ellos y

obtener resultados interesantes para ser aplicados en el modelo final. En la Figura 24 se observa la matriz que se realizó.

Tabla 1. Matriz de los principios vs patrones naturales identificados

Forma	Patrón	Sección áurea	Num. Fibonacci
			
			
			

La aplicación de los patrones en los principios se realizan a través de una abstracción de estos mismos, disponiendo un mismo principio en diferentes posiciones en un espacio plano determinado por un marco el cual simula la amplitud de una pared; los patrones van en un orden creciente el cual está establecido por el principio de Fibonacci (0, 1, 1, 2, 3, 5, 8) con una variación en la cual los patrones tienen unas dimensiones máximas en esta escala y comienzan a decrecer (0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 5, 3, 2, 1). Esta secuencia se utiliza tanto en los recuadros con el principio de Fibonacci como en el de sección áurea. La variación en la rotación de los patrones está implícita en la optimización de las corrientes de aire, es decir,

cuando el patrón se active por la acción del cambio de temperatura y de humedad éste permita que el flujo de aire se realice en cualquier dirección.

6.1.3 Relación de los patrones morfológicos y funcionales para verificar cuáles permiten mayores flujos de aire:

Luego de analizar y estudiar los casos anteriores, relacionados con el mecanismo y los materiales. Se desarrolló la siguiente fase, en la cual se relacionan los patrones morfológicos y funcionales para verificar cuáles permiten mayor flujo de aire. En la figura 29 (a) y (b) se muestra la construcción de los modelos.



(a)

(b)

Figura 24. (a) Construcción del modelo, (b) modelo antes de humedecer

En la figura 30 se muestra el patrón que mejor reaccionó a la humedad, el cual generó una mayor curvatura de los geones que componen el patrón, permitiendo así que pase mayor flujo de aire con relación a las otras experimentaciones, las cuales producen curvaturas parciales muy superficiales o simplemente no reaccionan a este estímulo de cambio de humedad.

6.2 Discusión

6.2.1 Análisis de los mecanismos de apertura y cierre a partir de las propiedades del material

Con el fin de que el modelo final cumpla con los comportamientos determinados a partir de la piña, se analizan los mecanismos de apertura y cierre a partir de las propiedades del material.

Las plantas pueden preparar sus tejidos para la reacción de sus órganos a cambios del entorno. Esto es posible mediante el control de la deformación anisotrópica de las celdas cada vez que se dilatan o contraen para ajustarse a las paredes celulares de su estructura. Las paredes de la celda están compuestas por resistentes fibras envueltas en una capa flexible y consistente, la cual está conformada por proteínas, pectina y hemicelulosas. Por lo tanto, la orientación de las fibras en cada celda es crucial para el adecuado funcionamiento del mecanismo, están alineadas de forma diferente para que en consecuencia las capas del tejido pueden causar la apertura en la dirección correcta. Este movimiento es causado por el flujo de agua dentro de las celdas, el cual causa cambios en éstas y en la geometría del tejido (Parveen, 2013)

En la Figura 25 se muestra gráficamente la disposición de las fibras y el mecanismo de apertura y cierre en las piñas.

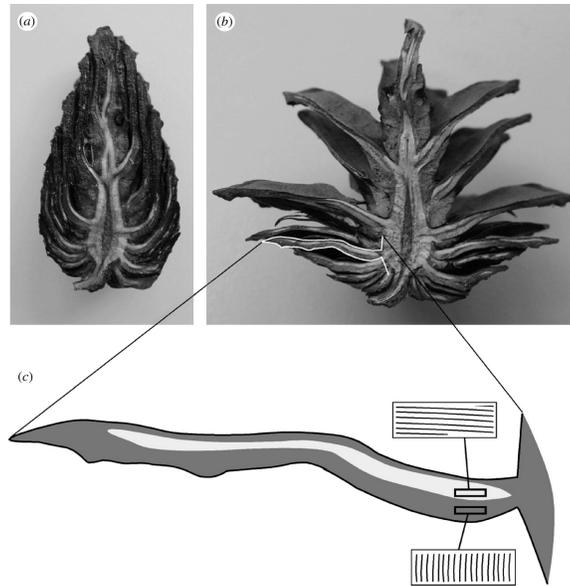


Figura 25. Disposición de las fibras corte transversal (a) como cerrado, (b) como abierto, (c) disposición de las fibras en la escama.

La explicación a este fenómeno natural es debido a que las fibras de la cara superior están orientadas a lo largo de la escama, y de manera paralela al eje o tallo, cuando hay una pérdida de humedad estas fibras presentan una contracción anisotrópica (propiedades diferentes según la dirección de las fibras), lo que hace que la escama se abra tienda a estar en una posición perpendicular al tallo del cono. En las fibras del lado inferior, están orientadas casi de manera perpendiculares al tallo del cono, evitando que la escama se abra, la acción combinada de estos dos tipos de fibras produce una flexión lenta y controlada de la escama.

Para profundizar más en este tema del mecanismo, cómo es su funcionamiento y cómo el material del que están compuestas las piñas aporta a este tipo de reacción, se realizó un estudio bibliográfico para explorar qué materiales existentes tienen características y comportamientos similares a las piñas.

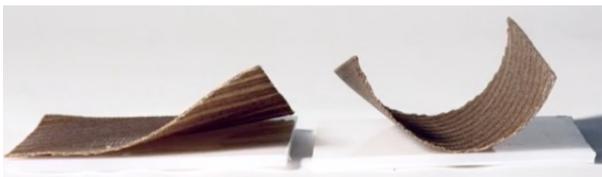
Actualmente, algunos de ellos se conocen como materiales reprogramables, los cuales son capaces de generar cambios radicales causados por estímulos del ambiente. Skylar Tibbits es un ingeniero que trabaja con su equipo en el Laboratorio de Auto-ensamblado del MIT, en conjunto desarrollan materiales inteligentes capaces de cambiar de forma al aplicarles agua, luz calor o electricidad (Zahumenszky, 2014)

Los investigadores del MIT están utilizando un tipo de fibra de carbono flexible proporcionada por una compañía llamada Carbitex. Añadiendo diferentes compuestos a la fibra, Tibbits y su equipo son capaces de generar cambios de forma bastante radicales que, además, son reversibles. Los estímulos que provocan esos cambios van desde descargas eléctricas a la simple luz. El proceso realizado por este equipo de investigadores se observa en la Figura 26 (a), (b), (c) y (d)

Otros materiales que están siendo estudiados actualmente son los polímeros con memoria de forma, los cuales son materiales poliméricos con la capacidad de recordar su forma original. Este efecto está relacionado con la combinación de la estructura y la morfología del polímero junto con el proceso y tecnología de programación de inclusión de la forma empleado. Es decir, es necesario un entrenamiento del material para que recuerde una forma determinada (Peterson, 2013)



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 26. (a) El material se moja para ver si reaccionan,. (b) En el material de la derecha las fibras están en diagonal mientras que en el de la Izquierda están horizontalmente, (c) En esta prueba la fibra está sólo en los extremos y el centro, se disponen de forma vertical por eso sólo se levantan los lados y (d) En esta prueba las fibras están en forma de rombos separados, por eso vemos como se levanta punta por punta (Peterson, 2013).

El mecanismo del efecto de memoria de forma en los polímeros puede producirse, no sólo por temperatura, sino también por luz o por reacciones químicas. Este tipo de polímeros responde a estímulos como calor, luz o agentes químicos cambiando su forma y su módulo elástico. Exhiben cambios radicales partiendo de una forma rígida hasta una flexible y elástica, regresando a su estado original sin ningún tipo de degradación del material. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 27.

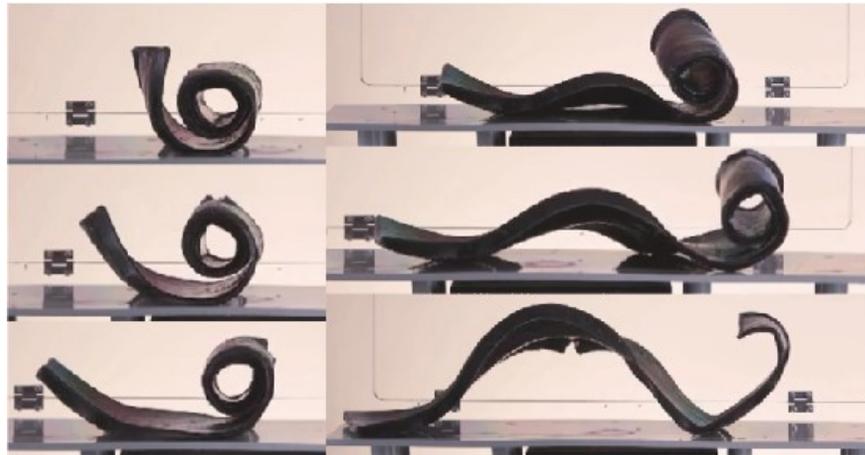


Figura 27. Lámina de polímero expuesto a cambio de temperatura (Peterson, 2013)

En el proyecto desarrollado por el diseñador Chao Chen, se muestra que otro material que reacciona a la humedad es la chapilla. Chao Chen al experimentar con las diferentes chapillas se dio cuenta que reaccionaban muy bien a la humedad, dependiendo de la disposición de las vetas la madera se curva y al secarse recupera parcialmente su forma (Chen, Chao Chen, designer and skecther, 2014)

Chao Chen en el desarrollo del proyecto de las coníferas trabajó con chapilla e hizo una combinación de éstas con estireno. En la figura 28 se muestran algunos tipos de estos materiales, los cuales fueron utilizados.



Figura 28. Chapillas y estireno (Chen, Chao Chen, designer and skecther, 2014)

6.2.2. Verificación la relación más óptima entre la morfología y el material en relación con el flujo de aire, a través de la creación y la experimentación de un modelo experimental que permita validar dicha relación



Figura 29. Patrón con mayores cambios al ser expuesto a humedad

A través de estos modelos se verifica la relación más óptima entre la morfología y el material en relación con el flujo de aire, a través de la creación y experimentación de un

modelo experimental que permita validar dicha relación, por medio de la observación sustancial de las transformaciones que tienen origen en cada patrón. Cada uno de las reacciones que se verifican en esta fase, arrojan datos con base al direccionamiento que deben tener las vetas, los refuerzos de los marcos obstaculizan en algunas partes el movimiento de los geónes del patrón; el patrón que reaccionó con mayor eficiencia es aquel que presentar una curvatura mayor en sus geónes por ende permitiendo que el flujo de aire que pase a través de estos sea mucho mayor.

6.2.3 Segunda fase de verificación experimental del patrón escogido

Ya ensamblados los marcos y patrones, se procede a la etapa de verificación de la relación la cual consta en someter las muestras a dos tipos de ambiente uno de humedad, que se logra rociando cada uno de los patrones con un spray que contiene agua a temperatura ambiente, este hace que la chapilla reaccione y se contraiga en el sentido de la veta que tiene la chapilla; y una condición de sequía que se realiza por medio de un secador de cabello marca Remington que alcanza una temperatura de 60° aproximadamente. la siguiente tabla evidencia el proceso de cambio de temperatura y humedad:

Tabla 2. Verificación de flujo de aire

Chapilla	Tiempo Mojado	Tiempo secador 60°	Comentarios
Pino	16 seg	2 mins	<p>Reacciona instantáneamente, toma una curvatura muy marcada. Cuando está expuesto al secador tarda 2 minutos en recuperar su forma un 30%</p> 
Roble	1:20 mins	2:10 mins	<p>Tarda más en reaccionar a la humedad, pero toma la forma esperada. Cuando está expuesto al secador tarda 2:10 minutos en recuperar su forma un 80%</p> 
Sapelly	1:21 mins	1:45 mins	<p>Reacciona desde que se empieza a mojar, pero al 1:21 se transforma en su totalidad Cuando está expuesto al secador tarda 1:45 minutos en recuperar su forma un 50%</p> 

Con la segunda verificación se constata que el sentido de las vetas infliere directamente en la curvatura que tome el geon de chapilla, es decir si se curva hacia arriba o

hacia abajo y el grado de contracción de esta. Las chapillas tienden a pandearse más cuando la dirección del geon va en sentido de las manecillas del reloj, aumentando esta reacción por efecto del aire caliente del secador sobre ella después de haber estado húmeda.

a través de esta nueva fase experimentativa se ponen en comparación los primeros modelos realizados los cuales tenían un marco con palillos de bambú los cuales no ofrecían la suficiente estabilidad para el experimento y los patrones no tenían total libertad, en la segunda verificación con marcos rígidos el movimiento de la chapilla es mucho más libre gracias a las disposiciones de las betas y a los pocos de sujeción que presenta en el sistema de sujeción. Los modelos de esta etapa se realizaron con un solo patrón, el cual fue el resultado de la primera verificación y arrojó los mejores resultados, con la segunda el modelo tiene gran libertad con la chapilla de roble, por la disposición de las vetas y por su a la capacidad de absorber humedad y de recuperarse con la ausencia de esta.

7. CONCLUSIONES

7.1. Hallazgos más importantes de la investigación

- El patrón abstraído aplicado en una superficie de doble piel o exoesqueleto, permite que el sistema funcione de manera eficiente en presencia de corrientes de aire húmedo; los patrones tienden a reaccionar permitiendo que ingrese un mayor flujo de aire a través de él, esta reacción se da por la transición de un ambiente relativamente seco a un flujo de aire húmedo. La transición entre estado inicial y curvatura es mucho más rápida que de la curvatura al estado inicial, debido a lo impredecible de los factores climáticos.
- Este sistema puede ser muy práctico en espacios cerrados donde haya un flujo de personas constante; debido a que la humedad producida por la transpiración, la respiración, y el calor producido por los cuerpos al estar en una constante actividad sumado al calor producido por posible maquinaria en dicho espacio, activaría de una manera constante el mecanismo de apertura y cierre en el sistema de doble piel, permitiendo que el flujo de aire (ventilación natural) se renueve constantemente aumentando el confort de las personas en este espacio.
- En ésta investigación se llevó cabo la creación de nuevos sistemas de doble piel basados no solo en la aplicabilidad de componentes morfológicos con un alto funcionamiento, sino también en el uso de mecanismos basados en las propiedades intrínsecas que tienen los materiales que reaccionan a la humedad. Después de realizar los modelos experimentales nos dimos cuenta que, si el modelo fuera más grande, funcionaría mejor.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, B. (11 de 08 de 2013). *The Creators Project*. Obtenido de <http://thecreatorsproject.vice.com/blog/hygroskin-sculpture-installation-mimics-real-skin>
- Attenborough, D. (15 de 11 de 2010). *La bitacora de humboldt*. Obtenido de <http://labitacoradehumboldt.blogspot.com.co/2010/11/fractales-la-geometria-divina-de-la.html>
- Castro, A. H. (10 de 6 de 2005). *Revista Digital Universitaria*. Obtenido de http://www.revista.unam.mx/vol.6/num7/art68/jul_art68.pdf
- Chen, C. (2005). *CHAO CHEN PRODUCT DESIGNER + SKETCHER*. Obtenido de <http://www.chaochen-design.com/water-reaction-1.html>
- Chen, C. (2015). *designboom*. Obtenido de <http://www.designboom.com/design/chao-chen-biomimetic-water-reaction-material-pine-cones-06-30-2015/>
- E. Reyssat, L. M. (1 de 07 de 2009). *THE ROYAL SOCIETY*. Obtenido de <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/early/2009/06/25/rsif.2009.0184>
- EcuRed. (10 de 01 de 2010). *EcuRed*. Obtenido de http://www.ecured.cu/N%C3%BAmoros_de_Fibonacci
- M. J. Climent, I. O. (04 de 10 de 2014). Obtenido de <http://www.secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/viewFile/6356/6283>
- Parveen, N. (18 de 05 de 2013). *mast.queensu.ca*. Obtenido de <http://www.mast.queensu.ca/~peter/inprocess/fibcones.pdf>
- Peterson, J. (10 de 01 de 2013). *Materiales Con Memoria*. Obtenido de <http://materialesconmemoria.blogspot.com.co/p/polimeros.html>
- Randall M. Erb, J. S. (16 de 04 de 2013). *nature communications*. Obtenido de <http://www.nature.com/articles/ncomms2666>
- Roberts, G. E. (18 de 02 de 2015). *Collage of the Holy Cross*. Obtenido de <http://mathcs.holycross.edu/~groberts/Courses/Mont2/Handouts/Lectures/Fib-web.pdf>
- Rosenfel, A. A. (1 de 09 de 2014). *algarabia*. Obtenido de <http://algarabia.com/ciencia/seccion-aurea-la-divina-proporcion/>
- Zahumenszky, C. (14 de 10 de 2014). *Gizmodo en español*. Obtenido de <http://es.gizmodo.com/disenan-un-tipo-de-fibra-de-carbono-programable-que-cam-1646105808>
- Parveen, N. (18 de 05 de 2013). *mast.queensu.ca*. Obtenido de <http://www.mast.queensu.ca/~peter/inprocess/fibcones.pdf>

- Zahumenszky, C. (14 de 10 de 2014). *Gizmodo en español*. Obtenido de <http://es.gizmodo.com/disenan-un-tipo-de-fibra-de-carbono-programable-que-cam-1646105808>
- Randall M. Erb, J. S. (16 de 04 de 2013). *nature communications*. Obtenido de <http://www.nature.com/articles/ncomms2666>
- E. Reyssat, L. M. (1 de 07 de 2009). *THE ROYAL SOCIETY*. Obtenido de <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/early/2009/06/25/rsif.2009.0184>
- Roberts, G. E. (18 de 02 de 2015). *Collage of the Holy Cross*. Obtenido de <http://mathcs.holycross.edu/~groberts/Courses/Mont2/Handouts/Lectures/Fib-web.pdf>
- Chen, C. (2015). *designboom*. Obtenido de <http://www.designboom.com/design/chao-chen-biomimetic-water-reaction-material-pine-cones-06-30-2015/>
- Chen, C. (2005). *CHAO CHEN PRODUCT DESIGNER + SKETCHER*. Obtenido de <http://www.chaochen-design.com/water-reaction-1.html>
- Alonso, B. (11 de 08 de 2013). *The Creators Project*. Obtenido de <http://thecreatorsproject.vice.com/blog/hygoskin-sculpture-installation-mimics-real-skin>
- M. J. Climent, I. O. (04 de 10 de 2014). Obtenido de <http://www.secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/viewFile/6356/6283>
- Castro, A. H. (10 de 6 de 2005). *Revista Digital Universitaria*. Obtenido de http://www.revista.unam.mx/vol.6/num7/art68/jul_art68.pdf
- Rosenfel, A. A. (1 de 09 de 2014). *algarabia*. Obtenido de <http://algarabia.com/ciencia/seccion-aurea-la-divina-proporcion/>
- EcuRed. (10 de 01 de 2010). *EcuRed*. Obtenido de http://www.ecured.cu/N%C3%BAmeros_de_Fibonacci
- Attenborough, D. (15 de 11 de 2010). *La bitacora de humboldt*. Obtenido de <http://labitacoradehumboldt.blogspot.com.co/2010/11/fractales-la-geometria-divina-de-la.html>
- Peterson, J. (10 de 01 de 2013). *Materiales Con Memoria*. Obtenido de <http://materialesconmemoria.blogspot.com.co/p/polimeros.html>