

# Arquitectura digital emergente conducida por luz solar a hologramas de transmisión

Joana Fonseca Pinho da Costa <sup>(1)</sup>

---

**Resumen:** En este artículo se presenta un estudio sobre el uso de sistemas digitales emergentes en arquitectura a través de la computación, condicionado por parámetros ambientales relacionados con el contexto y buscando alcanzar un objetivo específico. Se elige la dirección de la luz solar como el factor más condicionante del contexto del proyecto. Mediante la aplicación de procesos de diseño computacional, es posible predecir y simular la orientación solar de las soluciones de diseño, ajustando al mismo tiempo cada componente para que se adapte al mejor desempeño a su posición en el espacio. A través del cálculo se explora el potencial de los sistemas emergentes para organizar y manipular un gran número de componentes arquitectónicos en función de su orientación respecto a la superficie base, obteniendo así valores de variación adecuados de cada apertura hacia la luz solar, para lograr entre todos la uniformidad de la luz en el espacio interior. Teniendo en cuenta este marco, se crean las condiciones para que los hologramas en relieve puedan colocarse como una nueva forma de diferenciar el comportamiento de los componentes de la fachada, en función de la dirección de la luz solar, y de reducir así los costes de iluminación. Estos hologramas de transmisión de luz blanca del tipo arco iris pueden fabricarse en serie. Al tratarse de un sistema material pasivo, este tipo de hologramas pueden funcionar como un valor añadido para conseguir el control de la luz solar al ser incorporados en los edificios.

**Palabras claves:** Sistemas digitales emergentes - Arquitectura de iluminación natural - Hologramas artísticos

[Resúmenes en inglés y portugués en la página 133]

---

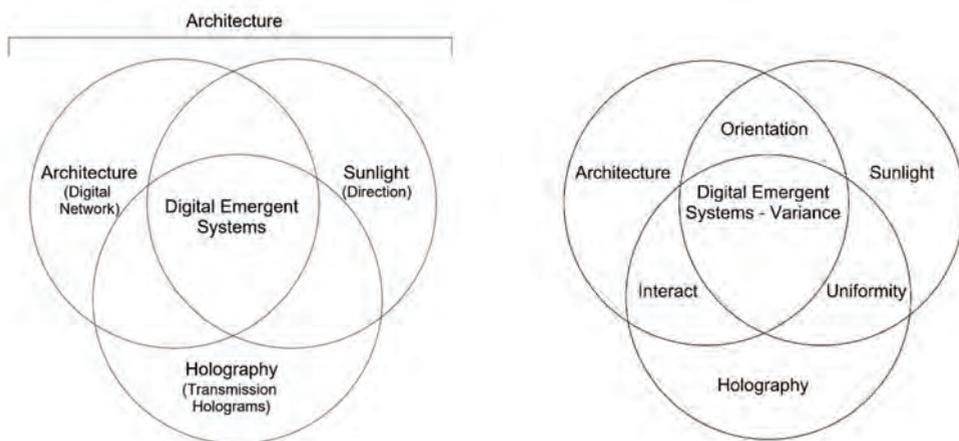
<sup>(1)</sup> **Joana Fonseca e Castro Pinho da Costa** es una arquitecta portuguesa, graduada en 2006 (ESAP, Escola Superior Artística) en Oporto, Portugal. Realizó su maestría en Arquitectura Biodigital en la UIC Barcelona (Universitat Internacional de Catalunya), en 2009. Completó su doctorado en arquitectura por la misma universidad en 2024, con el título “Emergent Architecture driven by Daylight uniformity for transmission Holograms”. Ha publicado el artículo “Evolutionary Computing” en la revista portuguesa *Arquitectura e Vida*, en el dossier de tecnología digital. Fue miembro del grupo de investigación sobre tecnologías robóticas en arquitectura de la Fundação Ciência e Tecnologia en 2014, incorporándose al entonces creado Laboratório de Fabricação Digital en la Faculdade de Arquitectura do

Porto. Ha sido miembro del Comité Científico Revisor de BIODIG 2020-4<sup>th</sup> International Conference for Biodigital Architecture & Genetics, UIC Barcelona.

En 2022, presentó el póster “Holographic art applications in new architectural practices”, SPIE Conference-Photonics West, San Francisco. Durante el último año la autora continuó colaborando en DFL para investigación práctica y tuvo la oportunidad de colaborar con HoloLab, Universidade de Aveiro para fabricar el holograma.

## 1. Introducción

La investigación relaciona los campos de la forma arquitectónica, los sistemas digitales emergentes, la luz natural y las aplicaciones del arte holográfico. Se centra en la generación de forma mediante la aplicación de sistemas digitales emergentes para desarrollar una forma paramétrica continua integrada en su entorno específico (*Ver Diagramas 1 y 2*).



Diagramas 1 y 2. (Fuente: Elaboración propia).

El objetivo de la investigación es demostrar la integración de la forma arquitectónica, y los beneficios del uso de sistemas emergentes. La emergencia hace de puente entre la arquitectura y el contexto. Los datos incluyen la adaptación al contexto a través de la forma emergente. En cuanto a la integración de la forma arquitectónica en el sitio, aquí nos cen-

traremos en la prioridad de este factor relacionado con la influencia de la luz natural, y en tener componentes como aplicación de arte holográfico.

Dado que la orientación siempre ha sido un factor determinante en la implementación de un edificio en el sitio, ahora puede ser más objetiva con el uso de procesos digitales en arquitectura, centrándose en la profundidad y la rotación de los componentes al reaccionar a un elemento atractor. Este tipo de concepción no es a través de procesos tradicionales sino a partir de procesos emergentes que recurren a la computación. Como explica Estévez (2021: 228), “no podemos seguir viviendo con el lujo de prescindir del clima correspondiente. (...) la forma arquitectónica surgirá, como guiada por el sol, como cualquier planta viva”.

El fenómeno de la emergencia aplicado a la arquitectura a través de sistemas emergentes digitales tiene la ventaja de controlar simultáneamente una enorme cantidad de variables condicionadas por un factor. En este trabajo, esto se demuestra mediante la adaptación de un gran número de componentes y de la estructura general de la forma. Los sistemas emergentes y el uso de algoritmos traducirán los parámetros de entrada en forma, sin eliminar la intención del arquitecto. Esos parámetros funcionan como restricciones a la forma emergente. La holografía se aplica entonces como la ventaja de difractar la luz solar y aportar dinamismo al espacio interior.

La investigación generó un gran interés por el rendimiento visual del ambiente de iluminación interior. Esto se consigue mediante la hipótesis de correlación entre la optimización del diseño orientada al rendimiento y la estética arquitectónica, donde la aplicación del arte holográfico sobre superficies planas dinamiza el espacio interior, y tiene una función fundamental como filtro de la luz solar debido a sus propiedades técnicas.

### 1.1. Investigación para la clasificación del sistema

El cambio en la morfología del sistema se debe a una continuidad de la red que se ve afectada por las mismas fuerzas. Aunque este campo de fuerzas sólo actúe sobre una parte del sistema, afectará a todo el sistema, lo que se justifica por la consistencia topológica y geométrica de las relaciones internas de todos los objetos, que se ven afectados por la misma fuerza externa. Cada elemento realizará un estado de transición integrado en un rango de variación.

“En el lenguaje newtoniano de la física elemental, la fuerza se reconoce por su acción de producir o cambiar el movimiento, o de impedir el cambio de movimiento. La fuerza actúa sobre la materia” (Thompson, 1945: 15-16).

En la relación entre la generación de la arquitectura y la fuerza de la luz solar, se busca un resultado emergente para la integración de los hologramas. Entonces la geometría permanece estática, pero las propiedades del material cambian en términos de transmisión de luz visual: “la arquitectura solar pasiva, (...), está alineada con una idea de baja tecnología, que, al fin y al cabo, está más cerca de una forma más ‘natural’, más sostenible, más económica” (Estévez, 2021: 278).

## 1.2. Desarrollo y definición del sistema y del algoritmo genético

Se explorará el potencial del cálculo de la forma emergente condicionada por los parámetros de la luz natural. El objetivo es conseguir un sistema orientado por la luz natural que pueda aplicarse a una fachada real. Como el fin de cubrir un rango más amplio de posibles curvaturas, incluida la doble curvatura, y con el objetivo de trabajar con una forma emergente, las estructuras funiculares son los sistemas emergentes seleccionados para el ejercicio práctico, y utilizados como forma base general. Funciona como el paisaje donde se orientarán los volúmenes a la escala urbanística, y también funciona como la fachada desde donde se orientarán los componentes (ventanas) utilizando la emergencia, a la escala del edificio. Esto último se demuestra a través del ejercicio práctico presentado. Además, la progresión de los experimentos tiene como objetivo reducir diferentes elementos, para facilitar la ejecución práctica.

Aplicación del holograma: las simulaciones como aplicación holográfica demostraron que se podía minimizar el efecto adverso de la luz solar directa y mejorar la uniformidad de la iluminación interior.

El sistema actual prioriza la orientación solar, utilizando un sistema de materiales pasivos que controlarán la luz solar a través de su geometría y luego también a través del comportamiento físico del holograma.

## 2. Background

### 2.1. Luz solar

La luz natural se integra y contextualiza mediante la forma.

“Si las ventanas no tienen un sombreado efectivo, ese arquitecto correría el riesgo de exponer la envolvente del edificio a una ganancia de calor solar incontrolada que aumenta el consumo de energía del edificio y crea espacios visualmente incómodos.

Los sistemas de sombreado fijos exteriores pueden controlar eficazmente la ganancia de calor solar y reducir el brillo, sin embargo, no abordan los ángulos variables del sol. Además, bloquean una fracción considerable de la luz natural y la accesibilidad visual debido a la excesiva masa física del dispositivo” (Ab-boushi y Khalid, 2013: 18).

“(…) mejorar la adaptabilidad de un edificio a su entorno puede reducir la necesidad de sistemas mecánicos y, durante las estaciones más suaves del año, el edificio puede incluso funcionar por sí solo” (Caldas, 2001: 20).

El funcionamiento del sistema implica reducir el uso de luz artificial y reducir la necesidad de calefacción y refrigeración. Estas premisas se justifican por la máxima orientación posible del sistema hacia la luz solar y el uso de hologramas que gestionarán la luz entrante a través de su rendimiento. Se garantizará la existencia de una iluminancia adecuada en el interior, combinada con un bajo contraste. Incluso si el resultado promedio cumple con el valor de iluminancia recomendado, se debe observar si existe una situación en la que la mitad del espacio está en sombra y la otra mitad tiene una iluminancia alta, para evitar el contraste visual y favorecer condiciones más uniformes.

“(...) la forma material se puede encontrar como el estado de equilibrio de resistencias internas y fuerzas externas” (Menges, 2007a).

## 2.2. Tecnologías digitales

“(...) la computación está refactorizando el papel de la geometría en la arquitectura al fusionar el poder del cálculo con el de la representación” (Sousa, 2020).

La geometría ya no se dibuja directamente, sino que se logra a través de reglas paramétricas establecidas a lo largo de un *script*.

“(...) diseñamos las relaciones y secuencias que habitan la arquitectura y que emergen como manifestación física. Ponderamos las influencias que los factores generadores del diseño tienen entre sí” (Gramazio y Kohler, 2008: 10),

entre la superficie del acabado interior y los paneles exteriores, ya que cada elemento se adapta a las condiciones locales de la superficie.

## 2.3. Interarticulación paramétrica de subsistemas

**2.3.1.** Por ejemplo, en un sistema general en el que se aplicará un sistema de componentes, se debe encontrar una solución personalizada para el componente, al tiempo que es imperativo reconocerlo como parte integral de un sistema formal (*Ver Figuras 1 y 2*).



1



2

**Figuras 1 y 2.** National Bank of Kuwait, Foster + Partners, 2022. Modulación de los huecos, variando su orientación, y creando con su conjunto franjas longitudinales que refuerzan la dirección del edificio (Fuente: Figura 1. Disponible en: <https://www.tkelevator.com.cn/cn-en/press/press-releases/thyssenkrupp-elevator-installs-unique-twin-elevator-systems-at-national-bank-of-kuwaits-iconic-new-head-office-113088.html>. Figura 2. Disponible en: [https://metenders.com/project\\_cms/project/national-bank-of-kuwait-headquarters-building-project](https://metenders.com/project_cms/project/national-bank-of-kuwait-headquarters-building-project)).

La interarticulación de los subsistemas, es decir, de la malla organizativa a nivel de la forma general, con el subsistema de patrones organizados por zonas y el subsistema de hologramas, hacen que todo el sistema funcione de manera coherente. Si, por un lado, se producen interacciones dentro de los subsistemas, como la adaptación entre componentes, también se producen interacciones entre subsistemas, por ejemplo, la superficie general y los componentes que se encuentran en ella. La configuración de los componentes también se vería comprometida por su orientación en la superficie. En cuanto al sistema de patrones, interactúa con el sol a partir de su ubicación dentro del sistema general: realiza el nivel emergente global donde los compartimentos aparecen como patrones en el tiempo o en el espacio.

**2.3.2.** Sistema compuesto por un único módulo con variación a lo largo de una red general previamente adaptada, que mantiene los módulos en su sitio. Se utiliza Rhino de McNeel como software principal y Grasshopper, como interfaz de programación visual: se analiza la adaptación estructural de la división regular en cuadriláteros y su profundidad, normal a la superficie. También se explorará la forma general emergente funicular, utilizando Kangaroo.

Los algoritmos genéticos, que especifican Galápagos, permitieron optimizar los parámetros, buscando la solución más adecuada. Suponiendo un promedio para cada zona, con el

fin de obtener las variaciones mínimas de módulos, de modo que las dimensiones de los paneles de soporte del holograma alcancen un mínimo de cantidad para la producción. Y lograr el mejor desempeño en los análisis solares y de luz natural en diferentes zonas de ubicación, es una simbiosis de geometría y luminosidad, y se probó utilizando el complemento Ladybug, en este caso, luz natural sobre una base anual.

### 3. Estudio

Cómo la calibración emergente relacionada con la holografía puede resolver de forma eficiente y sostenible la luz solar en el interior.

#### 3.1. Holografía

Un fenómeno de interacción luz-materia es la difracción, que ocurre cuando la luz incide en un obstáculo (o abertura). Si la luz del sol es muy intensa, el espectador verá el color de la luz, si la luz del sol es menos intensa este aspecto también ocurrirá con el color, y si no hay sol el holograma se vuelve transparente.

“os componentes con valores g-variables (el valor total de transmisión de energía a través de un material) se han convertido en una herramienta útil en la construcción de muros externos, permitiendo que los edificios respondan de manera diferente a los cambios en el clima” (Kolarevic y Malkawi, 2005, cap. 5).

Aprovechando las orientaciones solares que se consiguen con el sistema se puede introducir holografía en las aberturas de la fachada. Gracias a sus propiedades técnicas, los hologramas pueden difractar la luz del día y contribuir a lograr interiores más equilibrados. La dinámica de reacción constante la realiza el holograma integrado en el sistema de material pasivo.

Aunque la arquitectura generada tiene un carácter estático, resulta ser adaptativa y dinámica debido a su geometría combinada con el uso de materiales inteligentes. La envolvente del edificio actúa como una rejilla de difracción. La opción de hologramas influenciados por la luz natural es capaz de contribuir a distribuir de manera uniforme la luz, y filtrar los rayos UV en los edificios.

La holografía de transmisión de luz blanca, también conocida como holografía arco-iris (1968), es la técnica seleccionada para esta investigación, que después de la grabación y procesamiento químico, transmite la imagen a través de la incidencia de luz blanca, en este caso la luz solar.

Este tipo de holograma se puede visualizar con luz blanca y reconstruye una imagen tridimensional coloreada que presenta el espectro de la luz blanca (arco-iris). Los hologramas de transmisión se pueden visualizar con luz ordinaria, y permitieron el desarrollo de la técnica de estampación de hologramas para la producción en masa y su aplicación en

grandes superficies. Los hologramas en arquitecturas emergentes pueden ser rentables y suponer un potencial ahorro de luz.

### 3.2. Emergencia

La emergencia añade algo que antes no existía, “más que la suma de las partes” (Weinstock, 2010: 31), algo difícil de predecir.

Caracterización del sistema: está dentro del ámbito de *Weak Emergence* (Chalmers, 2006). Los sistemas de la categoría de *Weak Emergence* tienen respuestas inesperadas, aunque es posible deducir de dónde vienen, rastreando el camino anterior (reglas y condiciones iniciales). Si bien, puede requerir una buena cantidad de cálculo. Es un *Open System*. Las fuentes de energía, además de los inputs materiales, o informativos, o ambos, son externas al sistema, pero interactúan con él y ayudan a mantenerlo. El sol es el elemento seleccionado del contexto.

“Un punto de partida lógico para explorar la noción de patrón, a través del manejo arquitectónico de grandes y variables cantidades de información, es el diseño de fachadas, que normalmente están subdivididas o son de construcción modular” (Marble, 2012: 49).

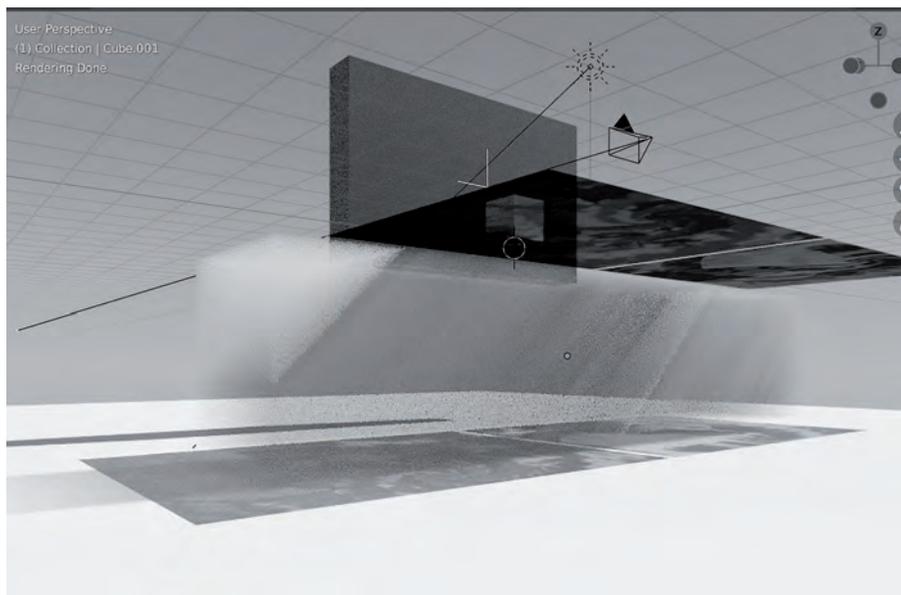
## 4. Caso práctico

**4.1.** Calcular la media solar a lo largo del año y del día, y conseguir el máximo tiempo de exposición solar en el ángulo más favorable, constituye una ventaja para la holografía de los sistemas emergentes, frente a la arquitectura tradicional. El objetivo es garantizar que la entrada de luz solar en el edificio esté controlada y que la propiedad holística del sistema proporcione uniformidad de luz en el interior.

En el trabajo actual, cada vez que cambia la ubicación geográfica del sistema, la forma de la base, y los componentes, cambia su configuración. Cada cambio en el entorno o cerca de los límites del sistema influirán en su configuración. Este trabajo parte de una única descripción, que incorpora las posibles variaciones del componente. Y en tecnologías digitales podemos referirnos a la variación inherente al sistema.

La respuesta del sistema es compleja ya que es capaz de leer permanentemente los datos que recibe del exterior. El sistema consigue crear una interacción entre el usuario y el entorno ya que es capaz de generar más de una respuesta. La relación que se establece entre el edificio y el ser humano, o el entorno, es más compleja, ya que se generan nuevos tipos de respuesta que no estaban programados inicialmente. Desde su descubrimiento, los hologramas de transmisión han sido muy apreciados tanto por su secuencia de colores (todo el espectro) como por su gran eficiencia de difracción. Y la parte que recibe la emulsión

sensible a la luz láser está orientada hacia el interior del edificio: la luz solar entra por detrás. Mientras, el ángulo de difracción es directamente proporcional a la longitud de onda de la luz. La difracción es más pronunciada cuanto mayor sea la longitud de onda, y también cuanto menor sea el tamaño de la rendija. Entonces, dependiendo de la orientación del holograma, su color será diferente debido a la incidencia de la luz solar (*Ver Figura 3*).



**Figura 3.** Luz solar difractada.

El holograma tiene una estructura que descompone la luz solar en los colores del arco iris, y cada uno de ellos sólo se visualizará dependiendo de la incidencia solar. Es decir, si hay incidencia solar el holograma difracta la luz, contribuyendo a su control dentro del espacio. El rendimiento del holograma será activado por el sol ya que aborda ángulos de incidencia variables. Y el ángulo de registro de la misma geometría óptica puede variar si el ángulo del componente excede los límites del rango del ángulo de registro. Se puede utilizar la misma geometría óptica, pero el color de la luz variará dependiendo de la orientación del componente hacia el sol. El ángulo de registro debe encajar dentro de los ángulos del componente. Y funcionará mejor cuando se observe desde el mismo ángulo de referencia durante el registro.

**4.2. Organización del sistema material: Local level y Global level del sistema (Simon 1996: 198).**

En el presente trabajo los niveles considerados dentro de la jerarquía del sistema están compuestos por:

- Un nivel local que incluye el sol en una posición específica y la ubicación geográfica de la intervención.
- Un nivel global compuesto por dos niveles: 1) la forma base del sistema material general, y 2) el sistema de patrones.

**4.3. Interacciones sucesivas entre diferentes niveles de organización e integración de componentes en una unidad de nivel superior.**

Los inputs definirán los principios de diseño, y están asociados al sistema local que comprende la ubicación del sistema material y la dirección del sol en una ubicación específica. A continuación, se realizarán un conjunto de operaciones, implementando así el algoritmo. Como experimento, el holograma de transmisión se fabrica en laboratorio para probar la paralaje horizontal, que promueve la organización de los colores difractados en el interior, moviéndose con el “observador caminante”. La forma general funicular junto con su patrón formado por la configuración de los componentes, son los outputs y están asociados al sistema global (*Ver Tablas 1 y 2*).

<i>Interdependent</i>	<b>Local system</b> – sun / location	<b>INPUTS</b>	<b>System definition</b>	<i>Interdependent</i>
	<b>Open system</b> Geometric parameters			
	<b>Emergence</b>			
	<b>Global system - form</b>	<b>OUTPUTS</b>	<b>Form and patterns formation</b>	
				<i>Interdependent</i>
				<b>General system – base form</b>
				<b>Patterns system</b>

Tabla 1.

Variables:		Goals:	Installation condition for:
Local ( <i>morphostasis</i> )	Location	Maximum uniformity of interior light with	Holograms
	Sunlight		
Parametric scripts / algorithms		Minimum variation of panel dimensions	
Global ( <i>morphogenetic</i> )	Base shape		
	Components/Patterns	Minimum variance of interior light	

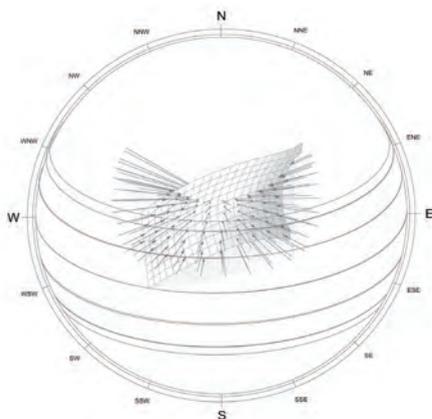
Tabla 2.

En resumen, el método empleado consiste en definir un módulo paramétrico regular y sus límites de variación (para representar la fachada de un edificio). Este mismo módulo se ubica específicamente en una superficie base general que, en este caso, es una superficie funicular, con anclajes ubicados intencionalmente de manera que la superficie esté lo más expuesta posible al sol. Y cabe destacar la importancia del lugar donde se implantará, ya que el sistema varía según la ubicación.

Se convierten en componentes estáticos al adaptar su forma a partir de una ubicación específica y son regulados por el sol. La luz solar actúa como una fuerza modeladora sobre la forma. Se reconoce la capacidad de los sistemas emergentes de verificar rápidamente la solución para la forma general y para sus componentes. En este caso cada apertura influye en el resultado final, que es un ambiente de luz interior equilibrado para la colocación de los hologramas.

La posibilidad de orientación respecto a la iluminación natural, y la uniformidad de la luz en su interior, hacen que estas estructuras tengan los requisitos para que los hologramas tengan su mejor desempeño, tanto en la difracción de la luz solar como en la visualización de la imagen holográfica. Aunque se prefiere el máximo aprovechamiento de la luz solar, por encima de un determinado nivel la mayor cantidad de luz natural no aportará ningún beneficio e introduce un punto de equilibrio a alcanzar, que es el control de las elevadas ganancias o pérdidas térmicas. En este caso, el uso de hologramas conduce a este necesario equilibrio que el sistema *generative* intenta localizar.

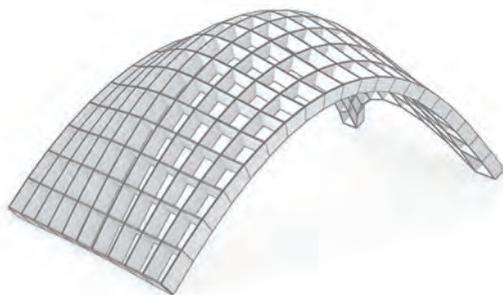
El sistema coincide entre los valores de incidencia y la configuración de la geometría (*Ver Figura 4*).



**Figura 4.**  
Superficie con  
análisis solar en  
Jardim do Rossio,  
Aveiro, Portugal.

La orientación oeste-este, del eje principal de la superficie, sería la más favorable en este caso, ya que permite que la superficie capte más sol. Además, para favorecer la entrada de luz, la estructura se extruyó en dirección normal a la superficie.

Este marco de estructura regular y cuadrilátera (*Ver Figura 5*) define el número, la ubicación y el tamaño de la base de cada componente. La estructura está diseñada, en este caso, alineada por la normal a la superficie con el fin de maximizar la entrada de luz. Mediante la aplicación de procesos de diseño computacional, como *form-finding*, en procesos *bottom-up* y de formación es posible predecir y simular la orientación solar de la solución de diseño.



5

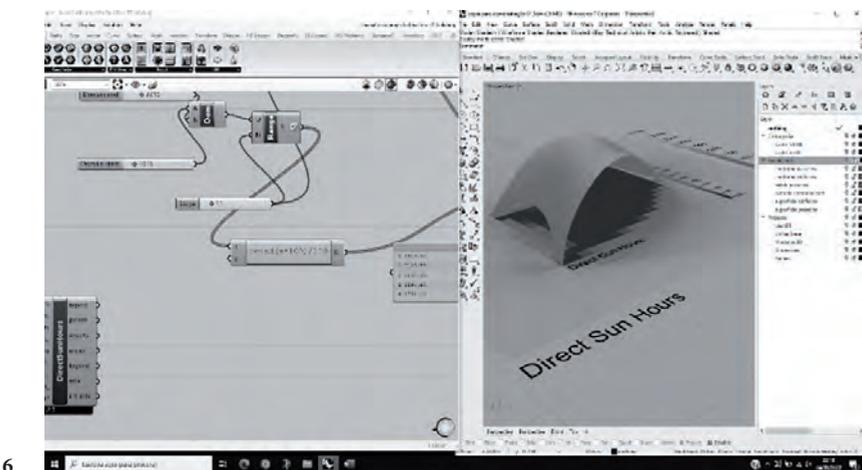
Los componentes desarrollan su forma a partir de la rejilla cuadrilateral que divide la superficie base general en 200 subsuperficies. Esa fue la división seleccionada para representar una fachada de un edificio.

El número de *Direct Sun Hours* en un año se imprimió en cada una de las subsuperficies y corresponde a un valor de apertura del componente, que encontrará su configuración final dentro de su rango de variación. Y la geometría final, además de estar limitada por los vectores de luz solar, también está relacionada con la doble curvatura de la forma que proporciona diferentes orientaciones al componente. Los dos niveles de los sistemas son interdependientes, ya que la diferenciación de patrones depende de la posición específica de cada componente en el sistema material general en relación con el sol. A su vez, el sistema material general depende del sistema de componentes para lograr el objetivo para su espacio interior. Entonces, la incidencia de los vectores solares en la geometría de la superficie y las *Direct Sun Hours* en un año se calcularán mediante computación.

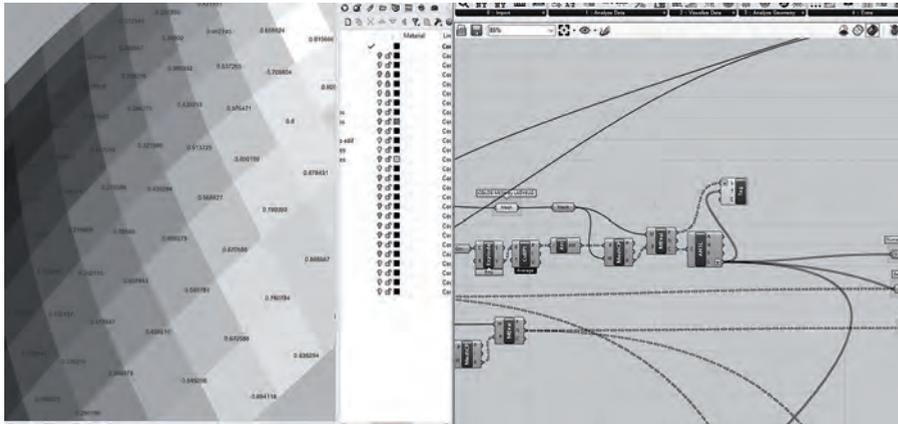
#### 4.4. Establecer un vector con la misma dirección que el Norte.

Se establece latitud, longitud y elevación de la ubicación del sitio (Ver Figura 6). Y el *Sun-Path* fue creado para obtener vectores (V). Para el cálculo de las *Direct Sun Hours* sobre la superficie será importante la orientación de las subsuperficies geométricas. El patrón final dependerá de la relación entre la dirección solar y la orientación de la geometría, regulando las dimensiones de las aberturas para conseguir el objetivo del sistema. Por tanto,  $8.760\text{horas} \times 200\text{superficies} = 1.752.000$  de cálculos, lo que hace imprescindible la ayuda de una gran potencia de cálculo.

Si el ángulo de incidencia es normal a la superficie, se obtiene la máxima iluminancia. Por el contrario, la iluminancia disminuye a medida que aumenta el ángulo de incidencia (Ver Figura 7).



6



7

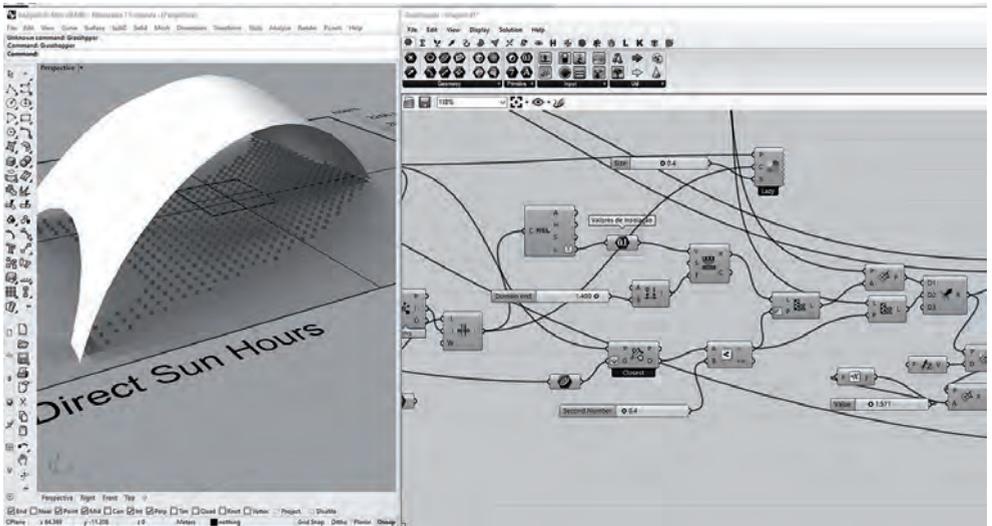
4.5. Traducir los colores de la malla en valores numéricos obteniendo su Luminancia a partir de un componente Split HSL, resultando en valores de 0 a 1. Y la *Base surface* (BS) es la geometría en la que se calcularán las *Direct Sun Hours* (DSH) siguiendo el procedimiento de usar los vectores ( $V$ ) incidentes en la superficie representada anteriormente, y de definir los *Legend Parameters* de modo que el resultado caiga en una escala de grises de negro a blanco, en una analogía matemática directa de sin luz a luz total.

Luego se obtuvo una malla de color degradado, donde negro significa sin DSHs y blanco significa DSHs máximos. Así se obtiene una metaestructura con horas de sol (información numérica) impresa en toda la forma que informará la variación paramétrica de la forma de los componentes. Y como el objetivo es que el componente crezca donde hay menos luz, fue necesario transformar estos valores de manera simétrica, utilizando la expresión  $1-x$ . Mientras, la proyección vertical de la BS sobre el suelo definió el área considerada como la geometría con resolución personalizada donde se calculará el DSH (Ver Figuras 8 y 9).



8

**Figuras 8 y 9.**  
Cuadrícula sobre el terreno donde se realizará el análisis  
b); *Direct Sun Hours*  
sobre el suelo a lo largo del año.



9

Los componentes se distribuyen en una rejilla cuadrilátera. La superficie de base se divide en una cuadrícula, lo que da como resultado subsuperficies similares a cuadriláteros (Ver Figuras 10 y 11).



10



11

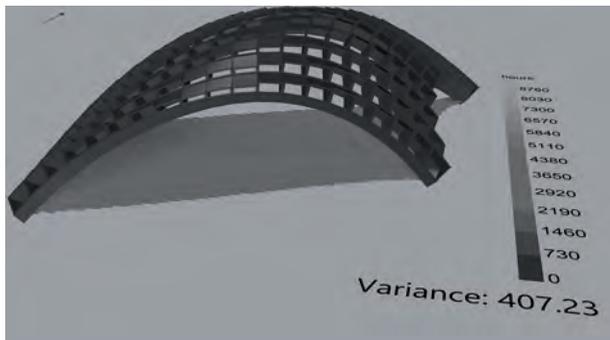
4.6. Establecer el tamaño de la cuadrícula como un número de subdivisión alto para obtener resultados precisos, o pequeños, para obtener una vista previa. Luego, se obtuvieron los resultados de DSH para cada celda de la cuadrícula (Ver Figura 12).



**Figura 12.**  
Aperturas calibradas, luego de ejecutar el algoritmo, haciendo coincidir el valor de la incidencia solar con un valor dado de apertura del componente.

Los datos se convirtieron del rango de horas de sol máximas a mínimas, a un rango normalizado que permite cuantificar directamente en metros la apertura del componente. El valor de la apertura del componente es inversamente proporcional al número de horas de sol. Si el número de horas de sol es el mínimo, entonces la apertura tendrá el valor máximo. Si el número de horas de sol es el máximo, entonces la apertura será la mínima y los números intermedios se darán en consecuencia.





15



16

**Figuras 15 y 16.** El cálculo de la varianza incluye parámetros de forma y parámetros de análisis solar.

Para encontrar un equilibrio satisfactorio entre las dos variables, la geometría de las aberturas fijas y la cantidad de luz en el interior, la varianza se aplicó a una serie de experimentos que evolucionaron con el objetivo de reducir la variación en las dimensiones de los paneles del edificio, debido a la viabilidad económica.

Los *Transmission holograms*

“mejoran significativamente la calidad de la iluminación natural de un edificio al limitar el factor de brillo, aumentar el factor de uniformidad de la iluminación y proporcionar visibilidad al exterior sin reducir el nivel de iluminación como lo hacen los sistemas de protección solar convencionales” (Bolte *et al.*, 2004: 9).

Los hologramas actuarán como una tecnología integral para el control de la luz solar. Esta opción para hologramas influenciados por la luz natural es capaz de contribuir a distribuir uniformemente la luz y filtrar los rayos UV. Los hologramas de la obra se presentan con estos colores en un momento determinado, pero cambiarán de color siguiendo las leyes de la óptica de la secuencia del arco iris tan pronto como el sol cambie de posición (Ver Figuras 17 y 18).



17



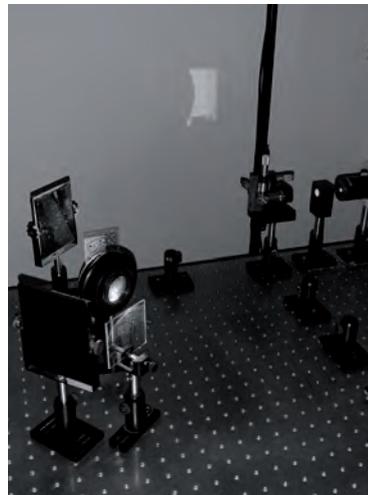
18

Su color varía siempre siguiendo la secuencia cromática del arco iris. Lo que varía en función de la mayor o menor exposición a la luz solar es la intensidad de la luz, pudiendo dar lugar a un holograma sin color alguno. Mientras, todos los ángulos se especifican respecto al vector normal de la abertura de la ventana. Y la eficiencia de área define la fracción del área total del holograma que está funcionando en un momento dado (posición solar). La fachada previamente calibrada funciona como una rejilla de difracción, cuando la rendija es más estrecha difracta más, cuando es más ancha difracta menos.

4.7. Ejercicio experimental de un montaje para transmisión de hologramas y verificación de paralaje horizontal (Ver Figuras 19 y 20).



19



20

Figuras 19 y 20. Set-Up Transmission Hologram.

El ángulo más importante es el que forma el haz de referencia con la normal a la placa holográfica sobre la que fue grabado (Ver Figuras 21 y 22).



21



22

**Figuras 21 y 22.**  
Los *White light transmission* holograms son atravesados por la luz del sol.

Los hologramas se laminarán en serie entre dos paneles de vidrio para garantizar una alta durabilidad.

En todos los hologramas se utiliza la misma geometría óptica para la producción en serie: la forma o el diseño del holograma no cambia y evoluciona en una paralaje horizontal. Esta paralaje horizontal permite organizar la dirección de difracción en el interior y sigue la dirección horizontal de la fachada.

Con los componentes arquitectónicos se realizaron 4 experimentos, **A, B, C y D**:

**A**–Teniendo como meta la máxima uniformidad de luz solar en el interior, y en consecuencia la mínima varianza.

**B**–Utilizando algoritmos genéticos para lograr la mínima variación en términos de tamaños de apertura, para promover la homogeneidad de dimensiones para el panel de soporte del holograma.

**C**–Rediseño de la subdivisión de la superficie con vértices desparejados, para una mayor uniformidad de tamaños de componentes y un mejor desempeño solar.

**D**–Reducir la cantidad de material.

Y se analizaron desde:

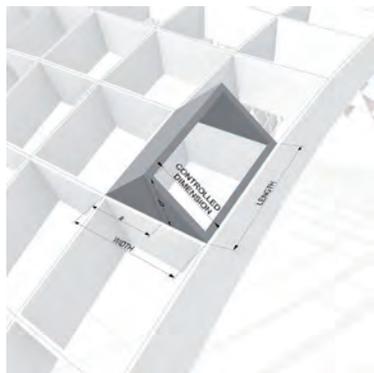
**Base Shape + Components:** *Emergent Design.*

**Context:** Sombra en el interior y alrededores.

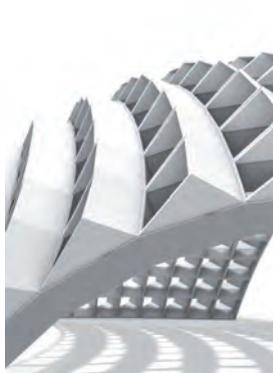
**Annual Variance:** Variación mínima de áreas de sol/sombra.

**Equinox:** Variación mínima de áreas de sol/sombra durante un equinoccio.

**Experiment A – Components aperture conditioned by sunlight**  
(Ver Figuras 23, 24, 25, 26, 27 y 28).



23



24



25



26



27



28

**Experiment B – Genetic Algorithm to reduce the variation of the panels from building components.**

Con *Evolutionary Solvers*, el algoritmo busca una optimización de las dimensiones del módulo y devuelve el valor de su función de *aptitude*, el “fitness”, que en este caso es para el mínimo de elementos diferentes, la máxima uniformidad de luz posible (Ver Figura 29).

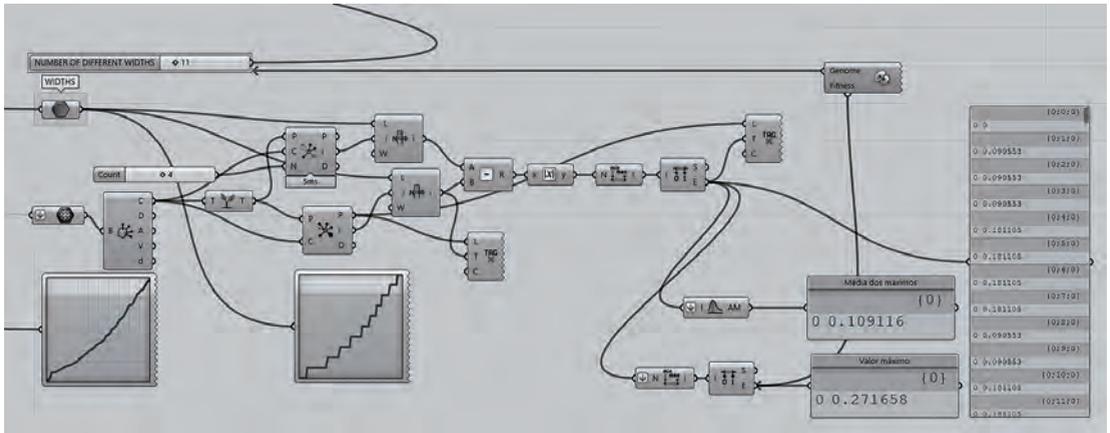


Figura 29. Algoritmo genético en Grasshopper.

El algoritmo genético intenta lograr la mínima variación de dimensiones reduciendo el número de paneles diferentes de “dimensión controlada”. La *aptitude* se calcula comparando la diferencia con la “dimensión controlada” adyacente para lograr las transiciones más graduales. Los cambios en función de sus vecinos más cercanos dan como resultado patrones evolutivos (Ver Figura 30).

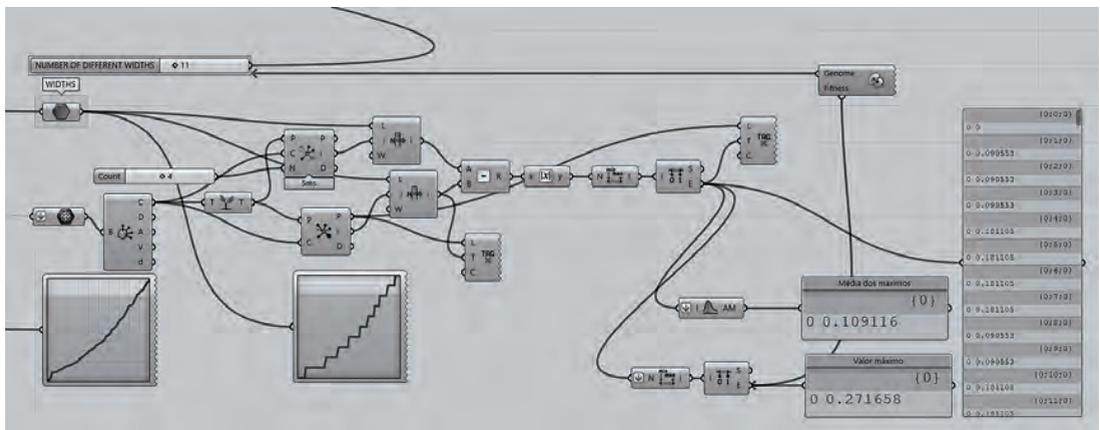


Figura 30. Evoluciona a través de una serie de pasos de tiempo discretos de acuerdo con un conjunto de reglas basadas en los estados de los vecinos.

- a. Este *solver* se utilizó para encontrar el equilibrio adecuado entre una cantidad mínima de diferentes anchos de panel de holograma y mantener la máxima continuidad.
  - b. La variedad de valores de las células se reduce a un genoma (G) entre 2 y 200, lo que da como resultado una continuidad diferente y menos gradual entre las células.
  - c. Para evaluar la continuidad (C) en cada célula, se mide cada una de las 4 células más cercanas con respecto a la primera y se tiene en cuenta el valor más alto.
  - d. El algoritmo genético se ejecuta con Galapagos y el resultado es 11, por lo que se agrupan los tamaños de panel por dimensiones en 11 conjuntos distintos.
- Este proceso pretendía evitar el aumento exponencial de elementos, reduciendo el número de variaciones de la “dimensión controlada” de los paneles para su fabricación (Ver Figura 31).

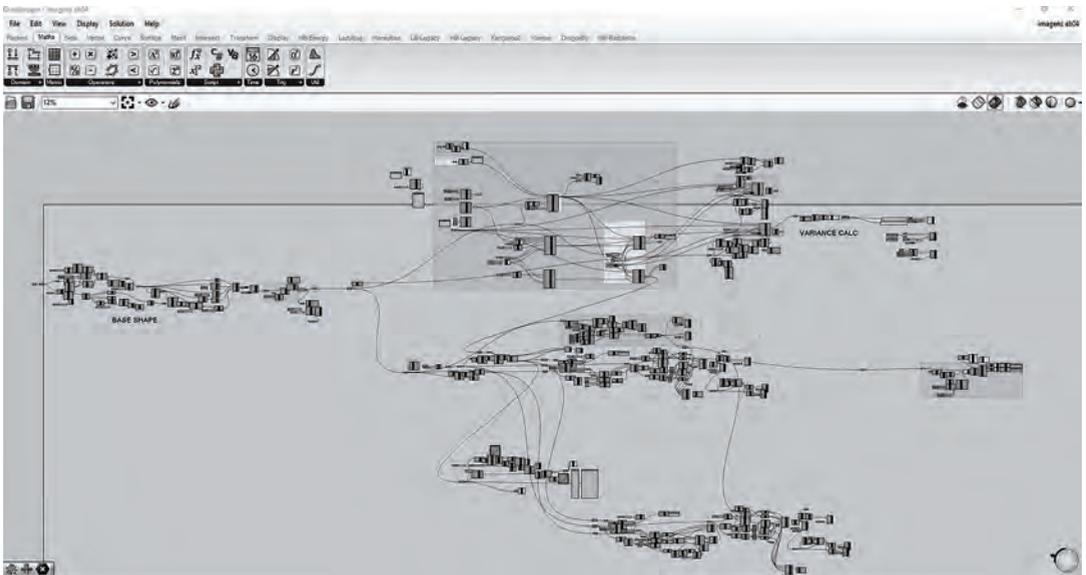


Figura 31. General System's Algorithm.

## 5. Resultados

La dicotomía luz solar-geometría produce respuestas diferentes en la forma general y en la organización de sus componentes cada vez que cambia la ubicación. Por lo tanto, para diferentes ubicaciones geográficas las soluciones de diseño generadas por el algoritmo difieren considerablemente con el fin de mejorar su desempeño ambiental, de una única función objetivo.

A través de la geometría relacionada con la luz solar, con la asistencia computacional de sistemas digitales emergentes, se vuelve rápido el dar una respuesta coherente para una ubicación determinada.

En el caso del holograma, la dinámica en el espacio se produce de forma consecutiva. Los cambios de color en tiempo real, afectados por la incidencia solar, siguen siempre la secuencia de los colores del arco iris, y la imagen es diferente para cada espectador en función de su movimiento.

La evolución continua en términos de optimización, en el sentido de reducir el número de elementos de soporte diferentes de los hologramas, también se refleja y justifica la progresión en el diseño de los componentes, así como la posibilidad de orientar mejor los componentes para aprovechar al máximo las características del holograma de transmisión.

La geometría de los componentes está alimentada y limitada por los vectores de luz a lo largo del año y relacionada con la doble curvatura de la forma, mediante un guion donde se definen reglas paramétricas. El número de horas de sol impresas en toda la forma informará la variación paramétrica de la forma de los componentes. El componente junto con el holograma actúa activamente a través de una simbiosis geométrica-luminosa en la modulación de la luz solar. Partiendo de una posición nula, las dos primeras pruebas muestran una fachada con las aberturas todas iguales, abiertas al máximo o abiertas al mínimo. La tercera prueba presenta una fachada con las aberturas emergentes de las componentes condicionadas por su orientación al sol para obtener su objetivo común de uniformidad de la luz solar dentro del espacio (*Ver Diagrama 3*).

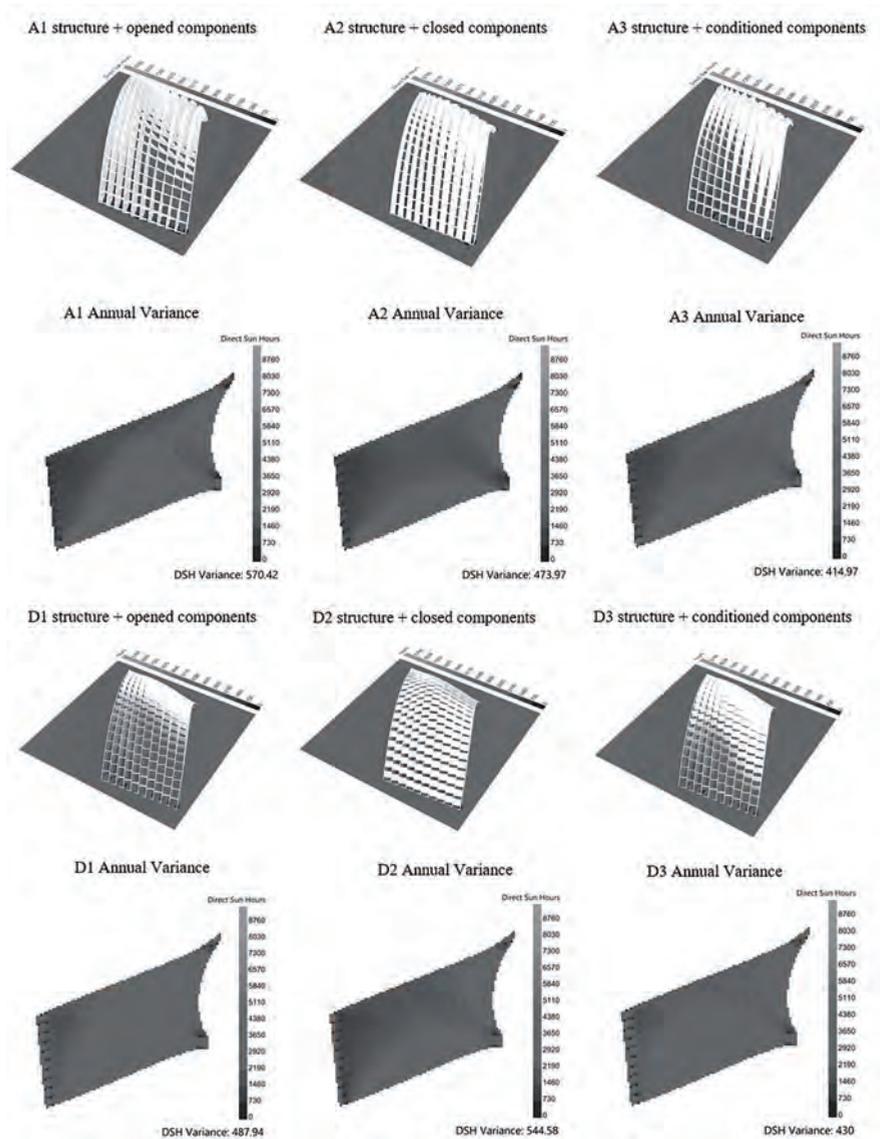
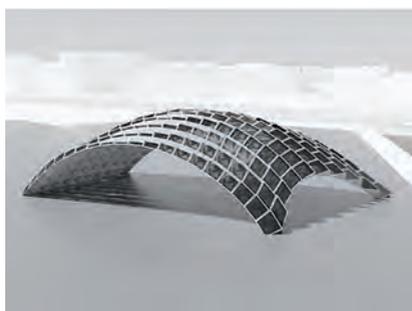


Diagrama 3.

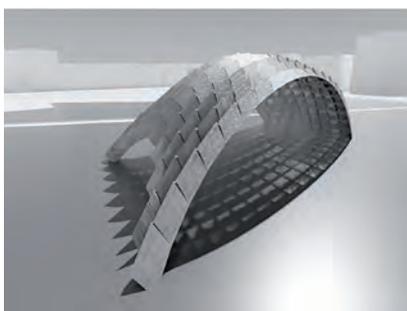
Después del cálculo, en la tercera prueba, siempre se obtuvo el resultado previsto del menor valor de varianza (A3, B3, C3, D3).

## 6. Discusión

En este trabajo el método propuesto incorpora la emergencia en la evolución del sistema pasivo de diseño arquitectónico. Los experimentos fueron desarrollados para validar dicho método. El algoritmo busca soluciones de alto desempeño, y el programa de simulación evalúa la calidad de esas soluciones en función de los criterios definidos por el arquitecto. La intención es precisamente encontrar la solución a través de la geometría arquitectónica. La meta-estructura, en programación, se denomina arquitectura del sistema. En el caso de este trabajo, el sistema es abierto y dinámico en la medida en que en sus diferentes niveles se busca un objetivo común, y para ello se condiciona una búsqueda de la forma por el sol. La forma final no es conocida de antemano, sólo se revela en el momento considerado como el final del proceso. La definición paramétrica genérica y las definiciones relacionales entre componentes para lograr el objetivo común permiten que el sistema sea aplicado para diferentes geometrías. Y, aprovechando los valores de apertura obtenidos con las orientaciones solares del sistema, la colocación de estos hologramas en las fachadas de los edificios permite la difracción de la luz solar a través de la ventana hacia el interior, debido a sus propiedades técnicas, y promueve una interpretación única de la combinación de luz, espacio y tiempo (*Ver Figuras 32, 33 y 34*).



32



33



34

## 7. Conclusiones

La arquitectura se puede generar como un sistema:

- Sistema material pasivo.
- Cambios de ubicación geográfica–cambios en la forma del sistema en consecuencia.

En este estudio el objetivo de la organización formal mediante sistemas emergentes fue la uniformidad de la luz en el interior para la posterior colocación de hologramas. Ahí trabajan en conjunto, el componente y el holograma, ya que cuanto más fina sea la abertura, más eficiente es la difracción y cuanto mayor sea la abertura, menor será la difracción. Esto significa que, en las aberturas con menor incidencia solar, que son las más grandes, el holograma difractará menos, por lo que entrará más calor al edificio donde es necesario. Y al revés, en las aberturas con mayor incidencia solar, que son las más finas, el holograma difractará cerca de su capacidad máxima, evitando un calentamiento excesivo.

*Sunlight-local system / Output* es variación de forma.

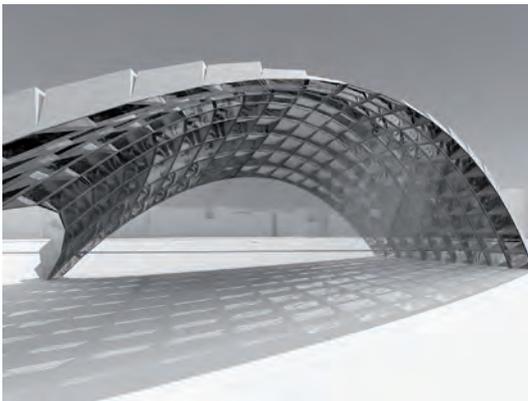
Se establece una búsqueda de objetivos - el sistema se adaptará.

*Genetic algorithm* menor variación de las dimensiones del material.

La difracción holográfica se beneficia de:

- Exposición solar controlada;
- Uniformidad de la luz.

Cuando la variación de los componentes surge de las reglas del sistema, afectadas por la luz solar, los resultados están mucho más cerca del objetivo final que cuando su configuración es la misma para todos. Y, si por casualidad uno rotase el sistema material, automáticamente cambiaría su respuesta formal (*Ver Figura 35*).



35

## Agradecimientos

Quiero agradecer a ambos directores de mi tesis doctoral, Prof. Dr. Alberto T. Estévez por fundar e impartir el Máster de Arquitectura Biodigital (UIC Barcelona-Universitat Internacional de Catalunya), donde me introduje en estas nuevas tecnologías, y por ser una influencia entusiasta sobre la arquitectura biológica y digital. También agradecer todas las conversaciones y orientación del trabajo. Y al Prof. Dr. José Pedro Sousa (DFL-CEAU-FAUP - Facultad de Arquitectura de la Universidad de Porto, Portugal), que me dio acceso a estas tecnologías en el Laboratorio de Fabricación Digital, donde pude probar los principios defendidos en el trabajo. Me gustaría destacar la oportunidad de asistir a las clases de Geometría Constructiva 2 en la FAUP, y a las conferencias que tuvieron lugar a lo largo del año académico en esta materia. También agradecer todas las conversaciones y orientación del trabajo. En este proyecto, me gustaría agradecer asimismo al Dr. Pedro Azambuja Varela, igualmente de la DFL, que me ayudó a ejecutar la idea utilizando el diseño paramétrico. Y quisiera agradecer una vez más a la artista multimedia Prof. Dra. Maria Isabel Azevedo (ID+, Instituto de Investigación en Diseño, Arte, Medios y Cultura, Universidad de Aveiro, Portugal), que investiga las relaciones entre arte, ciencia y tecnología en Portugal. Así aprovechamos la posibilidad de orientar estas estructuras emergentes para aplicar las instalaciones holográficas.

## Referencias bibliográficas

- Abboushi, A., & Khalid. (2013). *The Effects of Adaptive Shading and the Selective Reflector Light Shelf on Office Building Energy Efficiency and Daylight Performance in Hot Arid Regions* [University of Arizona]. <http://hdl.handle.net/10150/291050>
- Bolte, M., Gardette, J.L., Müller, H.F.O., Knabben, L., Bahaj, A.S., James, P., Geith, A., Römhild, T., Jentsch, M., Ötes, A., & Topp, T. (2004). Holographic Optical Elements (HOE) for High Efficiency Illumination, Solar Control and Photovoltaic Power in Buildings. Umwelt-Campus Birkenfeld Entwicklungs- und Management GmbH, Birkenfeld.
- Caldas, L.G. (2001). *An Evolution-Based Generative Design System: Using Adaptation to Shape Architectural Form*. MIT, Massachusetts Institute of Technology.
- Chalmers, D. J. (2006). Strong and Weak Emergence. *The Re-Emergence of Emergence - The Emergentist Hypothesis*, 244–254
- Estévez, A.T. (2021). *Biodigital Architecture and Genetics II*. iBAG - UIC Barcelona.
- Gramazio, F., & Kohler, M. (2008). *Digital Materiality in Architecture*. Lars Muller Publishers.
- Kolarevic, B., & Malkawi, A.M. (eds.). (2005). *Performative Architecture - Beyond Instrumentality*. Spon Press.
- Marble, S. (2012). *Digital Workflows in Architecture, Design-Assemble-Industry*. Birkhauser.
- Menges, A. (2007a). *Computational Morphogenesis: Integral Form Generation and Materialization Processes*. <https://www.researchgate.net/publication/30873036>
- Simon, H.A. (1996). *The Sciences of the Artificial* (3ª ed.). MIT Press.
- Sousa, J.P. (2020). Calculated Geometries. Experiments in Architectural Education and Research. *Thinking, Drawing, Modelling*, 131–143.

Thompson, D. W. (1945). *On Growth and Form*. The Macmillan Company.

Weinstock, M. (2010). *The Architecture of Emergence: The Evolution of Form in Nature and Civilisation*. Wiley.

---

**Abstract:** This article presents a study on the use of emerging digital systems in architecture through computation, conditioned by environmental parameters related to the context and seeking to achieve a specific objective. The direction of sunlight is chosen as the most conditioning factor of the project context. By applying computational design processes, it is possible to predict and simulate the solar orientation of the design solutions, while adjusting each component to best suit its position in space. Through computation, the potential of emerging systems is explored to organise and manipulate a large number of architectural components according to their orientation with respect to the base surface, thus obtaining appropriate variation values of each opening towards sunlight, in order to achieve between them uniformity of light in the interior space. Taking this framework into account, the conditions are created so that relief holograms can be placed as a new way of differentiating the behaviour of the façade components, depending on the direction of the sunlight, and thus reducing lighting costs. These rainbow-type white light transmitting holograms can be mass-produced. As a passive material system, this type of holograms can function as an added value to achieve sunlight control when incorporated in buildings.

**Keywords:** Emerging digital systems - Daylighting Architecture - Artistic holograms

**Resumo:** Este artigo apresenta um estudo sobre o uso de sistemas digitais emergentes na arquitetura por meio da computação, condicionada por parâmetros ambientais relacionados ao contexto e buscando atingir um objetivo específico. A direção da luz solar é escolhida como o fator mais condicionante do contexto do projeto. Com a aplicação de processos de design computacional, é possível prever e simular a orientação solar das soluções de design e, ao mesmo tempo, ajustar cada componente para melhor se adequar à sua posição no espaço. Por meio da computação, o potencial dos sistemas emergentes é explorado para organizar e manipular um grande número de componentes arquitetônicos de acordo com sua orientação em relação à superfície de base, obtendo, assim, valores de variação apropriados de cada abertura para a luz solar, a fim de obter entre eles a uniformidade da luz no espaço interno. Levando em conta essa estrutura, são criadas as condições para que os hologramas em relevo possam ser colocados como uma nova maneira de diferenciar o comportamento dos componentes da fachada, dependendo da direção da luz solar, e assim reduzir os custos de iluminação. Esses hologramas transmissores de luz branca do tipo arco-íris podem ser produzidos em massa. Como um sistema de material passivo, esse tipo de holograma pode funcionar como um valor agregado para obter o controle da luz solar quando incorporado em edifícios.

**Palavras-chave:** Sistemas digitais emergentes - Arquitetura de iluminação natural - Hologramas artísticos