

ANÁLISIS DE MORFOLOGÍAS EVOLUTIVAS CON CFD: MEJORAR LA VENTILACIÓN NATURAL EN VIVIENDA DE PATIO CENTRAL, EN ZONAS SEMI CÁLDIDAS DE LATINOAMÉRICA

ANALYSIS OF EVOLUTIONARY MORPHOLOGIES WITH CFD: IMPROVING NATURAL VENTILATION IN CENTRAL COURTYARD HOUSING, IN SEMI-WARM AREAS OF LATIN AMERICA

ANÁLISE DE MORFOLOGIAS EVOLUTIVAS COM CFD: MELHORIA DA VENTILAÇÃO NATURAL EM HABITAÇÕES DE PÁTIO CENTRAL EM ÁREAS SEMI-QUENTES DA AMÉRICA LATINA

Diego Rodríguez-de-Ita

Magíster en Arquitectura

Estudiante de Doctorado, Profesor del Departamento de Arquitectura y Diseño Industrial, Facultad de Arquitectura

Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México

<https://orcid.org/0009-0001-2796-6484>

diego.rodriguezdt@uanl.edu.mx (Autor de Correspondencia)

Liliana Beatriz Sosa-Compeán

Doctorado en Filosofía de la Arquitectura y Asuntos urbanos

Profesora Investigadora en la Facultad de Arquitectura y Jefatura de Investigación en Diseño Industrial

Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México

<https://orcid.org/0000-0001-8811-3218>

Liliana.sosacm@uanl.edu.mx



RESUMEN

Este estudio busca reducir la demanda energética en la arquitectura mediante el uso de estrategias pasivas, específicamente enfocadas en la ventilación natural interior. Se realizaron simulaciones computacionales (CFD: Computational Fluid Dynamics) y se utilizó algoritmos paramétricos en Grasshopper, en que se aplicó una metodología basada en el diseño evolutivo. El objetivo es optimizar el diseño de viviendas unifamiliares de patio central con ventilación cruzada, al evaluar cómo la morfología de las viviendas influye en su desempeño en términos de ventilación natural. A través de procesos de morfogénesis y diseño evolutivo; se generaron más de 200 variaciones morfológicas (muestras), cuyos resultados permitieron seleccionar los modelos con mejor desempeño. Los genes más exitosos se combinaron en nuevas generaciones para repetir las evaluaciones, lográndose finalmente un modelo de vivienda que optimiza la ventilación hasta 2.5 veces más que el modelo tradicional de casa con patio central.

Palabras clave

diseño evolutivo, ventilación natural, arquitectura sustentable, CFD en vivienda de patio central.

ABSTRACT

This study aims at reducing energy demand in architecture through passive strategies, specifically focusing on natural indoor ventilation. Computational simulations (CFD: Computational Fluid Dynamics) were conducted, and parametric algorithms in Grasshopper were employed, applying a methodology based on evolutionary design. The aim is to optimize the design of single-family courtyard houses with cross-ventilation by evaluating how their morphology influences their performance in terms of natural ventilation. Through morphogenesis processes and evolutionary design, more than 200 morphological variations (samples) were generated, whose results allowed the selection of the best-performing models. The most successful genes were combined in new generations to repeat the evaluations, ultimately achieving a housing model that optimizes ventilation up to 2.5 times more than the traditional courtyard house model.

Keywords

evolutionary design, natural ventilation, sustainable architecture, CFD in courtyard housing.

RESUMO

Este estudo tem por objetivo reduzir a demanda de energia na arquitetura por meio do uso de estratégias passivas, com foco específico na ventilação natural interna. Foram utilizados a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) e algoritmos paramétricos no Grasshopper, nos quais foi aplicada uma metodologia baseada em design evolutivo. O objetivo é otimizar o projeto de residências unifamiliares com pátio central e ventilação cruzada, avaliando como a morfologia das residências influencia seu desempenho em termos de ventilação natural. Por meio de processos de morfogênese e design evolutivo, foram geradas mais de 200 variações morfológicas (amostras), cujos resultados permitiram a seleção dos modelos de melhor desempenho. Os genes mais bem-sucedidos foram combinados em novas gerações para repetir as avaliações e, por fim, chegou-se a um modelo de habitação que otimiza a ventilação até 2,5 vezes mais do que o modelo tradicional de casa com pátio central.

Palavras-chave:

design evolutivo, ventilação natural, arquitetura sustentável, CFD em habitação com pátio central

INTRODUCCIÓN

En el campo del análisis arquitectónico conforme a simulaciones computacionales, la utilización de herramientas digitales basada en la dinámica de fluidos computacionales (CFD) ha permitido avances significativos en el diseño, particularmente en la mejora de la ventilación natural. Enfocados en hacer un aporte a la arquitectura biofílica (Zhong et al., 2021) Este análisis parte de la estrategia de diseño sobre: "la morfología del entorno construido donde esta influye directamente en la dinámica del flujo de aire, afectando la distribución de la ventilación natural y la velocidad de las corrientes dentro del espacio" (ASCE. 2023a, pág. 107). Pudiendo mejorar las condiciones de confort (El Ahmar et al., 2019). Así mismo disminuir la demanda energética. Este análisis se enfoca en optimizar la tipología de vivienda de patio central con métodos paramétricos, Según Bensalem (1996):

Los estudios limitados sobre patios indican que, con tamaños grandes, una parte de la corriente de aire podría penetrar en el espacio vacío, elevando localmente la presión en la pared trasera del patio. Esto podría aumentar la ventilación cruzada en las paredes a sotavento. Este efecto fue menos evidente en patios más pequeños (pág. 74).

El mecanismo de ventilación que afecta mayormente a la vivienda patio central es el de presión del viento, cuando el viento incide en un edificio, crea una distribución de presiones estáticas en la superficie exterior del edificio que dependen de la dirección del viento, la velocidad, la densidad, la orientación de la superficie, condiciones circundantes y la forma del edificio (ASHRAE, 2009).

El problema principal radica en que los métodos de diseño no siempre consideran de manera óptima cómo las variaciones morfológicas afectan el comportamiento del flujo de aire al interior. En consecuencia, existe la necesidad de explorar enfoques que integren métodos evolutivos y simulaciones paramétricas para desarrollar tipologías arquitectónicas como vivienda que maximicen el aprovechamiento del viento. El objetivo es partiendo de la vivienda de patio central para crear configuraciones geométricas que mejoren la ventilación natural y se reduzca la demanda energética.

ESTADO DEL ARTE

En la investigación de Albel Tablada de la Torre et al. (2005) donde se utiliza CFD para estudiar viviendas de patio central de 3 niveles; se dieron cuenta que se optimiza el desempeño cuando la ventilación no es unilateral, si no cruzada. Con el mismo fin la importancia de contar con mayor cantidad de patios centrales. También se determinó que las habitaciones del piso superior del patio (Figura 1) estrecho tienen velocidades de aire más altas que los pisos superiores del patio más

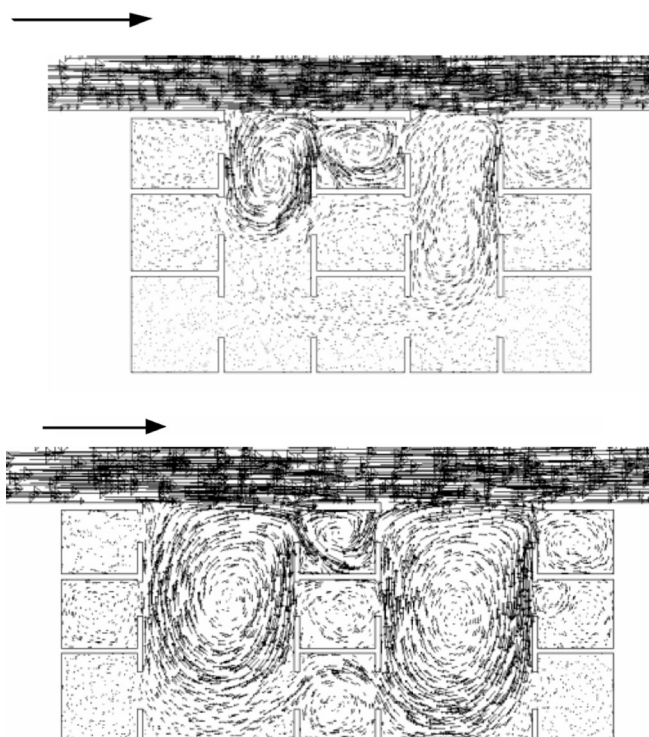


Figura 1. Flujo de aire dentro de dos patios interiores y habitaciones con ventanas abiertas. Fuente: Imagen extraída de Tablada de la Torre et al. (2005)

ancho; "ya que capturan la mayor parte del flujo de aire que ingresa a la cavidad del patio, provocando que las habitaciones de los pisos inferiores tengan velocidades de aire mucho más bajas" (Tablada de la Torre et al., 2005, pág. 3)

En la investigación de (Malkawi. et al., 2005) se presenta un modelo basado en algoritmos genéticos para la evolución del diseño y usa dinámica CFD para la evaluación del rendimiento del modelo, lo que genera la posibilidad de crear modelos que mejoren la ventilación natural y previsualizar los resultados (Zheng et al., 2020). Analizan y evalúan la capacidad de ventilación cruzada de un edificio de poca altura con persianas para crear sombra, conocidos también como louvers. Basado en el modelo de flujo de aire acoplado (similar al flujo de viento), el modelo acopla el flujo de aire interior y exterior para realizar la evaluación de la ventilación cruzada. La mayor reducción de la tasa de ventilación utilizada por louvers fue de hasta un 66,6%.

Rodrigues Marques Sakiyama et al. (2021) presentó un análisis de ventilación interior por CFD con el proceso de túnel de viento, se llegó a la conclusión que la orientación del edificio determina la calidad de la ventilación natural interior.

Los estudios de torres de viento también se consideran en este estado del arte ya que son soluciones arquitectónicas tradicionales que comparten el objetivo de mejorar la ventilación natural, además de la calidad higrotérmica,

mediante las torres de viento evaporativas no sólo se aumenta la cantidad de aire fresco, sino que también aumenta la humedad relativa del aire, lo que genera un mayor confort térmico. Esto sucede por el mecanismo de la ventilación de Presión de Chimenea (Stack Pressure) la que es causada por la masa de una columna de aire ubicada dentro o fuera de un edificio. También puede ocurrir dentro de un elemento de flujo, como un conducto o una chimenea. (ASHRAE, 2009)

METODOLOGÍA

Se siguió una metodología basada en la simulación paramétrica y CFD, integrándose los siguientes pasos:

- Modelo base (ancestro común): Se parte de un modelo inicial de vivienda de patio central, que actúa como ancestro común.
- Transformaciones morfológicas: Se utiliza la metodología algorítmica en Grasshopper (Echeverri Montes, 2021), se aplican una serie de transformaciones a la morfología del modelo base inspirados en la Teoría de las Transformaciones.
- Simulaciones CFD: Cada una de las tipologías generadas se evalúan mediante simulaciones CFD, con el objetivo de analizar el comportamiento de la ventilación natural en cada una de las transformaciones.
- Selección y cruce de genes: Se identifican las muestras "ganadoras" o las de mejor desempeño, después se reconocen las áreas de la vivienda que presentan los mayores caudales de ventilación. Estas áreas se combinan con otras muestras ganadoras.
- Selección final: Finalmente, esta segunda generación de muestras es evaluada y obtenemos la que presenta un mayor desempeño (fitness¹).
- Análisis de altura de ventanas: Se analiza con los resultados logrados el comportamiento más adecuado del viento en cuanto a alturas de ventanas (outlet), altura de antepechos y dintel.
- Comparación con el ancestro común: Se comparan los resultados de ambos en cuanto a el ángulo de inclinación de entrada de aire en el patio central.

TEORÍA DE LAS TRANSFORMACIONES

Es una propuesta de morfogénesis concebida por D'Arcy Thompson (1917, como se citó en Werritty, 2010) que examina especialmente desde una perspectiva geométrica, los diferentes tipos de transformaciones formales que podrían tener un significado biológico y fisicoquímico relacionado con la evolución (Figura 2) (Iurato y Igamberdiev, 2020). En la primera fila se muestran

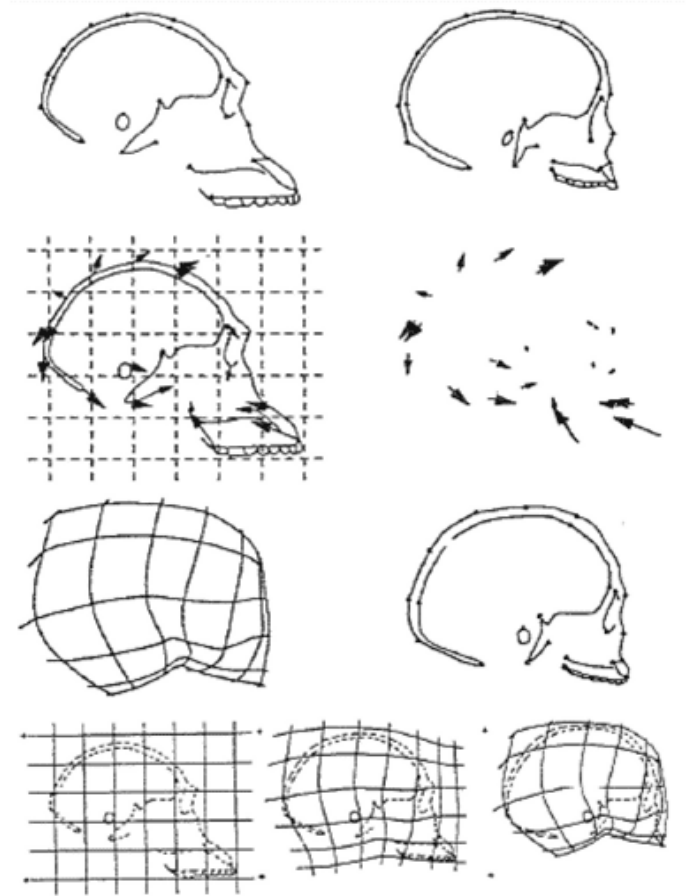


Figura 2. Teoría de las transformaciones. Fuente: Imagen extraído de Werritty (2010).

los puntos homólogos y los contornos indicados. En la segunda fila se representan los movimientos necesarios para llevar los puntos homólogos de la primera imagen a la segunda. Por último, en la fila inferior se presentan los dos extremos de la transformación (Werritty, 2010).

DISEÑO EVOLUTIVO

El término preferido de Darwin para evolución es "descendencia con modificación". La información genética se transmite entre generaciones en la mayoría de los organismos mediante el ADN (Whitlock, 2014). Normalmente la población se inicia de manera aleatoria, es decir, con elementos seleccionados al azar que se consideran potencialmente útiles en el entorno dado. Luego, se evalúa la aptitud o fitness de cada solución, lo que implica una medición o cálculo para determinar la eficacia relativa de cada una. Los resultados de esta evaluación se utilizan en la etapa de selección para decidir cuáles soluciones individuales continuarán en

¹ Fitness implica la capacidad de los organismos para sobrevivir y reproducirse en el entorno en el que se encuentran. La consecuencia de esta supervivencia y reproducción es que los organismos contribuyen con genes a la próxima generación (Allen, 2009).

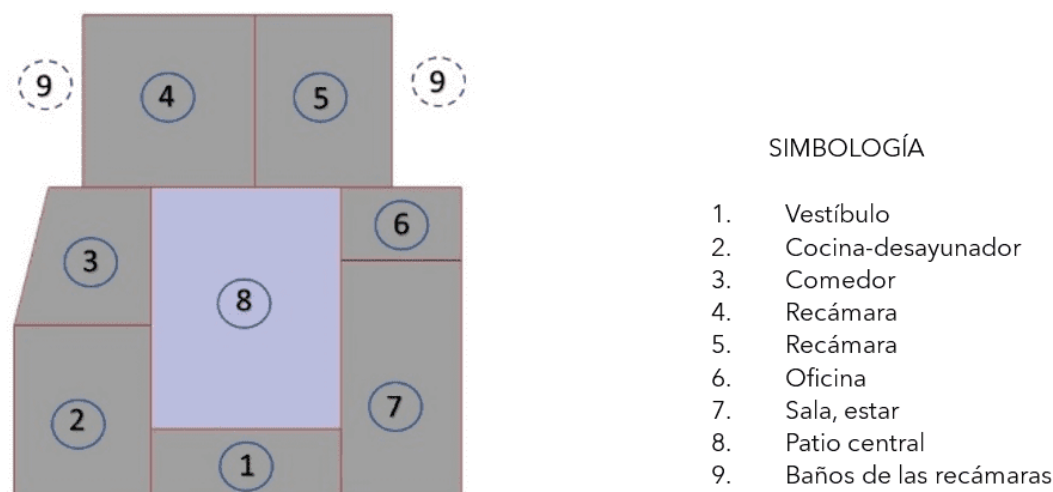


Figura 3. Diseño del ancestro común. Las áreas 9 (baños) son excluidas del análisis. Fuente: Elaboración de los Autores.

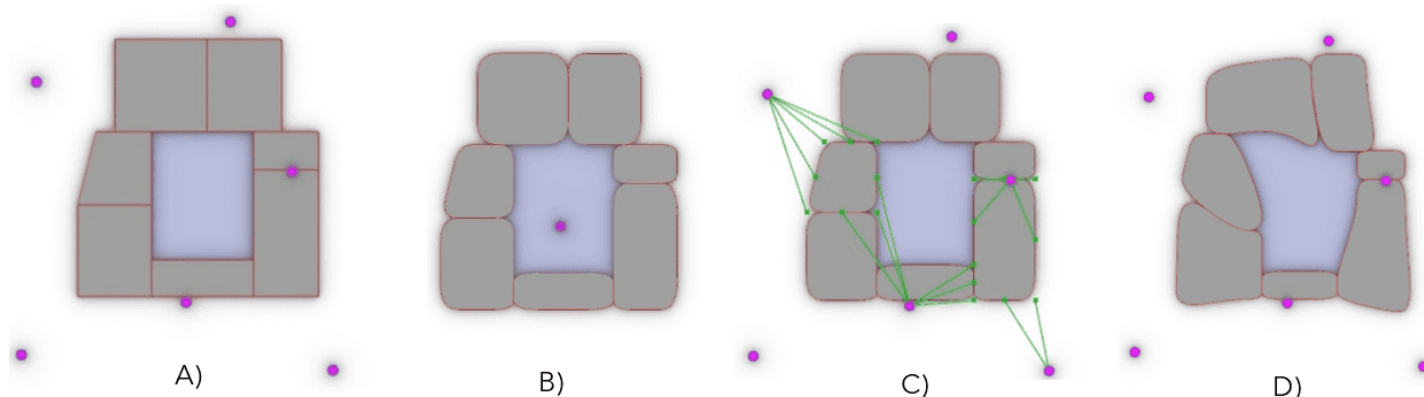


Figura 4. Transición. Fuente: Elaboración de los Autores.

la competencia por recursos. (Banzhaf, 2013). Las variaciones se pueden dar por mutación, duplicación o cruce de genes, entre otros. De acuerdo con Banzhaf los componentes principales del diseño evolutivo para crear muestreos generación a generación es la siguiente:

- **Evaluación:** Como proceso la adaptación describe la parte del cambio evolutivo en un rasgo que es impulsado por la selección natural. Como estado se refiere a "el rasgo de las adaptaciones" (Futuyma, 2017).
- **Reproducción:** La multiplicidad de especies implica que la evolución se ramifica en diferentes linajes de población a lo largo del tiempo.
- **Variación:** En la reproducción, es crucial que exista variabilidad entre los descendientes para que la selección natural pueda operar de manera efectiva.
- **Selección:** determina qué especies tienen las mejores cualidades para la reproducción.

RESULTADOS

A continuación, se presenta el modelado del proceso algorítmico, evolutivo y de simulación por CFD de este análisis en una serie de pasos.

PASO 1: MODELO BASE

El ancestro común (Figura 3) del cual se van a realizar las futuras transformaciones morfológicas, se diseñó con sustento en tipologías arquitectónicas históricas de vivienda de patio central, como la vivienda tradicional mozabita (Argelia) (Zamani et al., 2012) y la casa Kahkeshan, en la ciudad de Isfahan (Irán), junto a la premisa que el patio central tenga colindancia directa a todas las áreas de la casa, también que se acceda mediante un vestíbulo hacia áreas sociales, así las áreas privadas se encuentran al final del recorrido. Se elabora un algoritmo en Grasshopper que crea variaciones de este ancestro común, cada variación se considera una muestra. El algoritmo debe tener

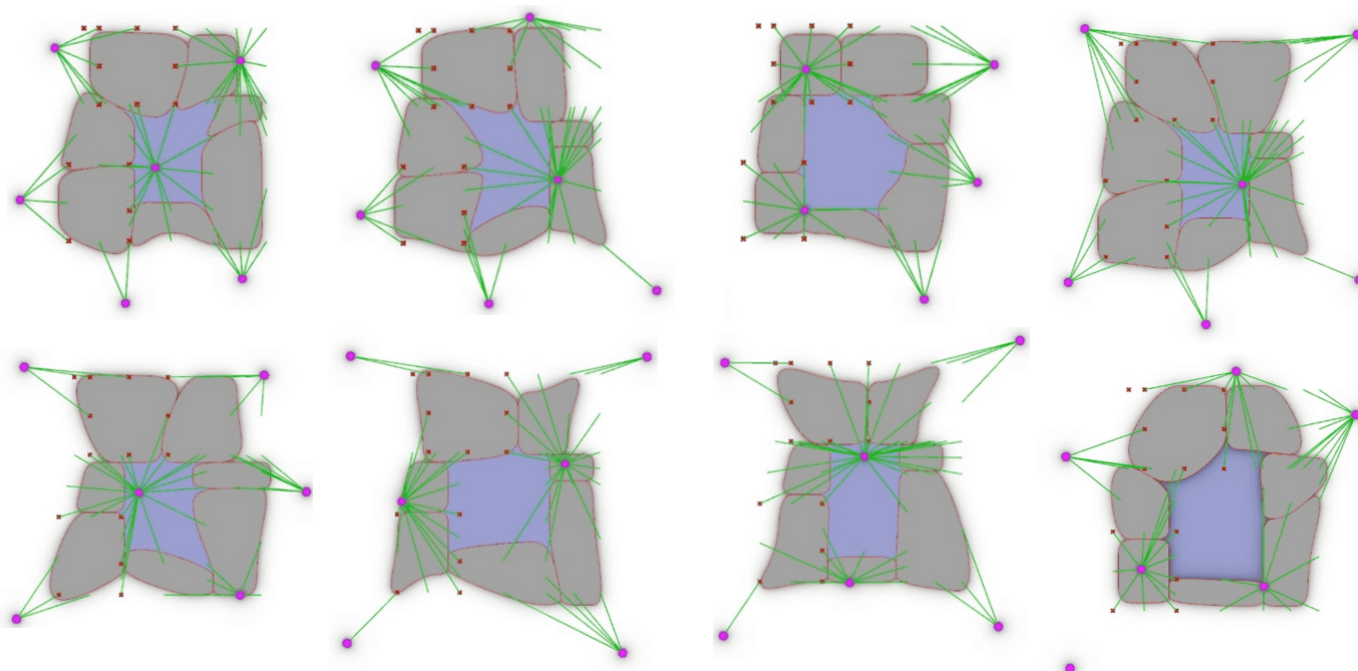


Figura 5. Algunas muestras obtenidas. Fuente: Elaboración de los Autores.

condiciones paramétricas muy concretas, para que en cada transformación los resultados siempre deben dar una única superficie cerrada, sin que se crucen líneas, superficies o vértices. Además, que todas estas muestras guardan un área total muy similar.

PASO 2: TRANSFORMACIONES MORFOLÓGICAS

Inspirado en la teoría de las transformaciones; los vértices de cada área de la vivienda (cocina, recámara, etc) son estirados en dirección hacia los puntos representados con esferas de color violeta (Figura 4), éstas se colocan en rangos de aleatoriedad en el espacio, los puntos aleatorios estiran a los vértices que se encuentren más cerca de éstos, la fuerza (magnitud) de esta dirección se encuentra en relación con la distancia que se tiene en estos puntos.

Se comienza convirtiendo primero las áreas cuadradas a redondear las esquinas (Figura 4 B). La figura 4 (C) para fines explicativos sólo está midiendo hacia los puntos aleatorios de las áreas del comedor, la sala y el vestíbulo. Los modelos se hacen a partir de todas las áreas. En la figura 5 se observan las muestras obtenidas.

Así mismo para cumplir con una estructuración ordenada y lógica de cada modelo de casa, se contempla la selección parcial de las curvas colindantes al patio central, esto con el fin de seleccionar una parte como ventana y otra como elemento de estructuración de tipo columna (estas reglas serán ejecutadas por el algoritmo con base a la derivada del contorno de cada geometría, que contempla la alternancia entre figuras contiguas: donde las curvas más pequeñas obtenidas de la derivación son consideradas



Figura 6. Alternancia estructural. En violeta puntos de control de los vértices. En celeste: aberturas de salida de aire. En blanco: aberturas de entrada. Fuente: Elaboración de los Autores.

como columnas) (Figura 6). De este modo se determina también las superficies o límites de borde, datos indispensables para determinar el cálculo por CFD (Figura 8).

PASO 3: SIMULACIONES CFD

La herramienta principal del estudio es Grasshopper, donde se hace el algoritmo evolutivo y el proceso de selección, así como la simulación de ventilación natural a través de Butterfly. Este último es un complemento y una biblioteca de Python para crear y ejecutar

simulaciones avanzadas de CFD en que se utiliza OpenFOAM² (Ladybuy Tools [LLC], 2022). CFD implica la resolución de ecuaciones diferenciales parciales acopladas, que deben resolverse de manera sucesiva; se puede utilizar para resolver problemas de flujo de fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas e incluso tensiones térmicas. Las ecuaciones principales permanecen constantes para todas las aplicaciones de flujo de aire y transferencia de calor en ambientes interiores, pero las condiciones de contorno cambian según el problema específico: por ejemplo, la distribución de la habitación puede variar o la velocidad del aire de suministro (ASHRAE, 2009).

El tipo de simulación empleado en este experimento se denomina "Inlet-Outlet", que simula el flujo de aire impulsado por el viento en interiores para evaluar la eficacia de la ventilación. Es el método más adecuado a diferencia del túnel de viento (estudio de tipo urbano), HVAC³, entre otros. Estos cálculos toman superficies geométricas de grasshopper como límites de borde, para distinguir los tres valores indispensables para esta simulación: 1. Inlet: entrada de aire natural. 2. Outlet: salida de aire natural. 3. Walls: límites de borde, contorno o en este caso la morfología de la vivienda. Inlet es la superficie que representa al patio central en el punto más alto de la casa (Figura 8).

Debido a que todas las zonas geográficas tienen distintos valores de velocidad de aire, temperatura y de inclinación por la topografía, densidad de edificios, vegetación, etc. (ASCE, 2023d). Por lo que para realizar este proceso en un sitio en concreto se deberá de hacer de acuerdo con la información meteorológica de la zona geográfica en donde se encuentre. (Figura 9). Se observa que los resultados pueden variar hasta en 200 m/s debido a estos factores.

Los valores de velocidad de aire de entrada se consideran en rangos de aleatoriedad de 0.2 a 0.8 a m/s. Valores de percepción de una ventilación en "calma" (Soler & Palau, 2022). Además, se tienen valores pequeños negativos verticalmente o eje z de 10 grados: esta es una práctica común en el análisis de la dinámica del viento en entornos urbanos. Aunque no se utilizó un túnel de viento, la lógica de aplicar variaciones en ángulos pequeños es consistente con estándares como los mencionados en el (ASCE, 2023c, pág. 25), recomienda probar direcciones de viento en incrementos de 10 grados de azimut, un enfoque diseñado para capturar respuestas significativas del flujo de aire.

La temperatura de entrada se establece aleatoria entre 22 a 35, debido a que es la temperatura en la que se considera que este modelo de casa habitación puede tener mayor

provecho y alcance para mitigar la sensación de calor sin utilizar medios mecánicos. Se utiliza el componente "Wall" para definir los límites de borde o contorno de toda la vivienda; la temperatura para éste se considera de entre 15 a 30°, aunque se repitieron simulaciones con 40° que reportan pocas diferencias debido a que es un modelo de vivienda de patio central. Los restantes parámetros de este componente vienen por defecto del software, estos incluyen una condición no deslizamiento (no-slip), gradiente de presión cero (zero gradient) en la dirección perpendicular a la pared, entre otros (OpenFOAM, 2019). La presión en este tipo de análisis es generada mediante la velocidad y dirección del aire por lo que se determina a 0 el valor de presión, lo que indica que los valores de presión comienzan desde este valor.

Para adaptar el componente SnappyHexMesh (SPM) a una arquitectura con formas curvas se tomaron diversas fuentes de información, como Wolf Dynamics (2018). Contrario de cómo está preestablecido el input "snap" debe estar desactivado, el input "additional parameter" para ello se debe colocar el número entero más bajo posible: 1; mientras más bajo este número, el componente se adhiere mejor a superficies curvas.

Los resultados que se obtienen en las simulaciones son el diagrama de flujo de ventilación interior (análisis horizontal x, z) y un diagrama de presión. El primero consiste en un campo de vectores (V total) que contienen (N) cantidad de celdas con un vector cada una: cada vector tiene dirección y magnitud (o fuerza), que representa la velocidad y dirección del viento en m/s. Cada variación que se obtiene en el proceso evolutivo es sometida a estas pruebas, las magnitudes se suman y se dividen entre N para obtener un promedio de velocidad del viento al interior de la vivienda (V interior) (Ecuación 1):

$$V_{interior} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| V_i \| \quad (\text{Ecuación 1})$$

Los vectores con celdas de SPM igual o menor a 0.5 son descartados ya que son vacías y no contienen magnitud. Por lo que en muchos casos N reduce su valor considerablemente, que resulta en N efectiva.

ANÁLISIS DEL ANCESTRO COMÚN SIMULACIONES CFD

La primera evaluación: ancestro común (Figura 7) obtiene una velocidad interior de 0.8367 m/s. V total= 410 m/s. N= 490. En la segunda generación de modelos ocurren las transformaciones morfológicas explicadas en el Paso 1, debido a ello se evaluaron 75 modelos distintos.

2 OpenFOAM es un software de código abierto utilizado para simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD).

3 HVAC "Heating, Ventilation, and Air Conditioning" Es un sistema utilizado para proporcionar calefacción y refrigeración mecánicamente en edificios residenciales y comerciales.

4 Diseñada específicamente para generar mallas Hexa dominantes de alta calidad para geometrías complejas (Wolf Dynamics, 2018).

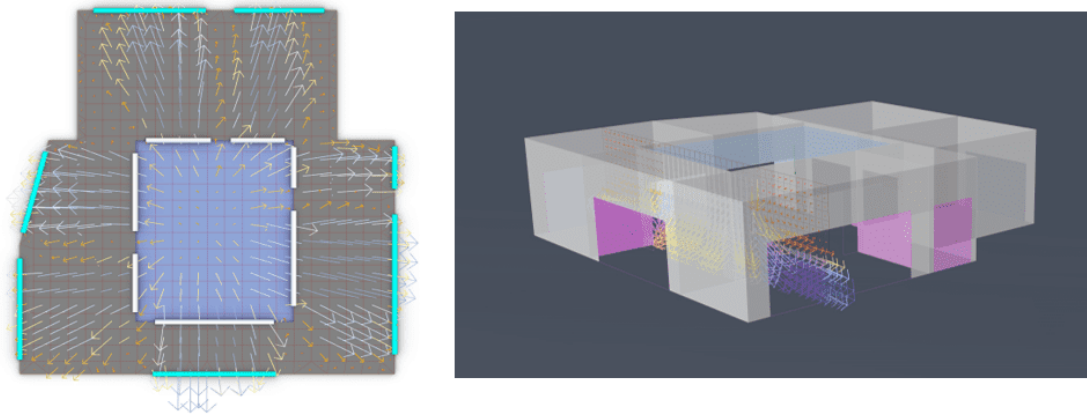


Figura 7. Simulación del ancestro común Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 8. Datos de entrada para la simulación. Fuente: Elaboración de los Autores.

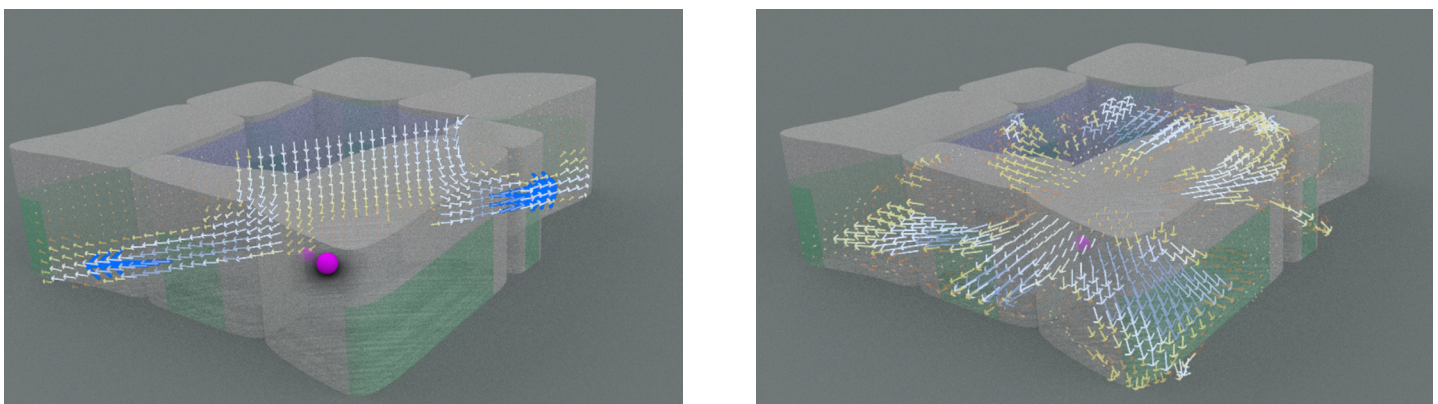


Figura 9. Análisis de los modelos. A), Análisis vertical: con coordenadas en x. B): Análisis horizontal: x, z. Fuente: Elaboración de los Autores.

En la figura 8 se representa en azul: superficie inlet. En turquesa: superficie outlet. En verde: normal de la superficie. En blanco "walls" (muros). Figura 7 (B): rejilla Snappy Hex Mesh (SHM).

PASO 4: SELECCIÓN Y CRUCE DE GENES

En el análisis se extraen los vectores de mayores magnitudes, para esto se encuentra cuál de los puntos

aleatorios son los que determinan estos vectores (Figura 9). Estos puntos son los que se combinan junto a los de otra especie campeona para definir la reproducción, variación y morfología general de los modelos de la tercera generación. En la figura 10 se observa cómo se seleccionan únicamente 3 puntos aleatorios de los 6 a 8 originales. De este modo se discretizarán únicamente los genes más poderosos, así mismo se suman nuevos puntos al azar para enriquecer la variación de los modelos

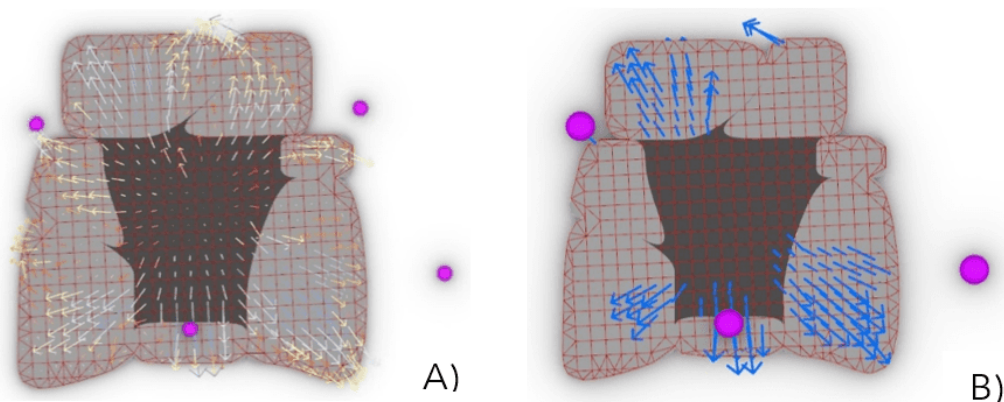


Figura 10. Proceso de combinación de genes ganadores. Los vectores de color azul (B) tienen mayor magnitud. Fuente: Elaboración propia del Autor.

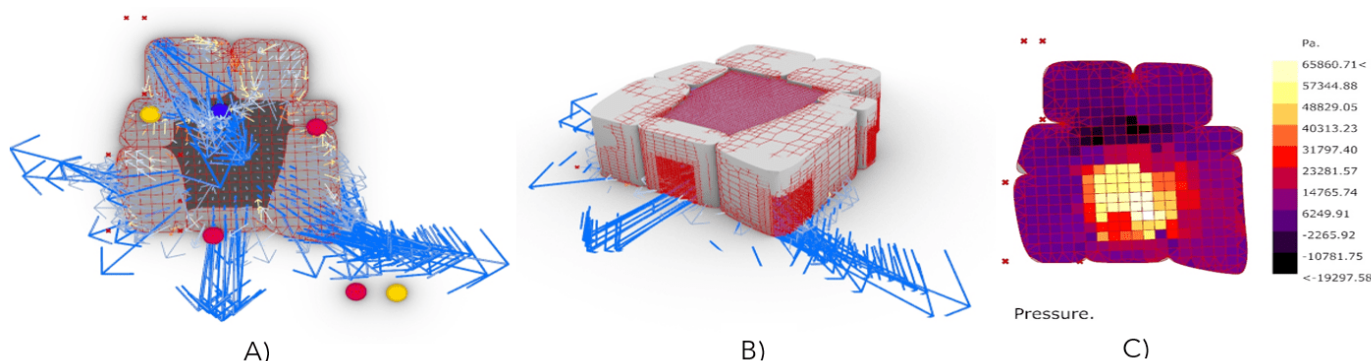


Figura 11. Modelado ganador 09 de la tercera generación. Visualización de los vectores aumentada. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 1. Análisis de altura de ventanas del modelo 09 de la segunda generación. Fuente: Elaboración de los Autores.

Sim.	Tipo de simulación	H análisis horizontal (m)	Sum. Total (m/s)	V interior (m/s)	H ventana (m)	H dintel (m)	H antepecho (m)
A	Vertical		925.3	1.7	0.5	2.3	1.2
B	Vertical		1398.7	2.6	0.8	2.0	1.2
C	Vertical		1471.2	2.7	1.4	0.6	2.0
D	Vertical		1474.5	2.7	2.3	0.6	1.1
E	Vertical		1439	2.7	2.3	1.6	0.1
F	Horizontal	3.2	1557.4		0.8	0.8	2.4
G	Horizontal	0.1	1620.2		0.8	0.8	2.4
H	Horizontal	0.1	1760.6		2.3	0.1	1.6

obtenidos.

PASO 5: SELECCIÓN FINAL

El modelo con mejor fitness es el modelo 09 de la tercera generación, teniendo $V_{total} = 1,760.62$ m/s. $N=855v$, observado en la figura 11; se tienen esferas azules como puntos aleatorios del modelo campeón de una generación previa, puntos rosados de otro modelo campeón y puntos azules que representan nuevas posibilidades para esta última generación.

PASO 6: ANÁLISIS DE ALTURA DE VENTANAS (OUTLET)

Se elaboran análisis verticales (x, z) y horizontales (x, y) en dos modelos con el mejor fitness sobre el desempeño de la ventilación natural en cuestión de altura de ventanas (outlet), junto a variaciones de altura en antepecho y dintel. (Figura 11). Los desempeños más altos se obtienen

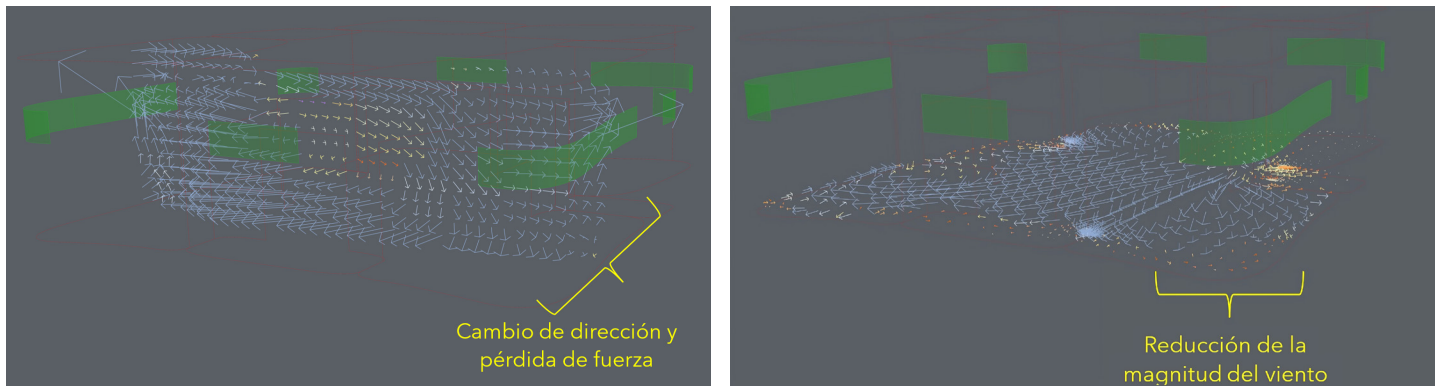


Figura 12. Análisis Outlet, simulaciones A, E, G, H. especificadas en la Tabla 2. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 2. Comparación con el ancestro común. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tipo de simulación	H corte h (m)	(N) vector	Sum. Total (m/s)	V entrada: X (m/s)	V entrada: Z (m/s)	V interior (m/s)	H ventana (m)
A.C.	0.1	412	160	0.8	- 0.5	0.38	
M.G.		911	825.3			0.90	
A.C.		482	322		- 1.0	0.62	2.3
M.G.		922	1253			1.32	
A.C.		482	402	0.2	-2.0	0.83	
M.G.		965	1662			1.72	

cuando la ventana se ubica al nivel de piso con alturas de 1.4 a 2.3 metros, y los menores a partir del decrecimiento de los 0.80 m.

Se obtienen Vtotales considerables (Tabla 1, sim. F y G) con alturas de 0.8 m. y grandes antepechos, pero como se observa: la dirección del viento cerca de los antepechos y dinteles se ve desviada perpendicularmente a los muros o contornos, que se interpretan como zonas de estancamiento y turbulencias (ASCE, 2023b), las que pueden provocar una disminución en el caudal de la ventilación. (Figura 12).

PASO 7: ANÁLISIS ALTURA DE VENTANAS (OUTLET)

Se comparan los resultados de ambas simulaciones en relación al ángulo de inclinación de entrada de aire en el patio central. AC= Ancestro común, MG= Modelo Ganador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de mayor fitness obtuvo 1355 N, donde más de 500 son celdas vacías, por lo tanto, N efectiva es 855. Vtotal= 1,760.62 m/s. En este modelo 85% de los vectores son mayor a 1.6 m/s. Esto significa que en

Tabla 3. Escala de Beaufort. Fuente: Información extraída de Soler & Palau (2022)

Escala de Beaufort	Nombre de viento	Velocidad (m/s)
0	Calma	0.5
1	Aire ligero	1.5
2	Brisa ligera	3
3	Brisa suave	6

85% de la vivienda sin contar al patio central tiene una velocidad mayor a 1.6 m/s. Esto se interpreta que con este procedimiento se reduce la temperatura dentro de la vivienda hasta 4.2° (Tabla 4) en un 85% del área en la vivienda (Soler & Palau, 2022) y de acuerdo con la Escala de Beaufort se pasa de tener una sensación de ventilación de "calma" a "aire ligero" (Tabla 3).

El modelo ganador es 2.50 veces mayor al ancestro común en cuanto a tener una velocidad de aire natural al interior de la vivienda, este es representado en la Figura 13 mediante pre visualización.

Tabla 4. Efecto sobre el cuerpo humano. Fuente: Información extraída de Soler & Palau (2022)

Velocidad del aire en las personas (m/s)	Sensación de que la temperatura ambiente se ha rebajado en (°C)
0.1	0
0.3	1
0.7	2
1.0	3
1.6	4
2.2	5

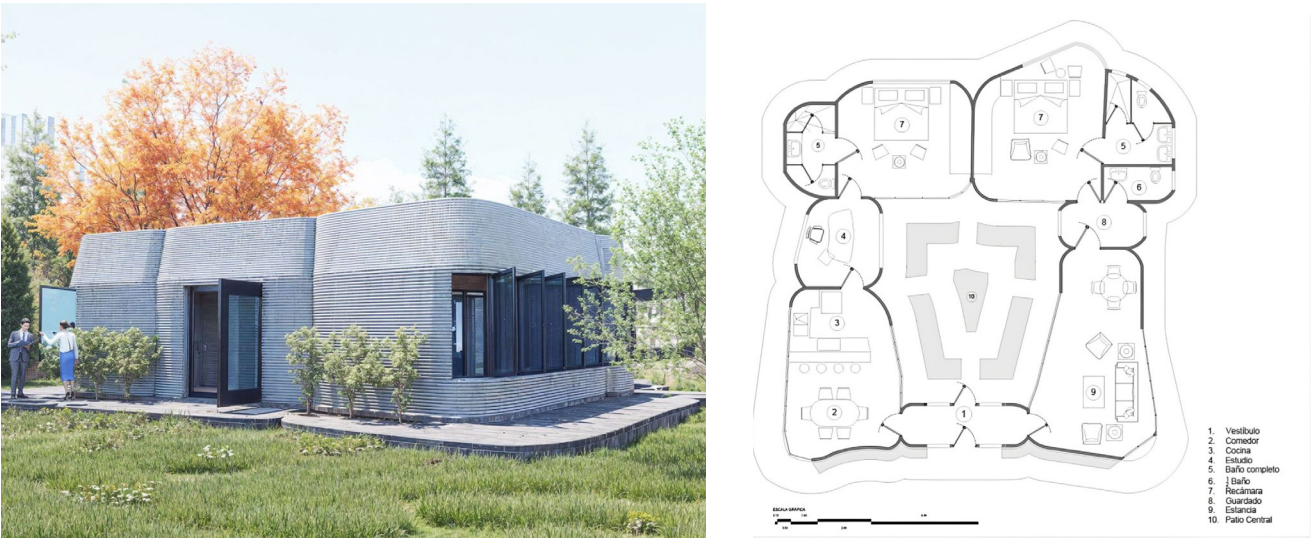


Figura 13. Aplicación y visualización de los resultados del modelo 03 de la segunda generación. Fuente: Elaboración de los Autores.

CONCLUSIONES

Estos resultados muestran que es posible analizar y obtener un mejor desempeño de la ventilación natural interior en una vivienda a través del proceso de diseño evolutivo presentado en este artículo. Lo que resulta adecuado en el contexto de la arquitectura biofílica por su sustentabilidad e incorporación de patrones de la naturaleza en su morfología.

Este proceso debería considerarse en un contexto de diseño arquitectónico, ya que la metodología permite analizar el desempeño de la ventilación natural en la vivienda de patio central mediante diseño evolutivo y CFD. Esto muestra cómo el diseño evolutivo puede ser una herramienta efectiva para explorar variaciones morfológicas. Además, este método se propone para añadir valor para trabajar junto a los métodos y técnicas de arquitectura sustentable existentes como la losa-jardín, earthship, entre otros. También se propone este método para contemplar la posibilidad de llevarse cabo mediante técnicas de construcción contemporáneas como la impresión 3D en concreto.

Los resultados podrían ampliarse si se elabora una mayor evaluación de especies, esto implicaría desde el crecimiento del área de la vivienda, nuevas áreas, usos, disposiciones, entre otros. Así como la mejora del algoritmo; como aumentar el valor de genes o ADN y partir de un ancestro común de diferente naturaleza. Hasta la exploración del comportamiento de la ventilación en distintas tipologías de vivienda con distintas entradas y salidas de aire. La búsqueda y experimentación en otros fenómenos que causan una hipótesis de investigación relevante como el efecto “embudo”, “la espiral”, “biomimética”, entre otros. Así como analizar propiedades higrotérmicas de la ventilación natural como la humedad del aire.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES
CRediT

Conceptualización, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Curación de datos, D. R. de-I.; Análisis formal, D. R. de-I.; Adquisición de financiación, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Investigación, D. R. de-I.; Metodología, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Administración

de proyecto, D. R. de-I.; Recursos, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Software, D. R. de-I.; Supervisión, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Validación, D. R. de-I.; Visualización, D. R. de-I.; Escritura – borrador original, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Escritura – revisión y edición, D. R. de-I.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo brindado a través de la beca CONAHCYT para el desarrollo de esta investigación, “Diseño Evolutivo para la optimización del confort en la ventilación natural”

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, O. H. (2009). Fitness and its role in evolutionary genetics. *Nature Reviews Genetics*, 10, 531-539. <https://doi.org/10.1038/nrg2603>

ASCE. (2023a). Appendix D: Effective Strategies to Reduce Dynamic Wind-Induced Response in ASCE, Prestandard for Performance-Based Wind Design (V1.1, pp. 107-108). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482186>

ASCE. (2023b). Chapter 6: Modeling and Analysis. in ASCE, Prestandard for Performance-Based Wind Design (V1.1, pp. 34-45). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482186>

ASCE. (2023c). Chapter 5.2.2: Site-Specific Hazard Analysis in ASCE, Prestandard for Performance-Based Wind Design. (V1.1, pp. 23-25). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482186>

ASCE. (2023d). Chapter 5.3: Wind tunnel test methodologies in ASCE, Prestandard for Performance-Based Wind Design (pp. 25-30). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482186>

ASHRAE. (2009). INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY, Chapter 13: Indoor Environmental Modeling (TC 4.10, Indoor Environmental Modeling) in ASHRAE, *Handbook: Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. <https://www.ashrae.org/technical-resources/technical-committees/complete-list-of-tcs-with-home-pages>

Banzhaf, W. (2013). Chapter 17: Evolutionary Computation and Genetic Programming in A. Lakhtakia, & R. J. Martín Palma (Eds), *Engineered Biomimicry* (pp. 430-447). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415995-2.00017-9>

Bensalem, R. (1996). *Wind-Driven Natural Ventilation in Courtyard and Atrium Type Buildings* [Thesis Doctor, School of Architectural Studies. University of Sheffield]. <https://etheses.whiterose.ac.uk/3000/1/DX197102.pdf>

Echeverri Montes, P. (27 septiembre de 2021). Grasshopper para Rhino: ¿qué es y cómo se utiliza? *Echeverrimontes*. <https://www.echeverrimontes.com/blog/grasshopper-para-rhino-que-es-y-como-se-utiliza>

El Ahmar, S., Battista, F., y Fioravanti, A. (2019). Simulation of the thermal performance of a geometrically complex Double-Skin Facade for hot climates: EnergyPlus vs. OpenFOAM. *Building Thermal, Lighting, and Acoustics Modeling*, 12, 781-795. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0530-8>

Futuyma, D. J. (2017). Section III: Natural selection and adaptation in J. Losos (Ed.), *Princeton Guide of Evolution* (pp. 189-200). Princeton University Press. https://www.kokkonuts.org/wp-content/uploads/jennions_kokko_2014_The_Princeton_Guide_to_Evolut.pdf

Iurato, G., y Igamberdiev, A. U. (2020). D’Arcy W. Thompson’s On Growth and Form: A landmark for the mathematical foundations of epigenetics. *BioSystems*, 198, 104279. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2020.104279>

Ladybug Tools (LLC). (2022). Butterfly. <https://www.ladybug.tools/butterfly.html>

Malkawi, A. M., Srinivasan, R. S., Yi, Y. K., y Choundhary, R. (2005). Decision support and design evolution: integrating genetic algorithms: CFD and visualization. *Automation in Construction*, 14(1), 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.06.004>

OpenFOAM. (2019). OpenFoam: User Guide v2112. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-bcs-derived-wall.html>

Rodrigues Marques Sakiyama, N., Frick, J., Bejat, T., y Garrecht, H. (2021). Using CFD to Evaluate Natural Ventilation through a 3D Parametric Modeling Approach. *Energies*, 14 (8), 2197. <https://doi.org/10.3390/en14082197>

Soler & Palau. (2022, Albril). Velocidad del aire. Los efectos y la velocidad del aire. S&P (Soler & Palau Ventilation Group). <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-velocidad-del-aire/>

Tablada de la Torre, A. E., Blocken, B., Carmeliet, J., De Troyer, F., y Verschure, H. (13-16 de noviembre de 2005). *The influence of courtyard geometry on air flow and thermal comfort: CFD and thermal comfort simulations*. In Proceedings of the 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture (Vol. 1, pp. 75–80). NDU Publishing; Lebanon.

Werritty, A. (2010). D’Arcy Thompson’s ‘On Growth and Form’ and the Rediscovery of Geometry within the Geographic Tradition. *Scottish Geographical Journal*, 126(4), 231-257. <https://doi.org/10.1080/14702541.2010.549344>

Whitlock, M. C. (2014). Section I.4: From DNA to Phenotypes in J. Losos (Ed.), *Princeton Guide of Evolution*. (pp. 40-49). Princeton University Press. https://www.kokkonuts.org/wp-content/uploads/jennions_kokko_2014_The_Princeton_Guide_to_Evolut.pdf

Wolf Dynamics. (2018). Mesh generation using snappyHexMesh. http://www.wolfdynamics.com/wiki/meshing_OF_SHM.pdf

Zamani, Z., Taleghani, M., y Hoseini, S. B. (2012). Courtyards as solutions in green architecture to reduce environmental pollution. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 30 (1), 385-396. https://repository.tudelft.nl/file/File_c83b7492-d5d2-4e89-8554-017b6d40e7f7?preview=1

Zheng, J., Tao, Q., y Li, L. (2020). Numerical study of wind environment of a low-rise building with shading louvers: Sensitive analysis and evaluation of cross ventilation. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 19(6), 541-558. <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1758113>

Zhong, W., Schröder, T., y Bekkering, J. (2021). Biophilic design in architecture and its contributions to health, well-being, and sustainability: A critical review. *Frontiers of Architectural Research*, 11(1), 114-141. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.07.006>