

Aplicación de inteligencia artificial para el diseño sostenible de vanos en el trópico

Artificial intelligence application for sustainable design of façade openings in the tropics

María Clara Betancourt. M.A

mcbet@icesi.edu.co

Lina Marcela Quintero Villarreal

lmquintero@icesi.edu.co

Universidad Icesi, Cali, Colombia

Rodrigo García Alvarado. Ph. D

rgarcia@ubiobio.cl

Universidad del Bio Bio, Concepción, Chile

.....
Fecha de recepción: Mayo 15 de 2012

Fecha de aceptación: Junio 12 de 2012

Palabras clave

Diseño paramétrico; algoritmos genéticos; optimización; confort; vanos.

Keywords

Parametric design; genetic algorithms; optimization; comfort; façade openings

Colciencias
tipo 1

Resumen

Los vanos de las viviendas tienen alto impacto en la calidad ambiental interior y el consumo energético, sin embargo, no existen regulaciones precisas para su diseño en el trópico, que se basa en las experiencias propias del arquitecto y el sentido común. Determinar la correcta configuración de un edificio con el desempeño deseado, hoy es posible con la introducción del diseño paramétrico y los algoritmos genéticos, que permiten obtener las mejores alternativas en la fase inicial del proceso de diseño. Esta investigación nace como derivado de un trabajo de investigación previo que establece la relación de las geometrías de los vanos con el confort del espacio al que pertenecen y su principal objetivo es la implementación de lineamientos para el diseño de vanos residenciales que proporcionen condiciones adecuadas de confort térmico, visual y psicológico para viviendas del clima cálido húmedo tropical. El uso de herramientas generativas permite una evaluación de los resultados en etapas iniciales del proyecto, ofreciendo la posibilidad de elegir entre una variedad de soluciones que cuentan con un alto grado de eficiencia y sostenibilidad.

Abstract

The envelope openings of houses have a strong implication in the indoor environmental quality and energy consumption. Nevertheless, there are no precise regulations for its design in equatorial tropics. Normally these designs are based in the previous experiences and common sense of the architect. Determining the correct configuration of a design problem with the desired performance is now possible with the introduction of Parametric Design and Genetic Algorithms; through these it's possible to obtain the best alternatives in the initial phase of design. The main focus of this investigation is to design windows that proportion adequate conditions of thermal and visual comfort, for a warm and humid tropical climate. The use of generative tools allows the evaluation of results in the initial stages of the project, giving the designer the possibility of choosing among diverse results with a high grade of efficiency and sustainability.

I. Antecedentes

En el clima tropical existe una carencia de estándares para el diseño y la construcción de vanos para un desempeño sostenible de la vivienda, esta falta de legislación agudiza el problema del consumo energético ya que junto con el crecimiento de los procesos de urbanización viene también implícito el crecimiento en la demanda de confort en los espacios habitables, trayendo consigo el aumento del consumo energético (Grimme, Laar & Moore, 2006). Estudios demuestran que satisfacer condiciones de confort dentro de las viviendas está ligado al consumo energético de las mismas, además se ha encontrado que los vanos tienen un gran impacto en el rendimiento de un edificio, según Caldas (2001) los vanos son elementos de un edificio que pueden ser aislados del resto, convirtiendo su estudio en un campo amplio para la investigación y aplicación de métodos de búsqueda y optimización de la práctica sostenible.

Las características climáticas del trópico implican consideraciones especiales en el diseño de las aperturas, es importante establecer estándares que en lugar de promover el uso generalizado de energía convencional para refrigerar espacios, promuevan la aplicación de técnicas pasivas de enfriamiento y criterios bioclimáticos apropiados para el uso eficiente de la energía (Bravo, González & Gaudi, 2009). Es en este punto donde converge la ingeniería y el diseño por medio del uso de herramientas computacionales que implementen algoritmos evolutivos para permitirles a los arquitectos y diseñadores proyectar viviendas energéticamente eficientes mediante la aplicación de estrategias pasivas.

Desde los estudios iniciales de Holland (1975) hasta hoy, se han realizado investigaciones que evidencian los múltiples usos de los algoritmos genéticos en el campo del diseño. Aris, Geros y Bourdakís (2006) muestran como el desarrollo de un algoritmo genético es capaz de optimizar las aperturas de un espacio para conseguir el consumo energético mínimo y después diseñar automáticamente alternativas de solución de posibles fachadas. Torres y Sakamoto (2007) proponen la implementación de un algoritmo genético para la optimización de fachadas maximizando el ahorro de energía y reduciendo el des confort visual. Marin, Bignon y Lequay (2008) usan los algoritmos genéticos en el proceso de diseño creativo. Por su parte, Caldas (2001) hace uso de los algoritmos genéticos para optimizar los presupuestos en una construcción, minimizando el uso de aire acondicionado, electricidad y costos de la misma.

El interés de esta investigación es el de implementar lineamientos de confort para el diseño de vanos en el trópico, desarrollados en investigación previa mediante el estudio de casos representativos de la arquitectura tropical del Valle del Cauca (Colombia), que permitan la optimización de los mismos haciendo uso de herramientas de diseño paramétrico y algoritmos genéticos.

Se hace uso de los algoritmos genéticos como herramienta computacional para la optimización de geometrías y sus relaciones en etapas tempranas del diseño de vanos residenciales para viviendas en el trópico. El espacio de búsqueda del algoritmo genético está determinado por lineamientos de diseño que toman en cuenta parámetros ambientales (temperatura, velocidad viento, humedad relativa), espaciales (componentes del edificio), visuales (iluminación) y fisiopsicológicos.

Encontrar cohesión entre lo estético y lo óptimo es una de las preocupaciones que le dan vida a esta investigación, dando un giro al proceso de diseño tradicional que se ha visto ligado durante mucho tiempo a la experiencia e intuición del diseñador, dejando atrás la etapa en donde solo se usaban juicios personales para seleccionar y evaluar la calidad de los diseños. Los algoritmos genéticos permiten obtener mejores soluciones a problemas de diseño de vanos residenciales gracias a su capacidad de abarcar espacios de solución muy amplios en poco tiempo (Renner & Ekárt, 2009).

II. Cuestiones teóricas sobre sistemas paramétricos y algoritmos genéticos aplicados al diseño

A. Diseño paramétrico

Las soluciones de diseño se gestan en la mente del diseñador, lo que propone el diseño paramétrico es convertir dichas soluciones en un proceso lógico que puede ser representado por un algoritmo. Actualmente existen herramientas de modelado tridimensional que le permiten al diseñador representar geometrías en pantalla, sin embargo estas cuentan con limitantes que no permiten que el proceso de modificación de la misma pueda ser efectuado de forma rápida y fácil. El diseño paramétrico ofrece la posibilidad de encontrar nuevas maneras de plasmar soluciones y de controlar dicho proceso. De esta manera se produce “una automatización en la definición de las geometrías a través de funciones matemáticas y de la generación de un modelo paramétrico que permite cambios significativos y a su vez rápidos a las geometrías iniciales del modelo” (Tedeschi, 2011, p. 11).

Para este caso, el híbrido entre diseño-arquitectura y las ciencias físicas-matemáticas-computación, propone no solamente sistematizar procedimientos y prácticas anteriormente concebidas, sino también dividir los problemas de diseño en partes más pequeñas con el fin de definir estructuras lógicas que puedan ser interconectadas entre sí, siguiendo un orden específico de tal manera que los cambios que se realicen a los valores de entrada de cada objeto parametrizado puedan evidenciarse preservando el concepto general plasmado en el diseño.

La diferencia que existe entre una forma paramétrica y una modelada bajo métodos clásicos radica en el control que se consigue de la misma, al establecer relaciones entre componentes, en cómo estos pueden alterarse por medio de datos de entrada para conseguir nuevas formas y en cómo el usuario (diseñador o ingeniero) saca provecho de dichas relaciones para asistir a la herramienta computacional por medio de un proceso lógico y coherente.

De esta manera, los sistemas paramétricos se muestran como una nueva alternativa donde se combinan conceptos de diseño y programación, para ser adaptados al campo del diseño, buscando ayudar a los diseñadores a explorar las posibilidades existentes en torno al desarrollo de una idea y a construir una nueva forma de pensar los problemas en este campo. Con esto no se pretende cambiar los parámetros tradicionales del diseño y la arquitectura, por el contrario, se busca evolucionar y fortalecer dichas prácticas a través del aprovechamiento de herramientas computacionales.

B. Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos constituyen un mecanismo de búsqueda enfocado en la resolución de problemas de optimización los cuales adaptan los conceptos de la evolución natural al mundo computacional. John Holland fue quien por primera vez en 1975 hizo uso de estos para explicar el proceso adaptativo de los sistemas naturales y para crear nuevos sistemas de inteligencia artificial que funcionaran bajo esas premisas.

Los algoritmos genéticos adaptan los términos evolutivos naturales a la representación del proceso artificial de la evolución de soluciones, de esta manera encontramos que una solución al problema es llamada individuo, una población de individuos o generación es una colección de soluciones y los genes son parte de la representación de la solución. Durante la ejecución del algoritmo genético, las soluciones aptas al problema de optimización son conservadas para que se reproduzcan o muten - cuando se habla de mutación se hace referencia al uso de operadores de búsqueda unitarios, mientras que el termino reproducción se utiliza como analogía del uso de operadores binarios de búsqueda-, formando con ello nueva generación de soluciones más aptas. Esto hace la diferencia en eficiencia entre aplicar métodos de búsqueda estocástica y algoritmos genéticos (búsqueda determinista o heurística), pues con los últimos se efectúa una intensiva exploración y explotación del espacio de búsqueda a través de la selección, mutación y cruce (Marin et al., 2008).

La evolución es directamente dirigida por la función de aptitud (*fitness*) la cual representa la calidad de la solución. Durante el proceso, la búsqueda es conducida a través de mejores regiones del espacio de búsqueda que está determinado por el conjunto de soluciones aptas para el problema. Cada posible solución es evaluada bajo el criterio determinado por la función de *fitness* de manera que cada una obtiene un valor que permite clasificarla frente al resto de los individuos de su generación.

Contar con un mecanismo que consiga entregarnos la forma más optima que se pueda encontrar dentro de un espacio de soluciones es una corriente que ha tomado fuerza en el diseño y la arquitectura, constituyéndose en una opción junto con el modelado paramétrico, que busca facilitar la manipulación e integración de las diferentes etapas del diseño. De esta manera el diseño puede llegar a ser concebido como una búsqueda de una óptima o apropiada construcción, donde los términos de búsqueda son usados desde un punto de vista técnico. En diseño, el estado objetivo representa las características que debe tener el diseño final. “El espacio de búsqueda es el conjunto de

todos los diseños que existen a partir de todos los posibles valores de los parámetros del mismo” (Renner & Ekárt, 2009).

III. Implementación computacional: aplicación del proceso de diseño paramétrico y optimización de vanos residenciales

Este artículo presenta, entre otros asuntos, el estudio y aplicación de una plataforma genérica para la aplicación de algoritmos evolutivos como Galapagos®, la cual, gracias a su diseño, puede ser utilizada en una amplia variedad de problemas de optimización. Esta herramienta está incorporada con el sistema de programación paramétrica Grasshopper® sobre la herramienta de modelado tridimensional Rhinoceros® basado en NURBS.

Según Turrin, Buelow y Sofuffs (2011) existen grandes beneficios derivados de combinar el modelado paramétrico y los algoritmos genéticos para el desarrollo de un diseño enfocado a la optimización. Permitirle al diseñador obtener automáticamente gran cantidad de soluciones a un problema es una gran ventaja que ofrece el modelado paramétrico como herramienta que apoya la exploración de geometrías. En etapas tempranas del diseño, bajo practicas convencionales, conseguir el cumplimiento de los requerimientos que se exigen cae bajo la responsabilidad del diseñador y se enfoca en un limitado rango de posibilidades estéticas y funcionales, mientras que otros aspectos de desempeño más formales de interés para la ingeniería son pospuestos para etapas finales. Si se amplían las evaluaciones de desempeño sobre las geometrías en etapas tempranas del diseño, el nivel de interdisciplinariedad requerido aumenta, creando una conexión entre las formas y las evaluaciones matemáticas de desempeño.

A partir de una definición abstracta de un problema de diseño, se puede obtener una solución de un objeto o elemento arquitectónico que puede ser medido en eficiencia bajo lineamientos que le permiten a diferentes disciplinas participar del proceso. La ingeniería aporta su parte introduciendo información como resultado de evaluaciones numéricas y simulaciones de desempeño por medio de software especializado, acoplándolo junto a la evolución de diferentes formas de una solución geométrica por parte de la inteligencia artificial y específicamente la utilización de algoritmos genéticos.

Con el fin de realizar pruebas sobre casos de estudio, fue necesario definir el proceso a manera de diagrama de flujo para después pasar a su implementación en las herramientas de software elegidas. La Figura 1 muestra el proceso lógico que se siguió durante la implementación de las pruebas.

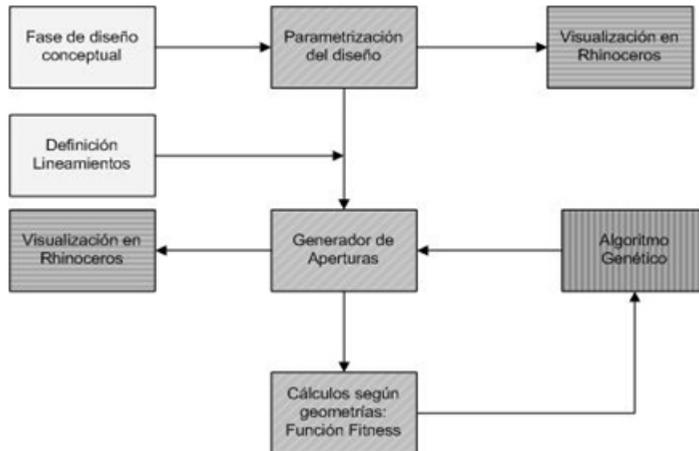


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada

A. Fase de diseño conceptual

El diseño conceptual es la fase en la que los requerimientos y los objetivos del diseño son definidos, esta primera etapa sintetiza en una idea conceptual las formas que se van parametrizar y posteriormente a analizar. En el caso de este proyecto particular, esta etapa define geoméricamente las dimensiones y proporciones de elementos arquitectónicos como: muros, piso, techo, entre otros. “Desde el campo de la informática y la tecnología, el diseño conceptual es un proceso de búsqueda iterativa en donde cada diseñador reúne, genera, representa, transforma, manipula y comunica información y conocimientos relacionados con varios ámbitos de conceptos de diseño” (Horvath, 2005). Los diseñadores inicialmente dan inicio al proceso de diseño con una función, normalmente representada como un conjunto de objetivos y limitaciones, buscando encontrar una forma que satisfaga la función inicial (Simon, 1979). Dado que se está siguiendo el proceso de diseño orientado al mejor desempeño de las formas bajo lineamientos de confort, en esta etapa se tiene en cuenta el impacto que tienen las geometrías en el cumplimiento de objetivos en cada diseño.

B. Parametrización del diseño

Con el fin de conseguir la optimización de geometrías para lograr condiciones de confort dentro de edificaciones, se propone el modelado paramétrico para la descripción de formas y sus posibles variaciones. Esta parte está pensada para hacer más eficaz el proceso de diseño ya que al parametrizar el espacio que se va a analizar, se le da al usuario la posibilidad de variar los parámetros fácilmente para generar nuevas formas. En esta etapa la definición de muros, pisos, vanos, protecciones, techos, entre otros, se hace por medio de los componentes geoméricos proporcionados por Grasshopper®. Estos son interconectados entre sí para crear las relaciones que definen la existencia del espacio completo. De esta manera, cambios en un solo aspecto generan

alteraciones dentro del sistema total. En otras palabras, las formas tienen la capacidad de ser modificadas y adaptadas a requerimientos específicos o a criterios de evaluación planteados. Esta etapa evidencia que Grasshopper® es una herramienta computacional orientada al diseño paramétrico que brinda al usuario una interfaz bien desarrollada, que cuenta con componentes autoajustables, componentes para definición de todo tipo de formas, para realizar operaciones matemáticas, operaciones entre sólidos y componentes autoprogramables, entre otros.

C. Generador de vanos o aperturas de las fachadas

Este bloque del diagrama de flujo constituye el algoritmo que se encarga de generar los vanos en un muro determinado. Se hace alusión a esta parte ya que representa un algoritmo desarrollado en C# que trabaja sobre las formas parametrizadas, donde los valores que recibe como entrada para su funcionamiento son los genomas que van a ser modificados por el algoritmo genético. Dichos valores se encuentran dentro de rangos determinados por los lineamientos de diseño de vanos desarrollados previamente que garantizan condiciones de confort dentro del espacio evaluado. Adicional a este generador de aperturas, se encuentra un generador de protecciones que según el grado de incidencia de los rayos solares en el trópico en cualquier orientación (este, oeste, norte o sur) y del número de protecciones deseado por el diseñador, retorna elementos horizontales que se encargan de cubrir el vano para evitar la incidencia del sol en horas más críticas del día.

D. Cálculos según geometrías

En esta fase es donde se calculan las relaciones existentes entre áreas de vanos y piso, porcentajes de apertura de vanos y cálculos de luminosidad dentro del espacio, entre otros.

E. Aplicación del algoritmo genético

Una vez definidos los lineamientos de diseño para aperturas de fachadas en el clima cálido húmedo tropical y parametrizado el diseño, el siguiente paso a seguir es la comprobación e implementación de tales lineamientos para obtener una geometría y ubicación en el plano vertical (muros) que asegure cumplir con condiciones de confort tropicales deseadas como iluminación, ventilación y confort térmico. Es en este punto donde se hace uso de los algoritmos genéticos como herramienta exploratoria entre forma y desempeño.

Una ventaja que representa el uso de un motor como Galapagos®, el cual se encarga por sí mismo de la aplicación del algoritmo genético para la optimización –en este caso de geometrías–, es la posibilidad de configurar de manera sencilla aspectos de definición del mismo como la cantidad de individuos en la población inicial y el poder realizar mutaciones en cualquier momento, para evitar encontrar un óptimo local durante la optimización. Por su parte, el papel que desempeña el usuario está en definir las condiciones que se tendrán en cuenta para seleccionar las soluciones más aptas, es decir, es el usuario quien tiene la responsabilidad de definir la función de *fitness*.

Durante la ejecución de la optimización, Galapagos® le proporciona al usuario una serie de datos y gráficos concernientes al proceso, dándole la alternativa de intervenir cuando le parezca apropiado o simplemente para llevar un registro de las soluciones y poder tomar decisiones sobre los resultados finales. La Figura 2, muestra los gráficos proporcionados por el software durante la ejecución del algoritmo genético con su respectivo significado.

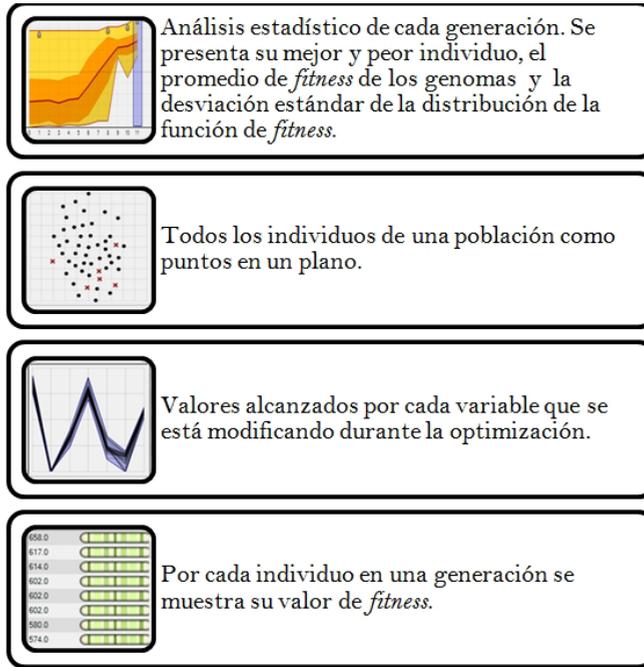


Figura 2. Gráficos generados por Galapagos® durante una optimización de vanos

F. Implementación del modelado paramétrico y optimización de geometrías en un espacio simple

Para iniciar la exploración de las herramientas y los procedimientos mencionados anteriormente, en búsqueda de conseguir implementar los lineamientos de confort, fue preciso comenzar con la parametrización de un espacio simple. Esta elección inicial tiene como fin definir los bloques necesarios para generar los vanos e ilustrar las estrategias que se siguen en dicho proceso.

Se seleccionó como modelo inicial un espacio de dimensiones de 3x4m, con altura de 3.5 m, muros con un espesor de 0,15 m y una cubierta a cuatro aguas, con una apertura o vano hacia el exterior en la fachada Este. Una vez definido el diseño conceptual se pasó a parametrizar las formas definidas, especificando cuáles variables iban a ser estáticas y cuáles podían ser modificadas por el usuario en cualquier momento. Además, se precisaron las variables que serían consideradas como genomas del algoritmo genético:

dimensiones del vano. Seguidamente se pasa a formular el problema de optimización, donde entran a considerarse variables específicas y restricciones especiales para el espacio.

Por último se procedió con la ejecución del algoritmo genético, su función de adaptabilidad entrega un valor que hace referencia al confort obtenido después de evaluar en cada individuo sus dimensiones y la forma en que estas se relacionan con propiedades como: ventilación, iluminación, forma y ubicación. De cada ejecución del algoritmo se analizaron las tres últimas generaciones, pues contaban con individuos aptos para determinar la forma del vano que iba a ser seleccionada. Este proceso se llevó a cabo con el fin de definir una muestra de carácter propositivo referente a diversas soluciones de vanos para la arquitectura tropical donde la forma garantizaba un desempeño óptimo en términos de confort. La Figura 3 presenta las fases de la implementación.

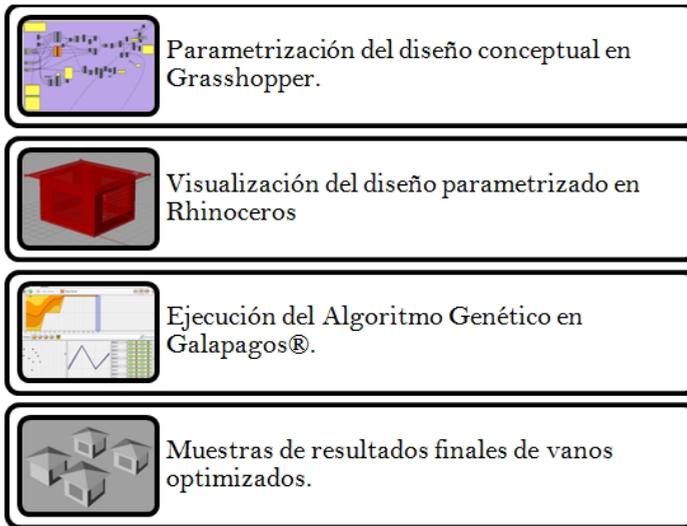


Figura 3. Fases de la implementación del modelado paramétrico y optimización de geometrías en un espacio simple

.....

G. Implementación del modelado paramétrico y optimización de geometrías en un caso real.

Una vez se completó la implementación y optimización del modelo básico, se hizo la aplicación del mismo modelo a un caso real. Para esta fase se modeló tridimensionalmente una vivienda real ubicada en el Valle del Cauca, la cual no registró un diseño adecuado de sus vanos en relación al confort térmico, según mediciones y evaluaciones realizadas previamente. Las pruebas se realizaron en un solo espacio de la casa modelada con el fin de demostrar que se podía escalar a un caso real lo diseñado y programado en el caso básico.

Después del análisis de este caso de estudio, se observó (al igual que en el caso básico) que cuando los valores de los genomas eran aptos para cumplir con las condiciones que se habían establecido para el vano, se aplicaba una serie de premiaciones sobre el fitness de la forma permitiendo que se sobreviviera a una próxima generación. Adicionalmente, se identificaron las relaciones entre las variables a analizar, cuáles estaban relacionadas directamente y cuáles no. Finalmente, después de ejecutar la optimización, se presentaron formas que diferían de las originales, donde las nuevas geometrías eran más aptas para generar confort dentro del espacio (ver figura 4).

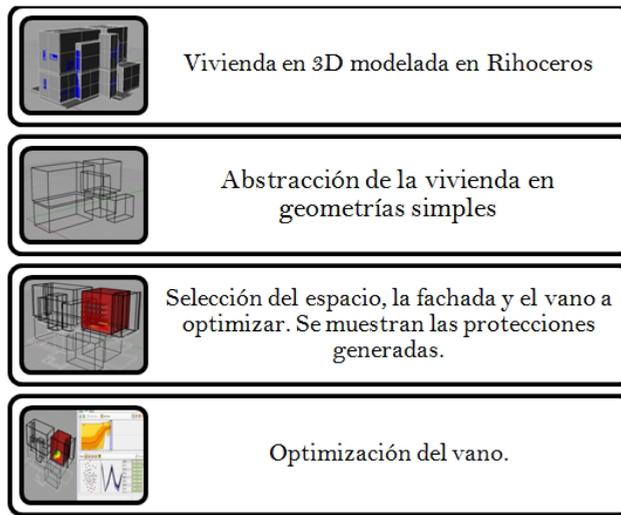


Figura 4. Implementación del modelado paramétrico y optimización de geometrías en un caso real

Conclusiones

El número de resultados obtenidos en comparación con el tiempo de ejecución del algoritmo genético es mínimo, lo que demuestra que el uso de estas herramientas permiten que el proceso de diseño deje de ser intuitivo y se vuelva más cuantificado y probado, en otras palabras, más orientado hacia las necesidades que intenta satisfacer.

Con el uso de Grasshopper® y Galapagos® conseguir diseños basados en la sostenibilidad y el bienestar humano son posibles en las etapas tempranas del diseño, proporcionando resultados sostenibles que beneficien a las personas asegurándoles condiciones de confort.

Las herramientas computacionales - siendo de nuestro principal interés la implementación de algoritmos genéticos- pueden convertirse en apoyo en el proceso

de diseño. Una de las necesidades que se puede suplir con la aplicación de algoritmos genéticos en este proceso es la carencia de propuestas óptimas ante un problema. Gracias a que este tipo de técnicas abarcan de manera muy rápida los espacios de búsqueda, se pueden encontrar un mayor número de soluciones que habrían escapado de la visión del diseñador, dejando en evidencia que la evaluación humana es lenta si se compara con la evaluación de un algoritmo genético a su función de *fitness*.

Finalmente, las herramientas computacionales y el proceso generativo se convierten en aliados del diseñador, capaz de generar formas inesperadas, estimulando su creatividad. En este caso, de la mano con la optimización de las geometrías y sus relaciones con el espacio al que pertenecen, donde cada optimización le da al diseñador la capacidad de elegir entre diferentes formas, evitando de esta manera subyugar su estilo-estética.⁵⁷

Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias a la financiación de la Universidad Icesi de Cali, Colombia.

Referencias bibliográficas

-
- Aris, T., Geros, V. & Bourdakis, V. (2006). Energy conscious automated design of building facades using genetic algorithms. En V. Bourdakis and D. Charitos (Eds.) *Communicating Space(s)*, (pp. 898-903). Liverpool, UK: eCAADe
- Bravo, G., González, E.M. & Gaudi, C. (2009). About Thermal Comfort: neutral temperatures in the humid tropic. *Palapa*, 4(1), 33-38, [En línea]. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=94814777005>
- Caldas, L. (2001). *An evolution based generative design system: Using adaptation to shape architectural form* [Doctoral Thesis]. Massachusetts Institute of Technology
- Grimme, F., Laar, M., & Moore, C. (2006). *Hombre y clima- estamos perdiendo nuestra adaptación al clima?* San José, Costa Rica: Instituto de arquitectura tropical
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Harbor, MI: University of Michigan Press
- Horvath, I. (2005). On some crucial issues of computer support of conceptual design, D. Talaba, T. Roche (Eds.), *Product engineering: eco-design, technologies and green energy*, Netherlands: Springer
- Marin, Ph, Bignon, J.C. & Lequay, H. (2008). *Integral evolutionary design, integrated to early stage of architectural design process*. Recuperado de <http://www.crai.archi.fr/media/pdf/marin-ddssIntegralEvol.pdf>
- Marin, Ph, Bignon, J.C. & Lequay, H. (2008). A Genetic Algorithm for Use in Creative Design Processes [ACADIA: Biological Processes and Computation.

- College of Design, University of Minnesota, USA]. Recuperado de <http://www.crai.archi.fr/media/pdf/marin-acadia%20A%20genetic%20algorithm.pdf>
- Renner, G., & Ekárt, A. (2009). Genetic algorithms in computer aided design. *Computer-Aided Design*, 35(8), 709-726
- Simon. H.A. (1979). *Models of Thought*, New Haven, CT: Yale University
- Tedeschi, A. (2011). *Parametric architecture with Grasshopper*. Brienza, Italia: Edizioni Le Penseur
- Turrin, M., von Buelow, P., & Stouffs, R. (2011). Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 656-675
- Torres, S.L., & Sakamoto, Y. (2007). *Facade design optimization for daylight with a simple genetic algorithm* [Proceedings of Building Simulation 2007, Beijing]. Recuperado de http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p117_final.pdf

Currículum vitae

Maria Clara Betancourt Velasco

Arquitecta, Universidad de San Buenaventura, Cali. Master in design, Domus Academy, Italia. Master of Arts in Design, University of Wales, Inglaterra. Directora del Departamento de Diseño, Universidad Icesi, Cali. Profesor investigador del grupo Leonardo.

Rodrigo García Alvarado

Arquitecto de la Pontificia Universidad Católica de Chile, con maestrías en Arquitectura e Informática de la Universidad Politécnica de Madrid, España, y doctorado en Arquitectura de la Universidad Politécnica de Catalunya, España. Académico de la Facultad de Arquitectura y Director del Doctorado en Arquitectura de la Universidad del Bio Bio (Concepción, Chile). Investigador del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico [Fondecyt], el Servicio Alemán de Intercambio Académico [DAAD], la Fundación Andes y el Fondo de Desarrollo de las Artes y la Cultura [Fondart], en Chile.

Lina Marcela Quintero Villarreal

Estudiante en práctica de Ingeniería Telemática de la Universidad Icesi. Investigadora y miembro activo del grupo de investigación en diseño Leonardo. Trabajó como monitora durante cuatro años en los cursos de Algoritmos y Lenguajes I de la Universidad Icesi. Ganadora y representante por Colombia a nivel internacional en el concurso de Microsoft Corporation Imagine Cup 2010 en la categoría de diseño de software.