

# Applications of generative design in structural engineering

## Aplicaciones del diseño generativo en la ingeniería estructural

G. Díaz \*, R.F. Herrera <sup>1\*</sup>, F.C. Muñoz – La Rivera \*<sup>\*\*</sup>, E. Atencio \*

\* Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – Valparaíso, CHILE

\*\* Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona, SPAIN

Fecha de Recepción: 13/11/2020

Fecha de Aceptación: 10/01/2021

PAG 29-47

### Abstract

*The traditional structural design produces elements that can be improved from the point of view of the use of the material. As a way of perfecting these processes, methodologies such as BIM have emerged, which, although they fulfill their mission of creating information models through collaborative work, their form of parameterization is still limited. In this context, the generative design emerges as a way of designing by stipulating the parameters and restrictions to be met so that the code then delivers different alternative solutions. This document aims to synthesize different generative design applications in structural engineering to extend its use in civil engineering. To achieve this, a literature review, and a survey of professionals in the area were used to obtain their opinion. As a result, seven application cases were obtained, where the main use identified for generative design is the optimization of the amount of material for structural elements. Besides, most of the respondents are unaware or have little knowledge of what this process is about, although, after understanding it, they believe it can be used in their professional practice.*

**Keywords:** Generative design, parametric design, structural engineering; optimization, BIM

### Resumen

El diseño estructural tradicional produce elementos mejorables desde el punto de vista de la utilización del material. Como una forma de perfeccionar estos procesos, han surgido metodologías como BIM, la cual, si bien cumple su misión de crear modelos de información, a través del trabajo colaborativo, su forma de parametrización es aún limitada. En este contexto surge el diseño generativo como una forma de diseñar estipulando los parámetros y restricciones a cumplir, para que luego el código entregue diferentes alternativas de soluciones. Este documento tiene como objetivo sintetizar diferentes aplicaciones del diseño generativo en la ingeniería estructural, como forma de extender su uso en la ingeniería civil. Para lograrlo se usó la revisión de literatura y una encuesta a profesionales del área para obtener su opinión. Se obtuvo como resultado siete casos de aplicación, donde el principal uso identificado para el diseño generativo es la optimización de la cantidad de material para elementos estructurales. Además, la mayoría de los encuestados desconocen o conocen poco sobre lo que trata este proceso, aunque, luego de comprenderlo, lo creen factible de utilizar en su ejercicio profesional.

**Palabras clave:** Diseño generativo, diseño paramétrico, ingeniería estructural, optimización, BIM

## 1. Introducción

Actualmente, el diseño estructural funciona con procesos convencionales que, si bien compatibilizan con los métodos tradicionales de construcción, también restringen la flexibilidad del diseño. Esto provoca algunos elementos estructurales ineficientes, ya que, en determinados casos se utiliza más material del necesario para cumplir con los requerimientos solicitados. Lo anterior, produce sistemas más costosos y con mayor impacto ambiental. Esta situación está empezando a cambiar, ya que actualmente se cuenta con la tecnología necesaria para construir estructuras con formas geométricas más complejas, gracias al desarrollo de herramientas como las impresoras 3D (de hormigón y acero). De este modo, se permite la consideración de diseños alternativos a los tradicionales (Abdallah et al., 2019).

Para optimizar los procesos de diseño y construcción, en los últimos años han surgido metodologías y tecnologías capaces de administrar enormes cantidades de información, con el fin de cambiar la forma tradicional de trabajar y así reducir pérdidas económicas en la producción, disminuir el tiempo de diseño, evitar conflictos constructivos, realizar simulaciones del modelo, entre otros (Muñoz-La Rivera et al., 2020).

Una de estas soluciones consiste en la implementación de la metodología Building Information Modeling (BIM) (Singh, 2020), la cual sirve para realizar el diseño, construcción, administración de instalaciones, renovación e incluso demolición y se basa en un modelo de información integrado del proyecto que codifica, además de su geometría, otros aspectos como las relaciones espaciales, los componentes del edificio, entre otros. (Jabi, 2013). BIM funciona durante todo el ciclo de vida de los proyectos, para hacerlos más eficientes, permitir la cooperación interdisciplinaria, aumentar el nivel de detalle del modelo, probar diferentes alternativas de diseño y demás (Muñoz-La Rivera et al., 2019). Esta metodología puede ser aplicada a través de softwares, como Autodesk REVIT y Autodesk ROBOT.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – Valparaíso,  
CHILE  
E-mail: rodrigo.herrera@pucv.cl



Los modelos realizados bajo programas que trabajan en entornos BIM pueden usarse para resolver conflictos constructivos entre diferentes disciplinas, dividir el modelo en etapas, insertar gran nivel de detalles, entre otros. Para poder realizar dichas tareas, los softwares mencionados se apoyan, entre otras tecnologías, en herramientas de modelamiento paramétrico, con el cual se definen y controlan relaciones geométricas y espaciales esenciales, junto con información de cada elemento incorporado, para la realización de un modelo tridimensional paramétrico (Cavieres, 2007). Dicho lo anterior, en la práctica se habla de 6D o 7D, donde se incluyen además de la información gráfica del modelo, el tiempo, el costo, la operación y el desarrollo sustentable (Andreani et al., 2019).

El diseño paramétrico se refiere a una forma de modelamiento en la cual se especifican relaciones entre varios parámetros, como la forma, dimensiones y posicionamiento de objetos, con la ventaja de que el diseñador puede ajustar rápidamente algunos y el resto del modelo actuará en consecuencia. El reajuste generado en el modelo a partir de los cambios realizados por el usuario lo realiza el propio software basado en las reglas establecidas anteriormente por el diseñador (Jabi, 2013). Estas permutaciones deben ser posteriormente evaluarlas para verificar que cumplan con su objetivo. Lamentablemente, los softwares tradicionalmente usados en la metodología BIM brindan poca flexibilidad en cuanto a exploración de alternativas de diseño en etapa de anteproyecto, ya que la parametrización que ofrecen, se reduce en cambiar dimensiones y características de elementos preestablecidos en las librerías del programa, tales como muros, ventanas, columnas y escaleras (Cavieres, 2007).

Es en este contexto donde surge el diseño generativo (Lajas Benítez, 2019), que permite a los diseñadores e ingenieros definir parámetros como materiales, restricciones espaciales, métodos de fabricación o limitaciones de costos (Autodesk, n.d.), para crear conjuntos de reglas o algoritmos (Lajas Benítez, 2019) y así explorar automáticamente variadas permutaciones del modelo, donde el software genera las mejores alternativas de diseño según los objetivos propuestos previamente (Autodesk, n.d.). Por consiguiente, en el diseño paramétrico es el usuario quien puede modificar fácilmente la geometría del modelo (o la variable deseada) para posteriormente hacer una evaluación de estas variaciones, en tanto que, en el diseño generativo, es el software quien toma los inputs, los evalúa y crea con ello alternativas que cumplan de mejor manera con los requerimientos propuestos por el usuario (Cavieres, 2007).

Una de las desventajas de desarrollar un código de diseño generativo es que implica invertir tiempo y trabajo de parte de la empresa o del usuario. Aunque por otro lado, se debe considerar que entre más precisa y completa se haga esta herramienta, mayor será el ahorro de tiempo en procesos operativos futuros que se puedan resolver con dicho código (Lajas Benítez, 2019). Los procesos generativos emergen entonces, como formas de acelerar las etapas tempranas del diseño (Johan et al., 2019).

En general, se asocia el uso de estas herramientas sólo con la geometría, aunque en ingeniería, un modelo generativo comprende un conjunto de reglas y características físicas, dadas por ejemplo, por los materiales, los cuales deben caracterizarse mediante sus propiedades mecánicas (Johan et al., 2019). Estos parámetros sirven para describir rangos, límites y disposiciones específicas. Entonces, dependiendo del problema que se quiera resolver, se utilizarán unos u otros parámetros (o combinaciones de ellos), esto es una herramienta interesante para conjugar variables que a simple vista no se relacionan tan claramente entre sí (como pueden ser los límites de una edificación y la radiación solar) y así construir una variedad de soluciones aproximadas.

Dado que la ingeniería civil se encarga de realizar estudios de factibilidad, proyección, dirección, inspección y construcción de obras, operación y mantenimiento de estructuras (Deiana et al., 2018); trabaja frecuentemente con muchos de los parámetros mencionados anteriormente. Éstos dependen de la rama o subdisciplina que se esté estudiando, ya que en cada una se analizan diferentes características, comportamientos y propiedades de determinados elementos (Deiana et al., 2018).

Con el fin de acercar el diseño generativo a la ingeniería civil, se delimitó este estudio a la ingeniería estructural (donde ha tenido limitados usos (Abdallah et al., 2019)), ya que se encuentra más en contacto con la arquitectura, área que según lo ahondado, posee variadas experiencias con este proceso. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es recopilar experiencias de aplicación del diseño generativo en la ingeniería estructural, junto con analizar sus respectivas ventajas y factibilidad de implementación. Todo esto como base para dar a conocer, cimentar y expandir los usos y beneficios de esta metodología en esta área y, por consiguiente, en las demás subdisciplinas de la ingeniería civil.

## 2. Metodología de investigación

Dado que el presente estudio es de tipo exploratorio, se desarrolló mayormente a través de revisión de literatura y recopilación de datos. Por lo anterior, la metodología de investigación se organizó en tres etapas: (1) identificar aplicaciones del diseño generativo (DG) en la ingeniería estructural; (2) apreciación del DG por parte de



ingenieros civiles; y (3) propuestas de aplicaciones del DG en la ingeniería estructural. Las herramientas, actividades y entregables de cada fase se detallan en la (Figura 1).

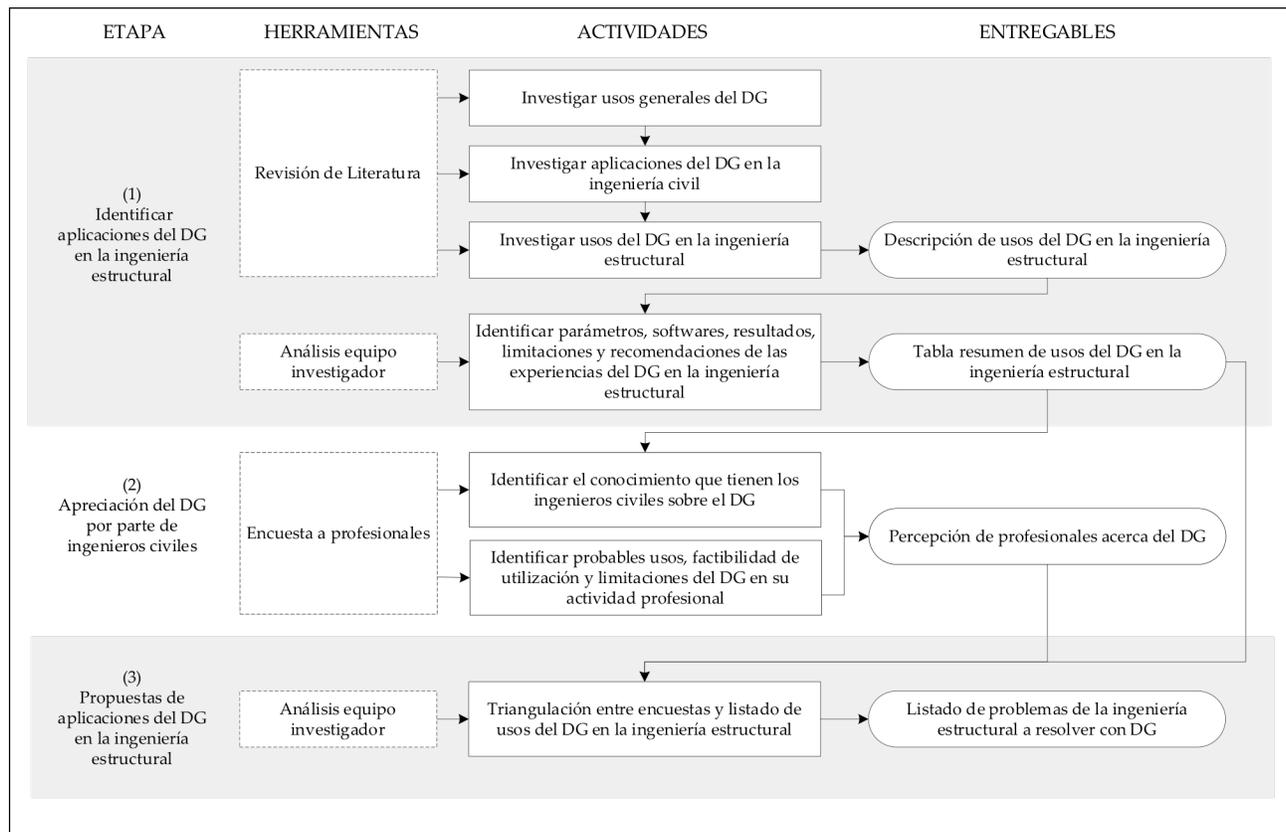


Figura 1. Metodología de la investigación

Para la revisión de literatura en la primera etapa se usaron bases de datos como Web of Science, Scopus, Scielo y Google Scholar, empleando como conceptos claves "diseño generativo", para luego agregar la palabra "ingeniería" y finalmente "estructural" (y sus respectivas traducciones al inglés) y los operadores booleanos and ("y"), or ("o") y not ("no") (Hernández Sampieriet al., 2014). En una instancia temprana se incluyó también las palabras "arquitectura" y "diseño paramétrico", que es donde se descubrió la mayor cantidad de información, para luego excluirlo (a través del not), para enfocar la búsqueda en el diseño generativo en la ingeniería estructural, como puede verse en la (Tabla 1). Finalmente, se leyeron 67 documentos, de los cuales se presentaron 48, que fueron publicados entre los años 2005 y 2020.

Los resultados obtenidos corresponden a tesis de grado y post-grado, artículos en revistas científicas (y de arquitectura) y libros, tanto de Chile como internacionales (en idiomas español e inglés); además de la página web de Autodesk y Dynamo (desarrolladores de softwares de diseño generativo). El orden de lectura de los documentos fue: título, abstract, conclusión y finalmente, para los escritos que se estimaron pertinentes a la investigación, el cuerpo. Su compilación se hizo mediante el programa Mendeley y se privilegiaron los documentos más recientes (el título citado más antiguo en este escrito es del año 2007).



**Tabla 1.** Tópicos abarcados en cada referencia bibliográfica

Autor/es	Diseño paramétrico	Arquitectura	Diseño generativo	Ingeniería	Ingeniería estructural
(Jabi, 2013)	x	x			
(Lyon Gottlieb & García Alvarado, 2011)	x	x			
(Marsault, 2018)	x	x			
(Cavieres, 2007)	x	x			x
(Alfageme García, 2016)	x	x			x
(Gonzales, 2018)	x				x
(Lajas Benítez, 2019)	x				x
(Muttio, Botello, & Tapia, 2017)	x				x
(Chen, Lu, & Lin, 2005)	x				x
(Martínez-rocamora, García-alvarado, Casanova-medina, González-böhme, & Auat-cheein, 2020)	x	x		x	x
(Jige Quan, 2019)	x	x	x		
(Betancourt, García Alvarado, & Quintero Villarreal, 2012)	x	x	x		
(Salcedo Lagos, 2012)	x	x	x		
(Touloupaki & Theodosiou, 2017)	x	x	x		
(Lyon Gottlieb & García Alvarado, 2011)	x	x	x		
(Dennemark, Aicher, Schneider, & Hailu, 2017)	x		x	x	
(Chang, Saha, Castro-Lacouture, & Pei-Ju Yang, 2018)		x	x		
(Rodrigues et al., 2018)		x	x		
(Zhang, Tong, Huang, & Zhang, 2019)		x	x		
(Velasco, 2015)		x	x		
(Wang, Janssen, Chen, Tong, & Ji, 2019)		x	x		
(Cichocka, 2015)		x	x		
(Singh & Gu, 2012)			x		
(Cocco, 2014)			x		
(Rodrigues, Amaral, Rodrigues, & Gomes, 2015)			x	x	
(Oh, Jung, Kim, Lee, & Kang, 2018)			x	x	
(Marinov et al., 2019)			x	x	
(Jarquín Laguna, 2014)			x	x	
(García Alvarado & Lyon Gottlieb, 2013)	x	x	x		x
(Bertollini, 2019)		x	x	x	x
(Bonelli & Gudiño Gutierrez, 2015)	x		x		x
(Van Telgen, 2020)	x		x	x	x
(Hofmeyer & Davila Delgado, 2015)	x		x		x
(Plocher & Panesar, 2019)	x		x		x
(Johan et al., 2019)			x	x	x
(Turney, 2020)			x	x	x
(Abdallah et al., 2019)			x		x
(Paschke, Neuhäuser, De Rycke, & Gengnagel, 2019)			x		x
(Herr & Fischer, 2013)			x		x
(Reintjes, Hartisch. Michael, & Lorenz, 2018)			x		x
(Daicong, Xia, Guangyo, & Huang, 2017)					x
(Uarac, Cendoya, & Sanhueza, 2015)					x



En la segunda instancia de la investigación, se hicieron encuestas online (con preguntas abiertas y cerradas), a través de la plataforma *SurveyMonkey*, la cual fue respondida desde el 24 de agosto 2020 hasta el 11 septiembre de 2020. El instrumento fue dirigido a ingenieros civiles dedicados al diseño estructural.

En una primera sección del sondeo se caracterizó a los encuestados para derivarlos a una de las dos formas de la segunda sección de la encuesta (A y B), como se indica en la (Tabla 2); la primera para aquellos ingenieros que declararon haber trabajado con diseño generativo, mientras que la segunda fue aplicada a los profesionales que expresaron desconocer la metodología, o conocerla, pero no haber trabajado con ella.

Los encuestados que declararon haber utilizado la metodología, fueron consultados sobre los problemas y beneficios que obtuvieron aplicándola (pregunta abierta), mientras que a los demás encuestados se les preguntó sobre la posible factibilidad de implementación (pregunta cerrada) e ideas sobre qué proceso se podría optimizar con el diseño generativo (pregunta abierta).

**Tabla 2.** Descripción secciones encuesta

<b>Parte 1</b>	Identificación del encuestado: cantidad de años de experiencia en el diseño de estructuras, tipos de proyectos que diseña usualmente, conocimiento y utilización del DG.			
<b>Parte 2</b>	<b>Forma A: Profesionales sin experiencia en el DG</b>		<b>Forma B: Profesionales con experiencia en el DG</b>	
	A.1	Video explicativo sobre el DG (obtenido de la página de Autodesk) y tabla resumen de usos del DG en la ingeniería estructural	B.1	Experiencias, beneficios, limitaciones y factibilidad de aplicación del DG.
	A.2	Aspectos y problemas para mejorar con el DG, factibilidad del uso del DG,	B.2	Problemas de su práctica profesional que pudieran resolverse con el DG.

### 3. Resultados y discusión

En la (Tabla 3) se muestran algunas de las variables utilizadas en diseños paramétricos y generativos. En ella se muestra la diversidad de los tipos de parámetros, que a pesar de estar pensada para diseño paramétrico, se extrapoló a diseño generativo, ya que ambas metodologías comparten el tipo de variables a evaluar, que pueden ser del tipo: ambientales (acerca del entorno de localización de la estructura), globales (del volumen general o envolvente del proyecto), locales (de elementos particulares) y de ejecución (relativo a la realización de algunos elementos) (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013). Posteriormente, se ejemplifica su uso a través de siete casos de aplicaciones concretas del diseño generativo en la ingeniería estructural.



**Tabla 3.** Taxonomía de parámetros (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013)

Parámetros ambientales (PA)	Parámetros globales (PG)	Parámetros locales (PL)	Parámetros de ejecución (PE)
Datos geográficos: topografía, vistas, tipos de suelo, etc.	Dimensiones o proporciones generales: rangos mínimos y máximos para largo, ancho, profundidad, curvatura, etc.	Dimensiones o proporciones de componentes: rangos mínimos y máximos para largo, ancho, profundidad, cantidad, etc.	Dimensiones de producción: tamaño de materiales y máquinas de ejecución.
Datos climáticos: orientación, temperatura, humedad, radiación, vientos, etc.	Requerimientos funcionales: prestaciones de confort, ergonomía, accesibilidad.	Interacción con otros componentes: condiciones de borde y respuesta a configuraciones adyacentes.	Propiedades materiales: rangos de resistencia o flexión.
Situación contextual: restricciones normativas de situación urbana, materialidad, tipología (aislado, pareado, torre, placa, etc).	Distribución global: relaciones y topología interna.	Respuesta a valores de análisis: profundidad o espesor de las piezas según asoleamiento o solicitaciones estructurales.	Características del producto: color, textura, terminación, etc.
Relaciones del entorno: flujos peatonales, vehiculares, presencia de singularidades, referencias, etc.	Condiciones expresivas: configuración de fachadas y materialidad.	Condiciones finales: variación gradual entre componentes.	Valores de aplicación: costos del proyecto.
Dimensiones del sitio: Ancho y profundidad del lote, pendiente, límites de edificación.	Restricciones técnicas: crujías y voladizos según sistema estructural.	Requerimientos de montaje: tipos de ensamblaje, unión y dilatación entre componentes.	Dimensiones para transporte: magnitudes de vehículos y operación.

### 3.1 Casos de aplicaciones del diseño generativo en la ingeniería estructural

#### Caso A: Modificación de la estructura para el control de deformaciones

Como antecedente a este caso, tenemos que (Huang y Xie, 2010) propusieron optimizar el material en elementos estructurales (en este caso vigas) a través de un esquema híbrido de *Bi-directional Evolutionary Structural Optimization* (BESO), donde en lugar de remover totalmente los elementos ineficientes, éstos eran reemplazados por componentes de menor densidad, cumpliendo con que determinado punto de la estructura final satisficiera cierto desplazamiento admisible para una fracción del volumen inicial. Esta metodología (ejecutada a través de un código en MatLab) resultó eficiente y mostró que a medida que el volumen disminuía, la estructura tomaba configuraciones tipo cercha, con elementos tipo barra en tracción y compresión (Uarac et al., 2015).



En otro contexto, dada la condición del suelo en Países Bajos (capas gruesas de arcilla sobre capas de arena), los edificios de oficinas de gran altura suelen tener un núcleo de hormigón para la estabilización lateral. En este entorno, se creó la configuración de un núcleo central para un edificio de veinte pisos (con tres cabinas para ascensor, una escalera y un pasillo central), para variar su dimensionamiento y encontrar un equilibrio entre el tamaño del núcleo y la base más pequeña, o sea, entre hacer la estructura más rígida (y evitar mucha deflexión por el viento) y la más económica. Se usaron los programas Packhunt.io y Viktor.ai, además de uno propio de la empresa Arcadis "DynamoRFEM" (junto con Refinery) (Van Telgen, 2020).

La longitud de la parte de la pared que presenta la puerta de acceso varió de 3 [m] a 6 [m] y la cantidad de pilas en direcciones X (4 a 8) e Y (4 a 6) según la (Figura 2), lo que resultó en 105 opciones de diseño que luego se filtraron las que cumplían con que las deformaciones laterales del edificio fueran entre 0,6 y 0,7 [cm]. Los resultados muestran que ésta es una herramienta valiosa para flexibilizar el diseño en etapas tempranas y ayuda al diseñador a tomar decisiones que llevarían mucho más tiempo calcular de forma tradicional. Aunque todavía falta vincular los datos estructurales con una estimación de costos (Van Telgen, 2020).

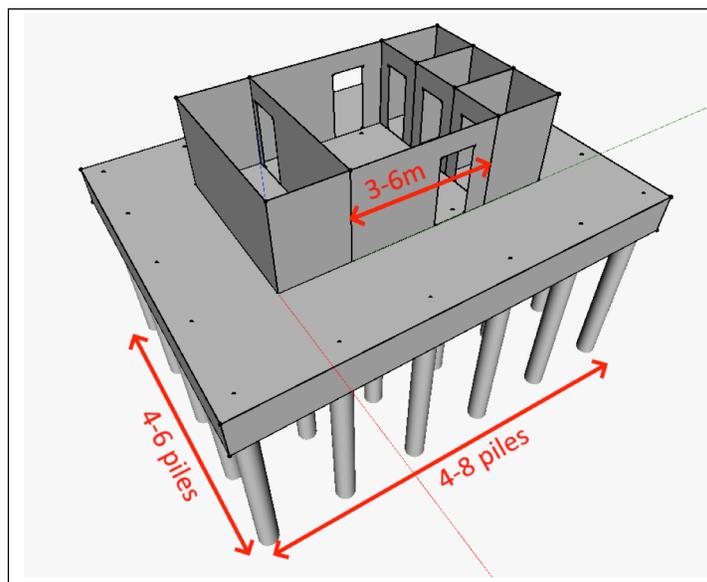


Figura 2. Núcleo de edificio a optimizar (Van Telgen, 2020)

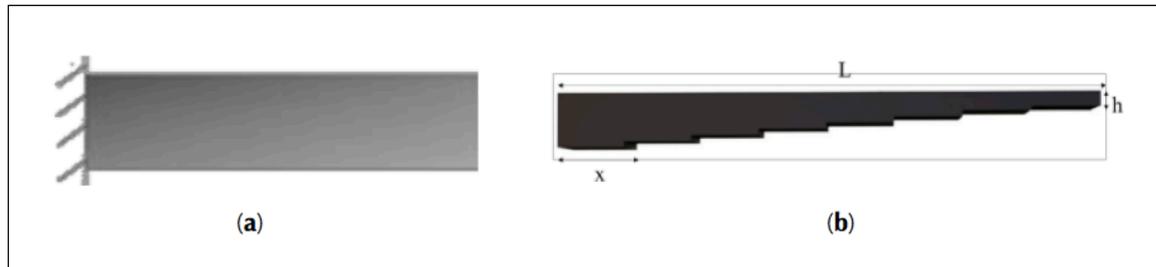
### Caso B: Optimización de viga en voladizo con impresión 3D

Actualmente, la impresora 3D ofrece la opción de incluir parámetros y criterios cada vez más sofisticados en los diseños arquitectónicos, tales como el análisis de estructuras con elementos finitos y comportamiento térmico. Además, gracias a esta mayor libertad en el diseño se puede incorporar inteligencia artificial y algoritmos de aprendizaje automático en el proceso de creación, pudiendo el diseñador evaluar automáticamente las soluciones según algún criterio predefinido (Martínez-Rocamora et al., 2020).

En este trabajo se desarrolló una herramienta de diseño para vigas de hormigón armado con capacidades estructurales suficientes, pero utilizando menos materiales y recursos. Siguiendo las pautas de diseño del código de la American Concrete Institute (ACI), se analizó estructuralmente una viga en voladizo para relacionar los parámetros geométricos con los de capacidad estructural. La optimización se logró minimizando la profundidad y la relación de refuerzo de acero en cada segmento a lo largo de su longitud partiendo como la (Figura 3 (a)) hasta llegar a la (Figura 3 (b)) (Abdallah et al., 2019).

Se utilizó MatLab para optimizar la viga y calcular la disminución del costo y de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre la estructura convencional y la nueva. Este proceso resultó en vigas más ligeras y económicas que cumplen con los requerimientos estructurales de la ACI. Se redujo significativamente el costo de entre 40% y 52% el inicial y de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre 39% y 51%, por viga. Adicionalmente, si esta herramienta de diseño se aplicara a todas las vigas similares de un edificio, su impacto sería aún más significativo (Abdallah et al., 2019).

Es importante mencionar que si la viga optimizada (Figura 3 (b)) se construyera utilizando el proceso de construcción convencional, sería muy complicado y lento debido a su geometría, por lo que, para cumplir con los resultados expuestos, se recomendó utilizar impresión 3D de hormigón y acero, ya que facilitaría su ejecución. Una investigación adicional sugiere seguir esta lógica en otros elementos estructurales del edificio para crear estructuras completamente optimizadas, por lo tanto, obtener mayores beneficios económicos y ambientales (Abdallah et al., 2019).



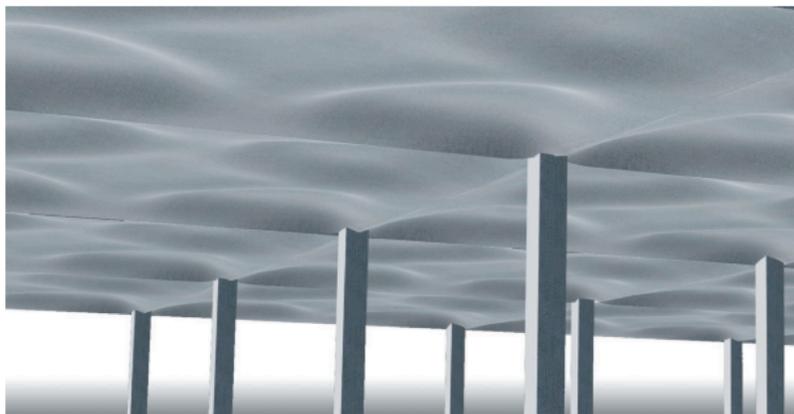
**Figura 3.** Vista de vigas en perfil (Abdallah et al., 2019) (a) Viga de diseño tradicional (b); Viga optimizada

#### Caso C: Optimización de material en losas

La optimización topológica busca distribuir el material de algún elemento estructural, dentro de cierto volumen para maximizar su desempeño cumpliendo con ciertas restricciones (Uarac et al., 2015). Dado que las losas son uno de los elementos que requiere mayor cantidad de material, son los elementos que generan mayor impacto de energía en un edificio porque, además, se componen de productos de alto consumo de carbono (acero y hormigón). Por lo anterior, se realizó una optimización con diseño paramétrico y código genético de placas horizontales cuadradas con fuerzas fuera del plano que podrían usarse como losas de hormigón armado en una edificación en zona sísmica (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013).

El análisis inicial se realizó en MatLab a través de elementos finitos, discretizando la losa bidimensionalmente en 60x60 unidades. Se redujo el material en un 50% luego de aproximadamente 30 iteraciones. Luego, se verificaron magnitudes de momento en los distintos ejes y desplazamientos máximos de 3 a 6 [mm], según la norma sísmica (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013).

Las losas desarrolladas resistieron adecuadamente las solicitaciones con la mitad del material original, lo que implica menor peso, y por lo tanto, menor costo de ejecución. Esto incide en el impacto ambiental generado por su construcción. Paralelamente, su forma (Figura 4) facilita la instalación de soportes, servicios o perforaciones, lo que puede reducir conflictos constructivos (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013).



**Figura 4.** Vista en perspectiva de la losa optimizada (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013)

## Caso D: Características de los materiales como criterio para el diseño de un reticulado plano

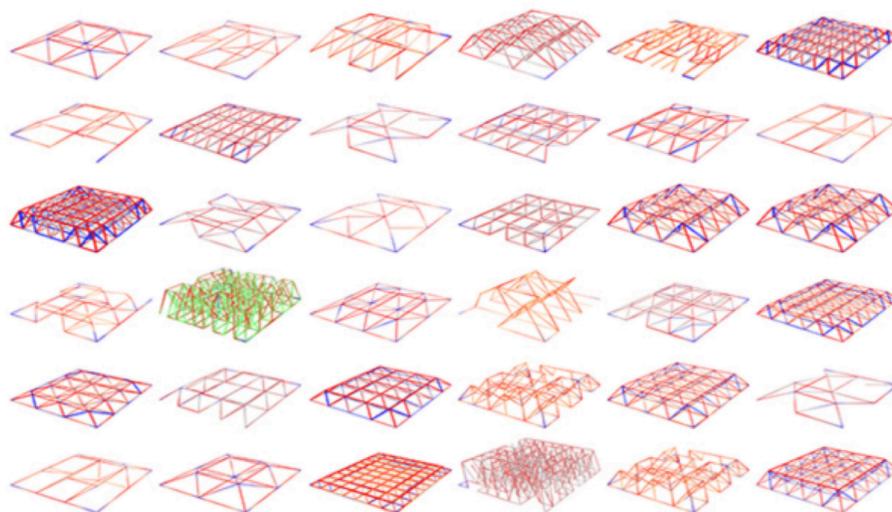
Los reticulados pueden hacerse más eficientes variando parámetros como el tipo de perfiles usados, cantidad de barras, distancia entre cordones, etc. La combinación de estas variables creará una nueva estructura con comportamiento diferente a las demás, la limitante está en que el diseñador no tiene la capacidad suficiente para evaluar todas las posibles soluciones generadas por estos cambios. (Gonzales, 2018), desarrolló diferentes optimizaciones (Figura 5) a través del diseño integral de armaduras metálicas usando Rhinoceros 3D (y los complementos Octopus y Galápagos) con diseño paramétrico y algoritmos genéticos, obteniendo reticulados con un ahorro de 28% en peso respecto de la cercha obtenida a través del método tradicional de prueba y error usando SAP2000 (Gonzales, 2018).

En el año 2019, se desarrolló un estudio cuyo objetivo fue crear un código generativo para optimizar el uso de material tradicional (acero y madera) y no tradicional (bambú) en una armadura plana. Cada miembro fue sometido sólo a fuerzas de tracción y compresión. Se utilizó el complemento C-sharp de Grasshopper, Karamaba3D y Galápagos para ejecutar los cálculos estructurales. Se concluyó conceptualmente que las armaduras planas pueden optimizarse independiente del material elegido (acero, madera o bambú). Esto ha derivado en estructuras de bambú que pueden ser óptimas en cuanto a masa total y costo, en comparación con las de acero. Estos resultados coincidieron con los que se habrían esperado utilizando materiales o técnicas tradicionales (Johan et al., 2019).

Un problema encontrado es que el proceso generativo propuesto requiere una inversión sustancial de tiempo y colaboración entre diferentes disciplinas, por lo que se tendrá que rediseñar la forma en que se percibe el proceso de diseño. Esto implicaría que los ingenieros, arquitectos, programadores y científicos de materiales tengan un nuevo espacio en el que cada aspecto de su contribución conduzca al otro. Si lo anterior se realiza sin una plataforma colaborativa digital que acomode este flujo de trabajo, los métodos de diseño generativo (como el propuesto) no pueden ser ampliamente implementados (Johan et al., 2019).

Adicionalmente, los resultados tendrían que analizarse más a fondo en un software de análisis estructural tradicional como SAP2000, ETABS u otro, ya que para los cálculos, se usó principalmente el factor de seguridad y las características de los materiales. Esto no quiere decir que un método de diseño generativo no posea calidad a un estándar profesional, porque debido a la naturaleza del marco, las nuevas condiciones de diseño y materiales pueden integrarse fácilmente para refinar aún más el rendimiento, permitiendo una exploración de las posibilidades estructurales que, de lo contrario, habrían sido ignoradas (Johan et al., 2019).

Gracias a técnicas que usan algoritmos genéticos se ha podido encontrar una mayor cantidad de soluciones, en comparación con las que hubiera creado el diseñador, lo que muestra que la evaluación humana es más lenta comparada con estas técnicas (Betancourt et al., 2012).



**Figura 5.** Resultados de optimización de armaduras (Johan et al., 2019)

### Caso E: Optimización de material para vigas profundas de hormigón armado

El principal objetivo de la optimización estructural es modificar valores de variables para maximizar o minimizar cierta función objetivo, y con ello satisfacer ciertas restricciones. Una clase de optimización de estructuras es la optimización topológica, que como se dijo, consiste en distribuir el material dentro de un volumen para maximizar el desempeño de la estructura generando diseños que no dependen del criterio del diseñador (Uarac et al., 2015).

Silveira y Vivan (Turney, 2020) usaron el diseño generativo para optimizar el hormigón armado de vigas profundas en torno a variables como el costo, el peso, el uso de materiales, el tiempo de fabricación y el rendimiento. El primer objetivo fue comprender qué partes se pueden sustraer del modelo original manteniendo la integridad estructural. Por lo anterior, el análisis se hizo mediante elementos finitos. Mientras se sacaba concreto, se tuvieron que ir agregando barras de acero como refuerzo. Entonces se buscó el punto óptimo entre ambos materiales para hacer la estructura lo más económica, rápida de construir (con impresión 3D), liviana y estéticamente agradable posible (Turney, 2020).

Fue necesario trabajar con Project Refinery y Dynamo. Se observó cómo se comportaba la viga al ir agregando carga gradualmente para fortalecer la estructura en los lugares correctos. Entonces, para cada aumento de carga, el algoritmo analizó qué elementos pequeños podrían excluirse sin comprometer el comportamiento estructural de todo el conjunto, como se observa en la (Figura 6), donde de forma ascendente, los modelos van perdiendo área transversal. Posteriormente, se construyeron físicamente 10 modelos de las 1.000 alternativas de diseño generadas por el algoritmo. Estos prototipos se probaron empíricamente con el fin de guiar las soluciones del software y así conjugar el comportamiento estructural con el material utilizado (Turney, 2020).

El equipo cree que este método ayuda a avanzar en las técnicas de construcción sustentable del hormigón, ya que el proceso se tradujo directamente en un ahorro del 55% de material en comparación con un diseño realizado completamente por un humano. Después de probar las posibilidades para reducir el material, los investigadores expresaron que el siguiente paso lógico es explorar una mejor tecnología de los materiales, incorporar la fabricación aditiva y hacer que todo el proceso sea aún más inteligente (y más ecológico). Además, sugirieron explorar la impresión 3D, ya que el encofrado tradicional restringe el concreto a líneas rectas (Turney, 2020).

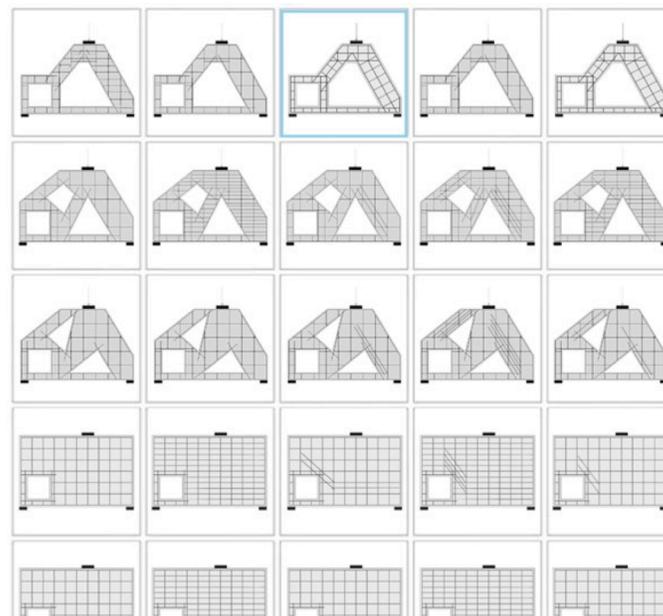


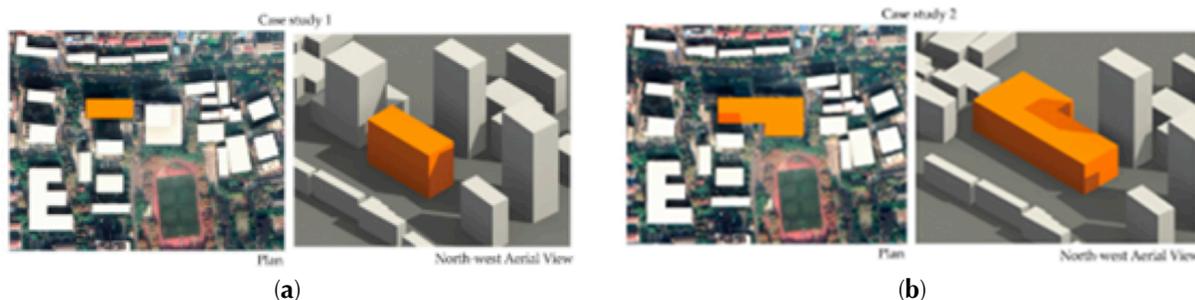
Figura 6. Proceso de optimización de viga (Turney, 2020)

## Caso F: Diseño exterior de edificios para optimización de luz natural

A pesar de que este caso se relaciona más con la arquitectura, el siguiente paso sería realizar un análisis estructural de los modelos, por lo que se consideró interesante integrarlo. En este estudio se presentaron dos edificios; uno de altura media y otro de gran elevación. Estos tienen problemas para captar la iluminación natural porque se encuentran rodeados de varias estructuras de altura media y alta (Figura 7). Para mejorar el rendimiento energético de los edificios, los arquitectos podrían generar, a través de prueba y error, distintos diseños exteriores de los mismos. Sin embargo, este proceso sería laborioso, llevaría mucho tiempo y además, las soluciones desarrolladas estarían influenciadas por los sesgos cognitivos de los arquitectos (Wang et al., 2019).

El consumo anual de energía por iluminación se calculó y mejoró mediante la herramienta de simulación DIVA (basada en Radiance), en Rhino-Grasshopper. El efecto de la optimización en la luz del día es significativo ya que mejoró en promedio un 96% en comparación con la configuración de referencia. Si al resultado de la optimización se le permitiera mayor libertad geométrica como torsión, rotación e inclinación (y no sólo formas ortogonales), se podrían mejorar aún más los resultados. El problema radica en que el modelo ya tiene incorporado un gran número de parámetros de optimización, por lo que agregar otros, podría ser ineficaz, ya que esto podría impedir encontrar otras soluciones de alto rendimiento (Wang et al., 2019).

En cambio, se recomienda dividir el proceso de optimización en dos partes. En la primera etapa, se pueden explorar diferentes formas externas del edificio, mientras que en la segunda, es posible elegir un pequeño número de modelos con características arquitectónicas deseadas y aplicarles nuevamente el proceso de optimización para desarrollar soluciones aún más específicas (Wang et al., 2019). Si los procedimientos y softwares del diseño generativo se hacen amigables para los diseñadores, esta técnica revolucionará la forma en que los arquitectos crean sus modelos, ya que cada vez hay una necesidad mayor de conciliar objetivos diferentes y contradictorios con el fin de generar edificios más sostenibles (Touloupaki y Theodosiou, 2017).



**Figura 7.** Vista en planta y aérea de los edificios; en naranja se muestra la estructura a optimizar (Wang et al., 2019) (a) Edificio gran altura; (b) Edificio altura media

## Caso G: Análisis estructural de fachadas no convencionales

Este caso, al igual que el caso F, se vincula más con la arquitectura, pero deja planteada la necesidad de hacer un análisis estructural del resultado obtenido. El diseño generativo en esta área ayudará a automatizar partes del proceso de diseño para generar soluciones más eficientes, reducir costos, optimizando, explorando mayor cantidad de alternativas y demás (Singh y Gu, 2012).

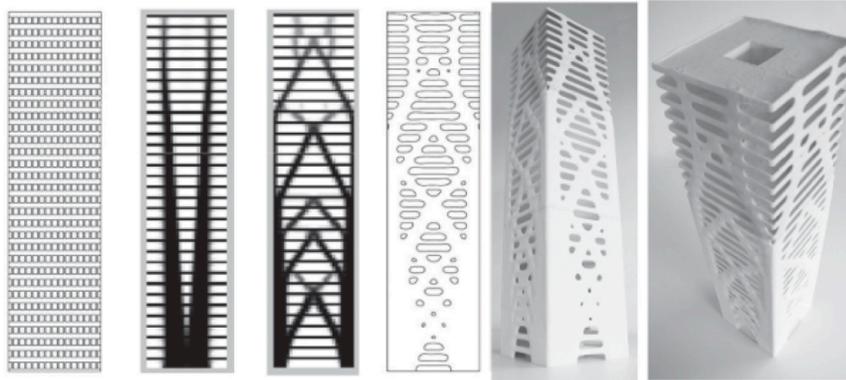
En esta investigación se rediseñó la fachada soportante de la segunda torre (proyectada pero no construida) de las oficinas Santamaría en Santiago de Chile. Luego de modelar el edificio completo en Revit, se utilizó Rhinoceros con Grasshopper para variar la geometría del volumen total y Digital Project para la definición de los componentes adaptativos de la fachada (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013).

En este caso, para la implementación del diseño generativo se involucraron arquitectos e ingenieros estructurales para definir soluciones desde diferentes criterios, tales como resistencia, desplazamientos, dimensiones mínimas y máximas de elementos constructivos, condiciones de iluminación interior y apertura de vistas relevantes. La torre se estructura principalmente a través del núcleo, aunque cada una de las cuatro fachadas tiene 14 columnas que descargan verticalmente. Dada la sismicidad de Chile se incorporaron fuerzas horizontales

en diferentes direcciones, las que pueden ser absorbidas (en parte) por los elementos de dicha fachada (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013).

Para el análisis se consideró la exposición solar de las fachadas, criterios constructivos para moldajes de hormigón armado prefabricado, y diversos modelos tanto digitales como físicos con prototipado rápido para revisar su expresión arquitectónica. En el ejercicio se buscaron las formas más eficientes a fin de reducir el material utilizado para dar mayor resistencia en los planos de fachada del edificio, controlar su exposición solar (y por lo tanto, el consumo energético necesario para su refrigeración) y modernizar su expresividad arquitectónica; así la estructura se fue transformando de izquierda a derecha de la (Figura 8). Es importante mencionar que los resultados obtenidos deben ser verificados por análisis tradicionales que permitan validar el cumplimiento de las normas vigentes y también revisar su ejecución (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013).

A medida que aumenta la preocupación por el medio ambiente y la responsabilidad que la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción (AIC) tiene en la contaminación de éste, es probable que las soluciones basadas en la experiencia de los diseñadores no sean suficientes para conciliar la complejidad de los parámetros a evaluar (Cavieres, 2007). Finalmente, las herramientas computacionales y el proceso generativo han sido capaces de generar formas inesperadas, estimulando la creatividad de los diseñadores e ingenieros (Betancourt et al., 2012).



**Figura 8.** Optimización topológica de la fachada de edificio en altura y prototipado 3D (García Alvarado y Lyon Gottlieb, 2013)

### Síntesis de casos de estudio

A continuación, se presenta la (Tabla 4) con una síntesis de los problemas que se intentaron resolver en cada caso, los tipos de parámetros usados según (Tabla 3), el o los softwares utilizados y los resultados obtenidos, junto con sus respectivas limitaciones, y en algunos casos, las recomendaciones dadas por los investigadores para futuros estudios.



**Table 4.** Case Summary

Variable/ Caso	A	B	C	D	E	F	G
Problemática	Estabilización lateral de un edificio modificando características del núcleo	Reducir materiales para construir vigas de H.A.	Reducir consumo de carbono en losas	Diseñar armaduras a partir de los materiales	Reducir material para vigas profundas de H.A.	Poca iluminación natural	Optimizar entre resistencia exposición solar
Parámetros principales	PG: Dimensiones o proporciones generales	PL: Respuesta a valores de análisis	PE: Propiedades materiales	PE: Propiedades materiales	PL: Respuesta a valores de análisis	PA: Datos climáticos y dimensiones del sitio	PA: Datos climáticos
Software	Packhunt.io, Viktor.ai, y "DynamoRFEM" (con Refinery).	MatLab	MatLab	Grasshopper con C-shaper y Karamba3D	Project Refinery y Dynamo	Rhino - Grasshoper y DIVA	Revit, Rhinoceros con Grasshopper y Digital Project
Resultados	Ahorro del tiempo de diseño en etapas previas	Reducción del costo entre 40% y el 52% de las emisiones de CO <sub>2</sub> entre el 39% y el 51% por viga	Las losas resisten las solicitaciones requeridas con la mitad del material original	Estructuras de bambú son comparables con las de acero	Ahorro del 55% de material en comparación con un diseño tradicional	Ahorro del 96% en el gasto energético	Ver Figura 8 (derecha)
Limitaciones y/o recomendaciones	Falta vincular datos estructurales con los costos	Requiere impresión 3D para su construcción. Se sugiere llevar esta metodología a una estructura completa	La forma sirve para reducir conflictos de construcción	Requiere gran inversión inicial de tiempo, recursos humanos y verificar resultados con SAP2000 o ETABS	Explorar tecnología de los materiales, fabricación aditiva e impresión 3D	No se agregaron todos los parámetros porque harían al modelo ineficiente	Resultados se deben verificar por análisis tradicionales que permitan validar el cumplimiento de las normas vigentes y también revisar su ejecución



### 3.2 Percepción de ingenieros civiles sobre el diseño generative

De las 52 encuestas válidas, se obtuvo que un 4% posee menos de 2 años de experiencia profesional en el diseño de estructuras, un 56% más de 10 años (Figura 9) y un 40% entre 2 y 10 años.. Interiorizándose en el tipo de proyectos en los que trabajan, 37 de ellos laboran en “Edificación habitacional y oficinas”, 25 en “Obras industriales”, 12 en “Obras viales” y “Edificación no habitacional” respectivamente. Respecto al diseño generativo, un 65% reconoce desconocer o tener poco conocimiento de él, un 25% declara saber lo que es y un 8% además, lo ha utilizado.

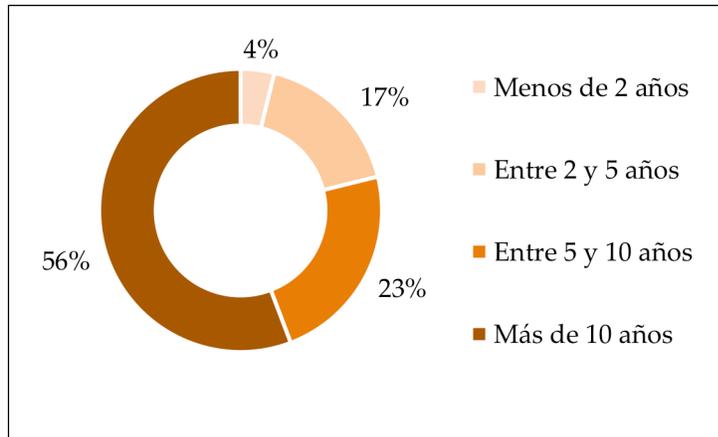


Figura 9. Experiencia profesional en el diseño de estructuras

En cuanto a los aspectos que mejoraría con el diseño generativo, 37 profesionales indicaron que usarían este proceso para optimización de recursos, 26 para optimización de tiempos de diseño, 22 para tener más opciones de diseño y 9 para ahorro energético. Respecto a la pregunta sobre qué problemas del diseño estructural pudieran optimizarse a través del diseño generativo, al ser ésta de carácter abierto, las respuestas se agruparon en los cinco tópicos que se muestran en la (Figura 10). Para la idea del prediseño (la más comentada), se observó que el concepto clave fue el de automatizar el proceso de prediseño para generar rápidamente diferentes opciones que integren costos. La segunda barra del gráfico habla sobre generar diseños no tradicionales, pero más eficientes que los utilizadas actualmente y/o considerar nuevas estructuraciones de edificaciones. La cuarta clasificación expone que a los profesionales encuestados les gustaría optimizar elementos estructurales como vigas, columnas y losas, con el fin de reducir la cantidad de material usado y en consecuencia, el costo y contaminación. La quinta categoría observada en las respuestas fue ocupar el diseño generativo para optimizar reticulados en acero y/o restringir opciones en el tipo de conexiones del mismo material, dada la naturaleza iterativa de su diseño. Por último, en el concepto “Otros” se reunieron las respuestas que no se alinearon con las demás y que tuvieron baja frecuencia (menor o igual a 2), tales como usar el diseño generativo para el dimensionamiento de fundaciones, diseño de zonas críticas de hormigón armado, “determinar redistribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura considerando la respuesta de la fundación”, diseño basado en amenaza, entre otros.

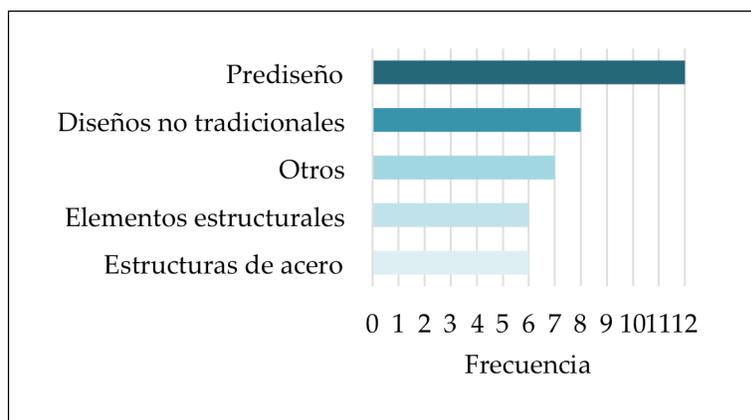


Figura 10. Experiencia profesional en el diseño de estructuras



La opinión de los profesionales encuestados que no han usado el diseño generativo respecto a la factibilidad de emplear este proceso en la ingeniería civil se muestra en la (Figura 11). En estos resultados se observa que sólo el 2% cree que es “nada factible”, mientras que el 21% lo considera “poco factible”; por el otro lado, un 67% lo ve como “factible” y un 10% como “muy factible”.

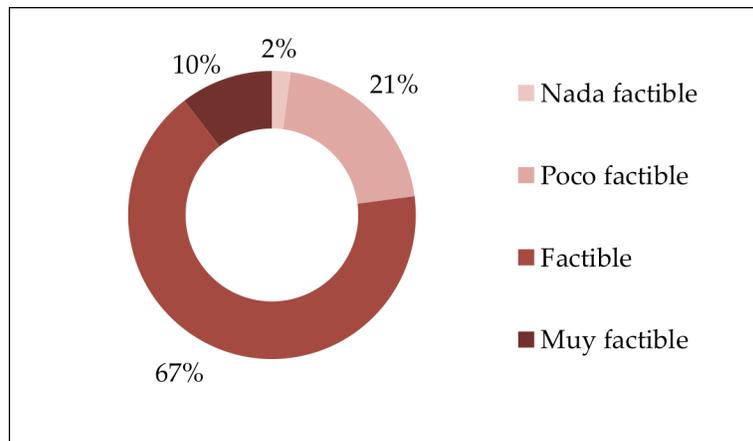


Figura 11. Factibilidad de aplicación del DG según ingenieros civiles

Algunas de las principales justificaciones ofrecidas para apoyar la factibilidad de este proceso, fue el hecho de que responde al principio iterativo básico del diseño estructural, además de la gran ayuda que puede ser en etapas de prediseño, en especial para estructuras estéticamente innovadoras. Por el contrario, como limitantes de la implementación del diseño generativo, se explicitó el costo y disponibilidad del software adecuado y temas culturales asociados a seguir con los procedimientos tradicionales de diseño. Paralelamente, como aspectos a considerar emergieron el tener en cuenta la coordinación con arquitectura y/o el mandante para definir los parámetros (y sus rangos) y el cuestionarse a qué escala se quiere implementar (empresas pequeñas y medianas o grandes).

Ahora bien, los ingenieros civiles que sí han utilizado este proceso (4 profesionales) lo han empleado para definir plantas estructurales óptimas, definir ubicación de grúas, diseño de puentes considerando distintas restricciones de apoyos y cargas, diseño de piezas mecánicas para satisfacer condiciones de resistencia y control de frecuencias naturales y diseño de estructuras no tradicionales. Como principales beneficios de este proceso se encuentra de manera sobresaliente el hecho de tener a su disposición múltiples alternativas de diseño, ya que esto permite considerar opciones que no se tenían previstas y que se sabe de antemano que son eficientes estructuralmente y que otorgan ahorro de material. Además, con el diseño generativo se puede apreciar más claramente la sensibilidad del diseño ante el cambio de los parámetros que lo moldean y que a través de este proceso pueden vincularse. Con relación a los obstáculos para la implementación se presenta la complicación para definir las restricciones de diseño y su interdependencia, el costo del software comercial para la programación del código, además del tiempo que requiere su desarrollo, y finalmente, el tiempo de evaluación de lo apto del modelo.

Cabe señalar por otra parte, que el 75% de los encuestados que sí han utilizado el DG cree que es “factible” usarlo en su ejercicio profesional, mientras que el 25% lo cree “muy factible”. Profundizando en las razones dadas, surge nuevamente la posibilidad de tener variadas alternativas para la toma de decisiones, aunque con ello, también aparece la necesidad de aprender a modelar los procesos de diseño en sí mismos. Junto con lo anterior, queda en evidencia el hecho de que se requiere de velocidad computacional que permita una evaluación de cada posible solución en forma rápida (además del software propiamente tal).

Finalmente, emergen como posibles aplicaciones de este proceso el diseño óptimo de armaduras y definición de sus secciones, problemas de urbanización (relacionados con las smart cities), diseño por capacidad de estructuras en base a muros y situaciones de distribución de espacios en general.



## 4. Conclusiones

El análisis precedente indica la incipiente pero prometedora utilización del diseño generativo en la ingeniería estructural, a través de la optimización de elementos estructurales como vigas, losas y cerchas, donde los softwares más utilizados para este fin son REVIT con sus complementos Dynamo y Refinery, y Grasshoper con su complemento Rhinoceros. Cabe mencionar que el primero de ellos, es un entorno habitual para ingenieros civiles, ya que es un programa utilizado por la metodología BIM. Se plantea entonces el uso del diseño generativo en la ingeniería civil como una herramienta para construir estructuras que puedan cumplir con las mismas condiciones que las actuales, pero con menor cantidad de material, lo que se traduce directamente en ahorro de dinero para las empresas y, más importante aún, en una disminución de la contaminación originada por la generación, transporte y colocación de este material extra.

En esta perspectiva también resulta importante observar las variadas experiencias que ha tenido la arquitectura con este proceso, y que apuntan en primer lugar hacia el ahorro del gasto energético producido por la construcción y operación de las edificaciones y, además, el entregar diferentes opciones de diseño en forma expedita considerando los parámetros y variables de entrada del código. Es aquí donde se evidencia la necesidad de un trabajo colaborativo en toda la industria de la AIC, desde el inicio de cada proyecto; donde el diseño generativo ayude a crear opciones de prediseño rápidamente, considerando en una primera etapa, los parámetros más importantes como la exposición solar de la estructura, limitaciones espaciales dadas por normativa como la rasante, coeficiente de ocupación de suelo y coeficiente de constructibilidad. Luego el ingeniero civil podría optimizar los elementos estructurales de este diseño para considerar configuraciones que quizás no hubiera previsto siguiendo el método clásico de diseño de prueba y error. Finalmente, el diseño generativo puede ayudar a estimar la mejor manera de posicionar las grúas para la construcción del modelo creado anteriormente.

Se quiere con ello significar que el diseño generativo es fácilmente compatible con los procesos de la ingeniería estructural, ya que esta última se basa mayormente en sistemas iterativos que pueden ser fácilmente abarcados por el primero y que, a su vez, permite la utilización de alternativas no consideradas por el diseñador, pero que resultan altamente eficientes. En relación con los resultados del sondeo, la mayoría de los ingenieros civiles encuestados desconocen o no han trabajado con diseño generativo, lo cual confirma la motivación inicial de este trabajo que es la necesidad de dar a conocer este proceso en la industria, mostrando tanto sus ventajas como limitaciones.

Una dificultad en la implementación del diseño generativo es el hecho de tener que reestructurar el proceso de diseño, ya que no se basa en buscar directamente las soluciones, sino en enseñarle al software a diseñar, lo que a su vez es beneficioso porque en este desarrollo se debe tener claridad de los parámetros y restricciones que moldean al diseño, lo que hace este proceso menos dependiente de la experiencia del diseñador y explicitaría las condiciones particulares de cada proyecto. Lo anterior no significa en ningún sentido que el ingeniero no será necesario, sino por el contrario, deberá desarrollar la habilidad para decidir cuál es el mejor diseño dentro de las opciones otorgadas por el código. Otra limitante para su uso, en lo cual concuerdan tanto los profesionales que sí han utilizado este proceso como los que no, es el costo del software, lo cual se espera que en un futuro cercano no sea tan relevante ya que programas como REVIT (versión 2021) ya están incluyendo un apartado de diseño generativo, lo cual sugiere que, prontamente, esta herramienta estará integrada en los softwares usados en la industria.

Un aspecto para considerar es que, dada la actualidad de este tópico, algunos estudios presentados como diseño generativo, no se identifican tan claramente como tal y son una mezcla entre éste y diseño paramétrico y/o algoritmos genéticos. Por lo anterior, se evaluó caso a caso de acuerdo con la definición expuesta en la introducción de este documento. Además, puede que, en el transcurso de la realización y publicación de este documento, se hayan divulgado otros usos del diseño generativo en la ingeniería estructural no contemplados acá.

Como futuras líneas de investigación se sugiere indagar sobre el uso del diseño generativo en otras áreas de la ingeniería civil y de la industria de la AIC con el fin de extender sus beneficios a todo este campo y poder generar proyectos colaborativos que conecten con algunos de los principios de otras innovaciones, como la metodología BIM. Finalmente, se propone crear, testear e implementar códigos propios que resuelvan problemas específicos de la industria para mostrar de forma directa sus beneficios.



## 5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV-Chile), donde dos de los coautores son investigadores y profesores. Además, al espacio TIMS (Technology, Innovation, Management and Innovation) de la Escuela de Ingeniería Civil de la PUCV, donde se llevó a cabo parte de la investigación. El profesor Muñoz agradece a CONICYT - PCHA/International Doctorate/2019-72200306 por financiar sus estudios de posgrado.

## 6. Referencias

- Abdallah, H.; Ezzedine, F.; Haddad, A.; Salami, G.; Sanboskani, H.; Dabaghi, M.; Hamzeh, F. (2019).** Employing Generative Design for Sustainable Construction. Conference: Creative Construction Conference 2019, CCC 2019, 29 June - 2 July 2019At: Budapest, Hungary, 692-698. <https://doi.org/10.3311/cc2019-095>.
- Alfageme García, A. (2016).** Estudio paramétrico de cúpulas de barras.
- Andreani, M.; Bertagni, S.; Biagini, C.; Mallo, F. (2019).** 7D BIM for sustainability assessment in design processes: A case study of design of alternatives in severe climate and heavy use conditions. *Architecture and Engineering*, 4(2), 3–12. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2019-4-2-3-12>
- Autodesk.** (n.d.). What is generative design?
- Bertollini, V. (2019).** Three Experiments in Generative Design with Project Refinery.
- Betancourt, M. C.; García Alvarado, R.; Quintero Villarreal, L. M. (2012).** Geometric Optimization of façade openings in the tropics with genetic algorithms and parametric design application. *Sistemas y Telemática*, 10(22), 231. <https://doi.org/10.18046/syt.v10i22.1278>
- Bonelli, M.; Gudiño Gutierrez, S. A. (2015).** Optimización Estructural y Topológica de Armaduras mediante Algoritmos Genéticos. *Revista Tecnología y Ciencia*, 32(03492), 287–296.
- Cavieres, A. (2007).** Diseño paramétrico orientado a la performance. *De Arquitectura*, 13(16), 39. <https://doi.org/10.5354/0719-5427.2007.28201>
- Chang, S.; Saha, N.; Castro-Lacouture, D.; Pei-Ju Yang, P. (2018).** Generative design and performance modeling for relationships between urban built forms, sky opening, solar radiation and energy. *Energy Procedia*, 158(August), 3994–4002. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.841>
- Chen, C. C.; Lu, C. A.; Lin, C. C. (2005).** Parametric study and design of rib-reinforced steel moment connections. *Engineering Structures*, 27(5), 699–708. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.12.007>
- Cichocka, J. (2015).** Generative design optimization in urban planning – walkability-optimized city concept. *Architectus*. <https://doi.org/10.5277/arc150110>
- Cocco, P. L. (2014).** Generative Design and BIM: a circular workflow.
- Daicong, D.; Xia, L.; Guangyo, L.; Huang, X. (2017).** Evolutionary topology optimization of continuum structures with smooth boundary representation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. volume 57, pages 2143–2159(2018) <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1846-6>.
- Deiana, A. C.; Granados, D. L.; Sardella, M. F. (2018).** Introducción a la Ingeniería. In *Introducción a la ingeniería*. Departamento de Ingeniería Química – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.
- Dennemark, M.; Aicher, A.; Schneider, S.; Hailu, T. (2017).** Generative Hydrology Network Analysis A parametric approach to water infrastructure based urban planning. Conference: Computing for a better tomorrow - Proceedings of the 36th eCAADe ConferenceAt: Lodz University of Technology, Lodz, Poland. 327-334
- García Alvarado, R.; Lyon Gottlieb, A. (2013).** Diseño paramétrico en Arquitectura; método, técnicas y aplicaciones. *Arquisur*, 31(3), 20–31. <https://doi.org/10.14409/ar.v1i3.938>
- Gonzales, J. (2018).** Diseño integral de armaduras metálicas usando Rhinoceros 3D: modelación paramétrica, simulación estructural y optimización. Universidad nacional de Cajamarca.
- Hernández Sampieri, R.; Fernández Collado, C.; Baptista Lucio, M. del P. (2014).** Metodología de la investigación (6th ed.). Mexico: McGraw Hill.
- Herr, C. M.; Fischer, T. (2013).** Generative column and beam layout for reinforced concrete structures in China. *Communications in Computer and Information Science*, 369 CCIS, 84–95. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38974-0-8>
- Hofmeyer, H.; Davila Delgado, J. M. (2015).** Coevolutionary and genetic algorithm based building spatial and structural design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 29(4), 351–370. <https://doi.org/10.1017/S0890060415000384>
- Huang, X.; Xie, Y. (2010).** Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures. <https://doi.org/10.1002/9780470689486>
- Jabi, W. (2013).** Parametric Design for Architecture. In Laurence King Publishing.
- Jarquín Laguna, R. (2014).** Aplicación de algoritmos genéticos en ingeniería civil. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Jige Quan, S. (2019).** Smart design for sustainable neighborhood development. *Energy Procedia*, 158(2018), 6515–6520. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.108>
- Johan, R.; Chernyavsky, M.; Fabbri, A.; Gardner, N.; Haeusler, M. H.; Zavoleas, Y. (2019).** Building intelligence through generative design: Structural analysis and optimisation informed by material performance.
- Lajas Benítez, R. (2019).** Diseño, Automatización y Modelización de una Nave prefabricada mediante metodología BIM. Universidad de Extremadura.
- Lyon Gottlieb, A.; García Alvarado, R. (2011).** De la Optimización Estructural Evolutiva al Diseño Paramétrico basado en desempeño; experiencias en plataformas integradas para estrategias de diseño multidisciplinares. XV Congreso de La Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital (SIGRADI), 1–5.
- Marinov, M.; Amagliani, M.; Barback, T.; Flower, J.; Barley, S.; Furuta, S., ... Wolski, P. (2019).** Generative Design Conversion to Editable and Watertight Boundary Representation.
- Marsault, X. (2018).** Eco-generative Design for Early Stages of Architecture. In ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.



SPANISH VERSION.....

- Martínez-rocamora, A.; García-alvarado, R.; Casanova-medina, E.; González-böhme, L. F.; Auat-cheein, F. (2020).** Parametric Programming of 3D Printed Curved Walls for Cost-Efficient Building Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(5), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001811](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001811)
- Muñoz-La Rivera, F.; Mora-Serrano, J.; Valero, I.; Oñate, E. (2020).** Methodological-Technological Framework for Construction 4.0. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, pages 689–711. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09455-9>
- Muñoz-La Rivera, F.; Vielma, J.; Herrera, R. F.; Carvalho, J. (2019).** Methodology for Building Information Modeling (BIM) Implementation in Structural Engineering Companies (SEC). *Advances in Civil Engineering*, 2019(8452461), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2019/8452461>
- Muttio, E.; Botello, S.; Tapia, M. (2017).** Modelado paramétrico mediante programación visual en el diseño. *SCIPEDIA Revista Mexicana de Métodos Numéricos*.
- Oh, S.; Jung, Y.; Kim, S.; Lee, I.; Kang, N. (2018).** Deep Generative Design: Integration of Topology Optimization and Generative Models. *International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*. Quebec.
- Paschke, M.; Neuhäuser, S.; De Rycke, K.; Gengnagel, C. (2019).** Impact: Design With All Senses (C. Gengnagel, J. Burry, S. Weinzierl, O. Baverel, & M. R. Thomsen, Eds.). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29829-6\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29829-6_61)
- Plocher, J.; Panesar, A. (2019).** Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials and Design*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108164>
- Reintjes, C.; Hartisch, M.; Lorenz, U. (2018).** Lattice Structure Design with Linear Optimization for Additive Manufacturing as an Initial Design in the Field of Generative Design. Springer International Publishing, (April). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-89920-6>
- Rodrigues, E.; Amaral, A. R.; Rodrigues, A.; Gomes, Á. (2015).** An approach to urban quarter design using building generative design and thermal performance optimization. *Energy Procedia*, 78, 2899–2904. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.662>
- Rodrigues, E.; Soares, N.; Fernandes, M. S.; Gaspar, A. R.; Gomes, Á.; Costa, J. J. (2018).** An integrated energy performance-driven generative design methodology to foster modular lightweight steel framed dwellings in hot climates. *Energy for Sustainable Development*, 44, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.02.006>
- Salcedo Lagos, P. (2012).** Análisis Paramétrico de Volúmenes Arquitectónicos con Algoritmos Genéticos. *Hábitat Sustentable*, 2, 47–58.
- Singh, V. (2020).** Developing BIM Thinking: Fundamental Objectives and Characteristics of BIM to Think Critically About in BIM Research and Implementation. (July).
- Singh, V.; Gu, N. (2012).** Towards an integrated generative design framework. *Design Studies*, 33(2), 185–207. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.06.001>
- Touloupaki, E.; Theodosiou, T. (2017).** Energy performance optimization as a generative design tool for nearly Zero Energy Buildings. *Procedia Engineering*, Volume 180, 2017, Pages 1178-1185.
- Turney, D. (2020).** Concrete Forms Get Stronger, Lighter, and More Sustainable With Generative Design.
- Uarac, P.; Cendoya, Pa.; Sanhueza, J. P. (2015).** Optimización topológica bidireccional con esquema de penalización de material y restricciones de desplazamiento. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 23(1), 75–84. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052015000100009>
- Van Telgen, M. (2020).** Exploring Structural Design Options Using Generative Design.
- Velasco, R. (2015).** Estudio de la aplicación del diseño generativo al diseño conceptual arquitectónico. *Universitat Politècnica de Valencia*.
- Wang, L.; Janssen, P.; Chen, K. W.; Tong, Z.; Ji, G. (2019).** Subtractive Building Massing for Performance-Based Architectural Design Exploration: A Case Study of Daylighting Optimization. *Sustainability*, 11(24), 6965. <https://doi.org/10.3390/su11246965>
- Zhang, R.; Tong, H.; Huang, W.; Zhang, R. (2019).** A generative design method for the functional layout of town planning based on multi-agent system. *24th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 640. Hong Kong: Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).