



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Politècnica Superior d'Edificació
de Barcelona

**MÁSTER EN CONSTRUCCIÓN AVANZADA DE LA EDIFICACIÓN
TRABAJO DE FIN DE MÁSTER**

**CONEXIÓN DE MODELOS 3D DE ENVOLVENTES PARAMÉTRICAS EN EL CONTEXTO DE
BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) Y SU EXPORTACIÓN A FORMATO IFC.**

Proyectista/as: Javier Ignacio Castañeda Mejía

Director/es: Laia Haurie Ibarra; Inmaculada Fortea Navarro

Convocatoria: 2021-2023

AGRADECIMIENTOS

A mi madre que gracias a su amor y dedicación ha hecho posible que pueda cumplir el sueño de realizar mis estudios en España y Francia.

A mi padre y hermana por brindarme su apoyo incondicional cuando he requerido su ayuda.

A Laia Haurie por su paciencia y apoyo durante todo el transcurso del máster y haberme brindado su conocimiento y ayuda para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A Inmaculada Fortea Navarro por brindar su conocimiento y asesoramiento desinteresadamente en el momento que más se necesitaba.

A la Universidad Politécnica de Cataluña y la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona por brindarme la oportunidad de cumplir el sueño de Estudiar y Vivir en Barcelona y París.

RESUMEN

Este documento presenta una investigación académica sobre la interoperabilidad en el modelado de información de construcción (BIM) para envolventes paramétricas, contribuyendo al ODS 11 Objetivo del Desarrollo Sostenible de Ciudades y Comunidades Sostenibles. El objetivo del estudio es desarrollar flujos de trabajo basados en un modelo geométrico de envolvente y un diccionario de elementos constructivos que garantice la interoperabilidad exitosa entre diferentes sistemas de software BIM, incluyendo Rhinoceros y el formato de uso abierto Industry Foundation Classes (IFC).

Para lograr este objetivo, se ha llevado a cabo un análisis meticuloso de casos de estudio previamente expuestos en detalle. Se ha desarrollado un modelo geométrico de envolvente que representa de manera generalizada los componentes utilizados en la elaboración de fachadas paramétricas, y se ha creado un diccionario de elementos constructivos que incluye la identificación y definición de los diferentes elementos constructivos, como paneles, juntas, soportes, juntas de estanqueidad, herrajes, motores, sensores, iluminación y sistemas de control asociados. Cada uno de estos elementos ha sido definido de manera consistente y coherente en todos los sistemas relevantes.

Además, se ha realizado la exportación a formato IFC y verificación de interoperabilidad de los modelos creados, comprobando que la geometría 3D se haya exportado correctamente y que se puedan leer los datos personalizados de cada elemento. Se ha utilizado el plugin de Geometry Gym para exportar directamente desde Rhinoceros, el flujo de trabajo con Rhino Inside para exportar desde Revit y el flujo de trabajo con Archicad Connection para exportar desde Archicad.

En conclusión, los distintos flujos de trabajo y el diccionario de elementos constructivos desarrollados en este estudio contribuyen al ODS 11 de Ciudades y Comunidades Sostenibles al garantizar la interoperabilidad exitosa entre diferentes sistemas de software BIM para envolventes paramétricas, lo que permite lograr una mayor eficiencia y efectividad en los proyectos de construcción. Además, la exportación a formato IFC y la verificación de interoperabilidad de los modelos creados demuestran la aplicabilidad práctica de los resultados obtenidos para consolidar un entorno de trabajo abierto y flexible a distintos métodos de trabajo.

Palabras clave: Interoperabilidad, BIM, envolventes paramétricas, modelado 3D, Open BIM, formato IFC, Eficiencia, verificación.

ABSTRACT

This paper presents academic research on interoperability in building information modeling (BIM) for parametric envelopes, contributing to SDG 11 Sustainable Cities and Communities. The aim of the study is to develop workflows based on a unique geometric model of the envelope and a dictionary of construction elements that ensure successful interoperability between different BIM software systems, including Rhinoceros and the open-use Industry Foundation Classes (IFC) format.

To achieve this goal, a meticulous analysis of previously detailed case studies has been carried out. A unique geometric model of the envelope has been developed, which generally represents the components used in the elaboration of parametric facades. Furthermore, a dictionary of construction elements has been created, including the identification and definition of various construction elements such as panels, joints, supports, sealing joints, hardware, motors, sensors, lighting, and associated control systems. Each of these elements has been defined consistently and coherently in all relevant systems.

In addition, the export to IFC format and verification of interoperability of the created models have been performed, verifying that the 3D geometry has been correctly exported, and that the customized data of each element can be read. The Geometry Gym plugin has been used to export directly from Rhinoceros, the Rhino Inside workflow to export from Revit, and the Archicad Connection workflow to export from Archicad.

In conclusion, the various workflows and the dictionary of construction elements developed in this study contribute to SDG 11 Sustainable Cities and Communities by ensuring successful interoperability between different BIM software systems for parametric envelopes, allowing for greater efficiency and effectiveness in construction projects. Moreover, the export to IFC format and verification of interoperability of the created models demonstrate the practical applicability of the obtained results to consolidate an open and flexible working environment to different working methods.

Keywords: Interoperability, BIM, parametric envelopes, 3D modeling, Open BIM, IFC format, Efficiency, verification.

ÍNDICE

1	Glosario	6
2	Introducción	8
3	Objetivos	10
4	Metodología.....	11
5	Resultados	12
5.1	<i>Revisión Bibliográfica.....</i>	12
5.2	<i>Identificación de los requisitos.....</i>	13
5.3	<i>Revisión de casos de Estudio.....</i>	15
5.4	<i>Diseño y desarrollo de la solución.</i>	24
5.5	<i>Herramientas informáticas específicas.</i>	25
5.6	<i>Diseño y desarrollo del modelo del sistema de fachada.....</i>	28
5.7	<i>Diccionario de elementos constructivos.....</i>	30
5.8	<i>Exportación a formato IFC y verificación de interoperabilidad.....</i>	32
5.9	<i>Evaluación de la solución.....</i>	35
6	Discusión.....	37
7	Conclusión	39
8	Referencias bibliográficas	40
9	Anejo 1.....	42

1 Glosario

Building Information Modeling (BIM): un proceso de modelado 3D que permite a los diseñadores, arquitectos e ingenieros trabajar juntos en un modelo virtual del edificio para coordinar la información y optimizar la construcción. (Eastman et al., 2011).

Envolvente paramétrica: una envolvente arquitectónica modelada mediante la utilización de datos paramétricos, es decir, datos que pueden ser ajustados y modificados para controlar la forma y características de la envolvente. (Burry et al., 2010).

Modelo 3D: un modelo digital tridimensional de un objeto o estructura que puede ser manipulado y visualizado en una pantalla de ordenador. (Kumar et al., 2013).

Formato IFC: un formato de intercambio de datos utilizado en el proceso de BIM para permitir la interoperabilidad entre diferentes software y aplicaciones. (BuildingSMART, 2018).

Interoperabilidad: la capacidad de diferentes sistemas, software y aplicaciones de trabajar juntos y compartir información sin problemas. (Lin et al., 2018).

Herramientas de software BIM: aplicaciones de software especializadas utilizadas en el proceso de BIM, como Revit, ArchiCAD o Tekla. (Yeh and Chen, 2018).

Diseño paramétrico: Es un enfoque de diseño que utiliza datos paramétricos para controlar la forma y las características de un objeto o estructura, permitiendo una mayor flexibilidad y adaptabilidad en el proceso de diseño. (Burry et al., 2010).

Gestión de cambios: el proceso de controlar y gestionar los cambios en el modelo 3D durante el proceso de diseño y construcción. (Becerik-Gerber et al., 2011).

Rendimiento: la capacidad del modelo de sistema de fachada para funcionar según lo previsto en términos de eficiencia, precisión y facilidad de uso. (Gómez-Soberón et al., 2019).

Usabilidad: la facilidad de uso del modelo de sistema de fachada por parte de los usuarios en diferentes proyectos de construcción. (Jin et al., 2014).

Information Delivery Manual (IDM): un conjunto de directrices y procesos estándar que definen los requisitos de información para cada etapa de un proyecto de construcción. El IDM proporciona un marco para la gestión y entrega de información a lo largo del ciclo de vida del proyecto, desde el diseño hasta la construcción y operación. (BuildingSMART, 2021).

OpenBIM: una iniciativa de BuildingSMART International que promueve el uso de estándares abiertos y colaborativos para el intercambio de información entre diferentes software y aplicaciones en el contexto de BIM. OpenBIM se centra en la interoperabilidad y la colaboración, permitiendo a diferentes partes interesadas trabajar juntas de manera eficiente en un proyecto de construcción utilizando diferentes herramientas de software y aplicaciones. (BuildingSMART, 2021).

TCQi | TCQ: es un conjunto de aplicaciones informáticas para el sector de la construcción que proporciona apoyo para las actividades de redacción, contratación, planificación y control de proyectos y obras. La metodología de TCQi | TCQ se centra en la definición y seguimiento de los valores de los parámetros de tiempo, coste, calidad, seguridad, generación de residuos y el coste energético de los materiales. El software TCQi | TCQ gestiona de forma integrada los datos técnicos, económicos y temporales que intervienen en el ciclo de una obra de construcción mediante diferentes módulos de aplicación, que también pueden emplearse de forma independiente. TCQ es un software de escritorio, mientras que TCQi es un software para trabajar en la nube. (TCQ, n.d.).

Open IFC Viewer: es un visor de modelos 3D basado en web que utiliza el formato IFC para visualizar modelos de edificios y estructuras. El visor es de código abierto y gratuito, lo que lo hace accesible para cualquier persona interesada en ver y explorar modelos BIM. Open IFC Viewer permite al usuario visualizar el modelo de forma interactiva, moverse por el espacio virtual, acercarse y alejarse, y seleccionar diferentes elementos para obtener información detallada. También es posible añadir anotaciones y comentarios al modelo. Open IFC Viewer es una herramienta valiosa para la comunicación y la colaboración en proyectos de construcción BIM, ya que permite a diferentes partes interesadas ver y comprender el modelo de forma clara y precisa. (Open IFC Viewer, n.d.)

2 Introducción

Esta investigación nace de un interés personal, basado en más de 5 años trabajando en el diseño y construcción de proyectos de envolventes paramétricas en un entorno internacional. Con la motivación de expandir los límites de la construcción tradicional y mejorar los flujos de trabajo en un entorno multidisciplinar en la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC), esta investigación aborda los desafíos asociados con la urbanización y el desarrollo sostenible (UN, 2021).

En la industria AEC, las envolventes paramétricas se han vuelto cada vez más populares debido a su capacidad para permitir un diseño altamente personalizado y adaptable. Con herramientas digitales avanzadas, como software de modelado de información de construcción (BIM) y diseño asistido por computadora (CAD), los arquitectos pueden crear envolventes de edificios altamente complejas que se ajustan a los requisitos específicos de diseño, rendimiento y presupuesto. Además, las envolventes paramétricas también pueden mejorar el rendimiento ambiental de un edificio.

Por ejemplo, los diseñadores pueden utilizar algoritmos para optimizar la forma y la orientación de la envolvente para maximizar la eficiencia energética y la iluminación natural, lo que puede reducir los costos operativos y mejorar la sostenibilidad del edificio.

El Building Information Modeling (BIM) es una tecnología emergente que ha demostrado su potencial para mejorar la eficiencia y la calidad en la industria de la arquitectura y la construcción (Becerik-Gerber, 2010). Sin embargo, su implementación ha enfrentado desafíos significativos en términos de habilidades y conocimientos técnicos por parte de los profesionales del sector (Jiang y Ding, 2019).

En una encuesta realizada por el Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos (NRC, 2010), se encontró que la falta de habilidades y conocimientos en BIM era uno de los principales obstáculos para su adopción. En particular, se ha señalado que la falta de capacitación en BIM y la falta de conocimiento en la gestión de datos son los principales factores que limitan la adopción de esta tecnología (Eastman et al., 2011). Además, el costo de adquirir y mantener las herramientas de software y hardware necesarias para el uso del BIM también puede ser un factor limitante, especialmente para las pequeñas y medianas empresas (Owusu et al., 2017).

Software	Usuarios estimados (2021)	Costo de la licencia individual (USD)
Revit	2,000,000	\$2,425/año (suscripción anual)
Rhinoceros	700,000	\$995 (licencia perpetua)
ArchiCAD	200,000	\$4,995 (licencia perpetua)
Tekla Structures	100,000	\$5,500/año (suscripción anual)
Vectorworks	685,000	\$2,895 (licencia perpetua)
Allplan	50,000	\$5,000 - \$7,000 (licencia perpetua)

Figura 1. Tabla comparativa del costo de licencia individual y usuarios estimados promedio. Datos tomados de las respectivas páginas web.

La Tabla 1 ilustra la cantidad de usuarios de diversos programas de modelado de información BIM y cómo esta cifra se relaciona con el costo de las licencias de uso. Es evidente que a medida que el precio de la licencia y su modalidad (perpetua o suscripción) aumentan, el número de usuarios tiende a disminuir. Por lo tanto, la solución propuesta deberá centrarse en seleccionar la aplicación más accesible y con menor costo.

Otro desafío importante en la implementación del BIM es la falta de estandarización y coordinación en su uso. Existen diversas plataformas y software de BIM en el mercado, lo que hace que sea difícil compartir información y colaborar en proyectos entre diferentes empresas y disciplinas (Owusu et al., 2017). Además, a pesar de los esfuerzos para establecer estándares de intercambio de información, todavía existe una falta de consenso en cuanto a la terminología, el contenido y el formato de los modelos BIM (Jiang y Ding, 2019). Esto puede dar lugar a errores en la comunicación y la interpretación de la información, lo que puede llevar a problemas en la construcción y aumentar los costos y Los tiempos de entrega del proyecto (Azhar et al 2012). Por lo tanto, se necesita una mayor colaboración entre las partes interesadas para establecer estándares y protocolos que promuevan la interoperabilidad y la coordinación en el uso del BIM.

Actualmente, la implementación del Building Information Modeling (BIM) se enfrenta a numerosos desafíos en la industria de la construcción, como la interoperabilidad de los modelos 3D de diferentes aplicaciones de software, la falta de estándares de datos, la resistencia al cambio y la necesidad de una mayor capacitación y formación del personal. Además, la conexión de modelos 3D de envolventes paramétricas en el contexto de BIM presenta sus propios desafíos, lo que puede limitar la interoperabilidad y la eficiencia del proceso. La revisión bibliográfica exhaustiva, como la realizada en esta investigación, puede ayudar a identificar las mejores prácticas y los enfoques más efectivos para abordar estos desafíos y mejorar la implementación del BIM en la industria de la construcción.

3 **Objetivos**

El objetivo de esta investigación es desarrollar un enfoque para conectar modelos 3D de envolventes paramétricas en el contexto de BIM, con el fin de mejorar la eficiencia y la precisión en el proceso de diseño y construcción de edificios. Esto contribuirá al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 11 de la ONU, que aborda la necesidad de crear ciudades y comunidades sostenibles (UN, 2021). La investigación también busca comprobar la interoperabilidad del modelo mediante su exportación a formato IFC. La metodología incluirá una revisión bibliográfica exhaustiva, la identificación de requisitos necesarios, el diseño y desarrollo de la solución, la exportación a formato IFC y la evaluación de la solución en diferentes proyectos de construcción.

Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan al avance de la tecnología BIM al desarrollar un modelo de sistema de fachada que se pueda modelar mediante herramientas de diseño paramétrico y exportar fácilmente en formato IFC. Este modelo será interoperable con diferentes aplicaciones de software BIM y se probará su rendimiento y usabilidad. En definitiva, esta investigación tiene como objetivo facilitar el diseño y la construcción de edificios con sistemas de fachada complejos, promoviendo la sostenibilidad en la construcción y el desarrollo urbano, en línea con el ODS 11 de la ONU (UN, 2021).

4 Metodología.

Revisión bibliográfica: Realizar una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con la integración de modelos 3D de envolventes paramétricas en el marco del Building Information Modeling (BIM) y la exportación de modelos al formato Industry Foundation Classes (IFC).

Identificación de requisitos: Determinar los requisitos necesarios para integrar modelos 3D de envolventes paramétricas en BIM y exportarlos al formato IFC, incluyendo formato de archivo, interoperabilidad, gestión de cambios y compatibilidad con diversas herramientas de software.

Revisión de casos de estudio para el modelado del sistema de fachada: Investigar y analizar casos de estudio relevantes en el modelado de sistemas de fachada utilizando envolventes paramétricas. Estudiar las mejores prácticas y las lecciones aprendidas de estos casos para informar el diseño y desarrollo del modelo del sistema de fachada.

Diseño y desarrollo de la solución: Diseñar y desarrollar una metodología que permita integrar modelos 3D de envolventes paramétricas en BIM y exportarlos al formato IFC, cumpliendo con los requisitos identificados en la etapa anterior. Probar la solución en diferentes casos de estudio y ajustarla según sea necesario.

Diseño y desarrollo del modelo del sistema de fachadas: Diseñar y desarrollar un modelo de sistema de fachada que cumpla con los requisitos para la exportación a formato IFC. El modelo se basará en los resultados de la revisión bibliográfica y la revisión de casos de estudio, y se desarrollará utilizando aplicaciones de software BIM como Revit, ArchiCAD o Tekla.

Exportación a formato IFC y verificación de interoperabilidad: Exportar el modelo integrado al formato IFC y verificar su interoperabilidad en diversas herramientas de software y plataformas BIM.

Evaluación de la solución: Evaluar la metodología desarrollada en términos de eficiencia, precisión y facilidad de uso en el contexto de diversos proyectos de construcción.

Análisis de resultados y elaboración del informe: Analizar los resultados de la investigación y presentarlos en un informe final que incluya conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones en este campo.

La metodología adaptada permitirá desarrollar una solución para integrar modelos 3D de envolventes paramétricas en el marco del BIM y exportarlos al formato IFC, identificando los requisitos necesarios para lograr una interoperabilidad adecuada. La evaluación de la solución permitirá validar su utilidad y eficacia en diferentes contextos de aplicación.

5 Resultados

5.1 Revisión Bibliográfica

En el marco de la investigación, se han seleccionado las siguientes referencias bibliográficas relevantes para abordar la pregunta inicial y proporcionar una mayor comprensión del tema de investigación:

Eastman et al. (2011) en "BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors" proporciona una visión general completa del modelado de información de construcción (BIM), incluyendo la descripción de sus procesos, tecnologías y beneficios. Este libro es relevante para la investigación, ya que presenta los fundamentos del BIM, así como sus implicaciones en la industria de la construcción y la arquitectura.

Kensek (2014) en "Building Information Modeling" examina el impacto del BIM en la práctica arquitectónica y la educación, destacando cómo el BIM puede mejorar la colaboración, la sostenibilidad y la eficiencia en el diseño y construcción de edificios. La investigación se beneficia de esta fuente al obtener información sobre cómo el BIM puede transformar la industria de la construcción.

Kolarevic y Malkawi (2005) en "Performative Architecture: Beyond Instrumentality" exploran la relación entre arquitectura paramétrica y diseño basado en el rendimiento. Este libro es relevante para la investigación, ya que proporciona una visión sobre cómo la arquitectura paramétrica puede utilizarse para optimizar el rendimiento de las envolventes de los edificios en términos de eficiencia energética y confort.

Pauwels y Terkaj (2016) en su artículo "EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology" investigan la conversión de los modelos IFC a ontologías OWL, lo que permite un intercambio de información más eficiente en el marco del BIM. Este estudio es relevante para la investigación, ya que aborda los desafíos de la interoperabilidad en el intercambio de datos BIM utilizando formatos IFC.

Schlueter y Thesseling (2009) en "Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages" demuestran cómo los modelos BIM pueden utilizarse para evaluar el rendimiento energético y exergético de los edificios en las etapas tempranas del diseño. Este artículo es relevante para la investigación, ya que muestra cómo la integración de envolventes paramétricas en BIM puede mejorar la eficiencia energética de los edificios.

Solibri, Inc. (2018) en "Solibri Model Checker: Ensuring Quality Assurance in the BIM Process" introduce una herramienta de verificación de modelos BIM que garantiza la calidad y la precisión en el proceso de diseño y construcción. Este documento es relevante para la investigación, ya que muestra cómo las soluciones de software pueden mejorar la implementación de BIM y envolventes paramétricas.

uccar y Kassem (2015) en "Macro-BIM adoption: Conceptual structures" analizan la adopción de BIM a nivel macro y proponen un marco conceptual para entender y medir la adopción de BIM en la industria de la construcción. Este estudio es relevante para la

investigación, ya que ofrece información sobre los desafíos y oportunidades relacionadas con la implementación de BIM y envolventes paramétricas.

Woodbury (2010) en "Elements of Parametric Design" presenta los conceptos básicos del diseño paramétrico y ofrece una descripción detallada de las herramientas y técnicas utilizadas en este enfoque de diseño. Este libro es relevante para la investigación, ya que proporciona una base sólida para entender el diseño paramétrico y cómo puede aplicarse a las envolventes de edificios en el contexto del BIM.

Zhang y El-Gohary (2016) en "An ontology-based approach for integrating building information modeling (BIM) and the specification of construction products" proponen un enfoque basado en ontologías para integrar BIM y las especificaciones de productos de construcción, mejorando la interoperabilidad y el intercambio de información en la industria. Este artículo es relevante para la investigación, ya que aborda cuestiones clave relacionadas con la integración de modelos 3D de envolventes paramétricas y la exportación al formato IFC en el marco del BIM.

5.2 Identificación de los requisitos

Identificar los requerimientos necesarios para el correcto funcionamiento de un modelo 3D de envolvente paramétrica es crucial para el éxito de proyectos de construcción y diseño asistidos por BIM. Un modelo 3D de envolvente paramétrica es una herramienta de diseño que permite a los arquitectos y constructores crear representaciones digitales precisas y detalladas de los sistemas de envolvente de un edificio. Para que este modelo sea efectivo, es necesario considerar varios aspectos clave, como el formato de archivo adecuado, la interoperabilidad con otras herramientas de software y plataformas BIM, la gestión de cambios y la compatibilidad con diferentes herramientas de software. Identificar y satisfacer estos requerimientos garantiza la precisión, actualización y colaboración efectiva de los datos en todo momento, lo que resulta esencial para el éxito del proyecto. En este sentido, se hace necesario profundizar en cada uno de estos aspectos para comprender su importancia y cómo se relacionan entre sí.

Formato de archivo: El modelo 3D de envolvente paramétrica debe estar en un formato compatible con el software de modelado BIM utilizado, como Revit (.rvt), ArchiCAD (.pla), Tekla (.tbp) o Rhino (.3dm), que son formatos de archivo comunes.

Es importante que el modelo 3D de envolvente paramétrica esté en un formato de archivo compatible con el software de modelado BIM utilizado en el proyecto, ya que esto asegura que se puedan realizar intercambios de datos precisos y que el modelo pueda ser utilizado por diferentes equipos y herramientas de software en todo el ciclo de vida del proyecto. Los formatos de archivo mencionados (Revit, ArchiCAD, Tekla y Rhino) son algunos de los formatos de archivo más utilizados en la industria de la construcción y son ampliamente compatibles con diferentes herramientas de software BIM.

Requisitos de interoperabilidad: Es esencial que el modelo 3D de envolvente paramétrica sea interoperable con otras herramientas de software y plataformas BIM utilizadas en el proyecto. Esto implica la capacidad de compartir datos con otras

aplicaciones y sistemas BIM, y garantizar que los datos se mantengan precisos y actualizados en todo momento.

La interoperabilidad es fundamental para garantizar que el modelo 3D de envolvente paramétrica pueda ser utilizado de manera efectiva en todo el ciclo de vida del proyecto. La interoperabilidad se refiere a la capacidad de diferentes herramientas de software y plataformas BIM para trabajar juntas y compartir datos de manera efectiva. Para lograr una interoperabilidad eficiente, se deben implementar estándares y protocolos claros de intercambio de datos para garantizar que los datos sean precisos y estén actualizados en todo momento.

Gestión de cambios: Dado que los cambios en el modelo pueden ocurrir a lo largo del proceso de diseño y construcción, es necesario que el modelo 3D de envolvente paramétrica sea fácilmente editable y actualizable en el contexto del proyecto. Por tanto, se debe contar con un sistema de control de versiones y gestión de cambios que permita mantener la coherencia y la integridad del modelo.

La gestión de cambios es esencial para garantizar que el modelo 3D de envolvente paramétrica esté actualizado y sea coherente con el proyecto en todo momento. Los cambios pueden ocurrir durante todo el ciclo de vida del proyecto, desde la fase de diseño hasta la fase de construcción, y es importante que los cambios se registren, se comuniquen y se implementen de manera efectiva.

Se deben implementar sistemas de control de versiones y gestión de cambios para garantizar que los cambios se registren y se implementen de manera coherente y efectiva.

Compatibilidad con diferentes herramientas de software: Además, el modelo 3D de envolvente paramétrica debe ser compatible con las diversas herramientas de software y plataformas BIM utilizadas en el proyecto. Esto implica la capacidad de compartir datos con otras aplicaciones y sistemas BIM, y garantizar que los datos se mantengan precisos y actualizados en todo momento.

La compatibilidad con diferentes herramientas de software es fundamental para garantizar que el modelo 3D de envolvente paramétrica pueda ser utilizado de manera efectiva por todos los miembros del equipo de construcción y diseño. Es importante que el modelo sea compatible con diferentes herramientas de software BIM utilizadas en el proyecto, lo que incluye la capacidad de compartir datos con otras aplicaciones y sistemas BIM para garantizar la precisión y actualización de los datos en todo momento. Esto también ayuda a garantizar la eficiencia y la colaboración efectiva entre los diferentes equipos de construcción y diseño que utilizan diferentes herramientas de software BIM.

En definitiva, cada uno de estos aspectos es fundamental para garantizar que el modelo 3D de envolvente paramétrica pueda ser utilizado de manera efectiva en todo el ciclo de vida del proyecto. Desde la elección de un formato de archivo compatible con el software de modelado BIM utilizado en el proyecto hasta la implementación de sistemas de control de versiones y gestión de cambios, estos aspectos son esenciales para garantizar la precisión, la actualización y la colaboración efectiva entre los diferentes miembros del equipo de construcción y diseño que trabajan en el proyecto.

5.3 Revisión de casos de Estudio

La elección de casos de estudio es una tarea fundamental en cualquier investigación, ya que permite obtener una comprensión más precisa y profunda sobre el tema de estudio. En el ámbito arquitectónico, la aplicación de modelos paramétricos tridimensionales y el uso de Building Information Modeling (BIM) son cada vez más relevantes, y su integración en la práctica profesional es un tema de gran interés. Por esta razón, la selección cuidadosa de proyectos que utilicen estas tecnologías resulta esencial para comprender cómo se pueden aplicar de manera efectiva en la arquitectura y en qué contextos resultan más eficientes. El siguiente apartado presenta cada uno de los proyectos seleccionados para el análisis de casos, detallando sus características y destacando las lecciones que se pueden aprender de cada uno de ellos en relación con la integración de envolventes paramétricas en el flujo de trabajo de BIM y su exportación al formato IFC.

Los proyectos seleccionados para el presente análisis de casos han sido cuidadosamente elegidos debido a su notable aplicación de modelos paramétricos tridimensionales en el diseño de envolventes arquitectónicas y su integración en el marco del Building Information Modeling (BIM). Cada uno de estos ejemplos proporciona una perspectiva única sobre las diversas facetas y enfoques en la utilización de tecnologías paramétricas y BIM en el ámbito arquitectónico, convirtiéndolo así en valiosos modelos didácticos y fuentes de inspiración. Además, la diversidad en cuanto a tipologías de edificios, ubicaciones geográficas y desafíos de diseño presentes en estos proyectos permite obtener una comprensión más amplia y profunda de cómo las soluciones paramétricas y BIM pueden adaptarse a contextos y requisitos variados. Mediante el estudio de estos casos, se busca adquirir un conocimiento más detallado sobre las prácticas óptimas, los retos y las oportunidades en relación con la integración de envolventes paramétricas en el flujo de trabajo de BIM, así como su exportación al formato IFC.

La elección de casos de estudio es fundamental en cualquier investigación, ya que permite obtener una comprensión más precisa y profunda sobre el tema de estudio. En el ámbito de la arquitectura contemporánea, la aplicación de modelos paramétricos tridimensionales y el uso de Building Information Modeling (BIM) son cada vez más relevantes. Por esta razón, la selección cuidadosa de proyectos que utilicen estas tecnologías resulta esencial para comprender cómo se pueden aplicar de manera efectiva en la arquitectura y en qué contextos resultan más eficientes.

El proyecto **Harpa Concert Hall and Conference Centre** en Reikiavik, Islandia, es un ejemplo destacado de cómo se utiliza el Building Information Modeling (BIM) en la integración de envolventes paramétricas en la práctica arquitectónica. Los arquitectos Henning Larsen Architects y Batteríð Architects diseñaron una fachada paramétrica única para el edificio, inspirada en la naturaleza islandesa. Para lograr este diseño, utilizaron algoritmos generativos para crear una serie de patrones y formas que se adaptaran a las condiciones climáticas y al entorno circundante. La integración de esta fachada paramétrica en el proceso de BIM permitió a los diseñadores y contratistas colaborar de manera más efectiva, visualizando el diseño en 3D y asegurando la coherencia y la precisión del modelo.



Figura 2. Figura. Imagen general de Recuperado de: https://images.adsttc.com/media/images/5015/019d/28ba/0d58/2800/114f/large_jpg/stringio.jpg?1414214933

La firma de ingeniería Ramboll también estuvo involucrada en el proyecto, aportando su experiencia en la realización de pruebas de viento y en la implementación de sistemas de iluminación y ventilación para la fachada paramétrica del Harpa Concert Hall and Conference Centre. Esto destaca aún más la importancia de la integración de la tecnología BIM en la práctica arquitectónica contemporánea, ya que permitió una mayor eficiencia y precisión en el diseño y construcción de la fachada única inspirada en la naturaleza islandesa.

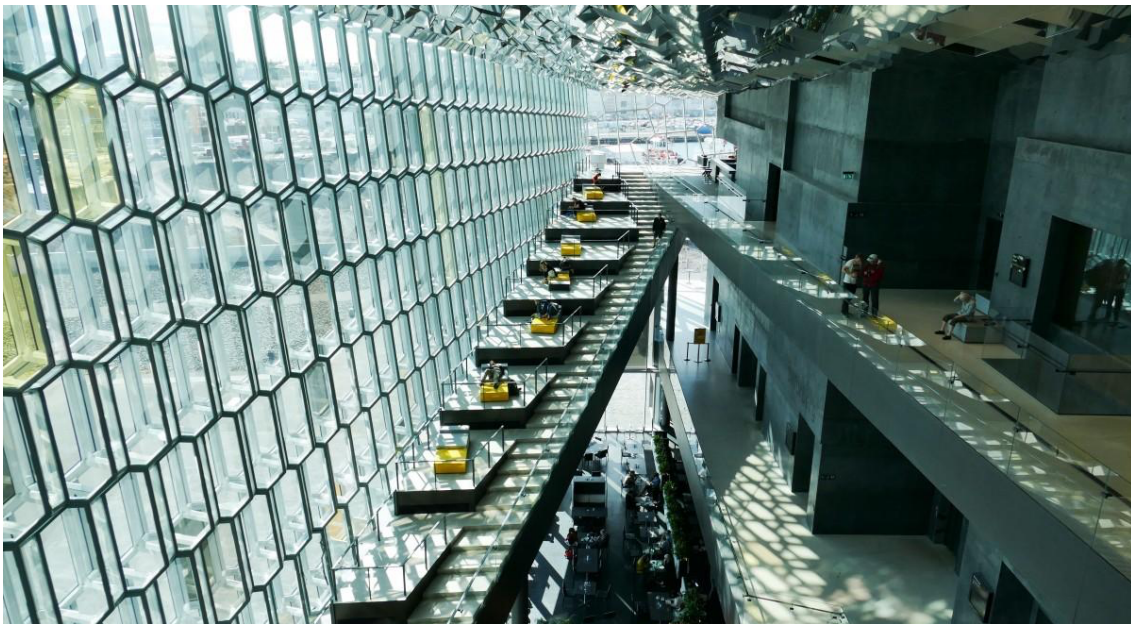


Figura 3. . Perspectiva Interior recuperado de: <https://pxhere.com/es/photo/541582>.

En el presente análisis de casos, se ha seleccionado el proyecto Harpa Concert Hall and Conference Centre debido a su notable aplicación de modelos paramétricos tridimensionales en el diseño de envolventes arquitectónicas y su integración en el marco del Building Information Modeling (BIM). La fachada del Harpa Concert Hall and Conference Centre, diseñada utilizando algoritmos generativos, es un ejemplo sobresaliente de cómo la tecnología BIM puede integrarse en el proceso de diseño y construcción de envolventes paramétricas en la práctica arquitectónica contemporánea.

La selección cuidadosa de proyectos para su análisis de casos es esencial para comprender la aplicabilidad efectiva de tecnologías paramétricas y BIM en la arquitectura contemporánea. El proyecto Harpa Concert Hall and Conference Centre destaca la importancia de la integración de tecnologías BIM en la práctica arquitectónica contemporánea y proporciona una fuente de inspiración y un modelo didáctico para futuros proyectos de envolventes paramétricas en la arquitectura.

The Broad Museum, Los Ángeles, EE. UU. Arquitectos: Diller Scofidio + Renfro
Ingeniería de fachada: ARUP

El Broad es un museo de arte contemporáneo que presenta una envolvente paramétrica conocida como "el velo". En el proyecto se utilizó un enfoque BIM, incluyendo la fachada, y se generaron modelos IFC para la coordinación entre las disciplinas. La firma de ingeniería ARUP estuvo a cargo del diseño de la fachada, que está compuesta por 2,500 paneles de concreto prefabricado y 650 pies de acero pintados de blanco.

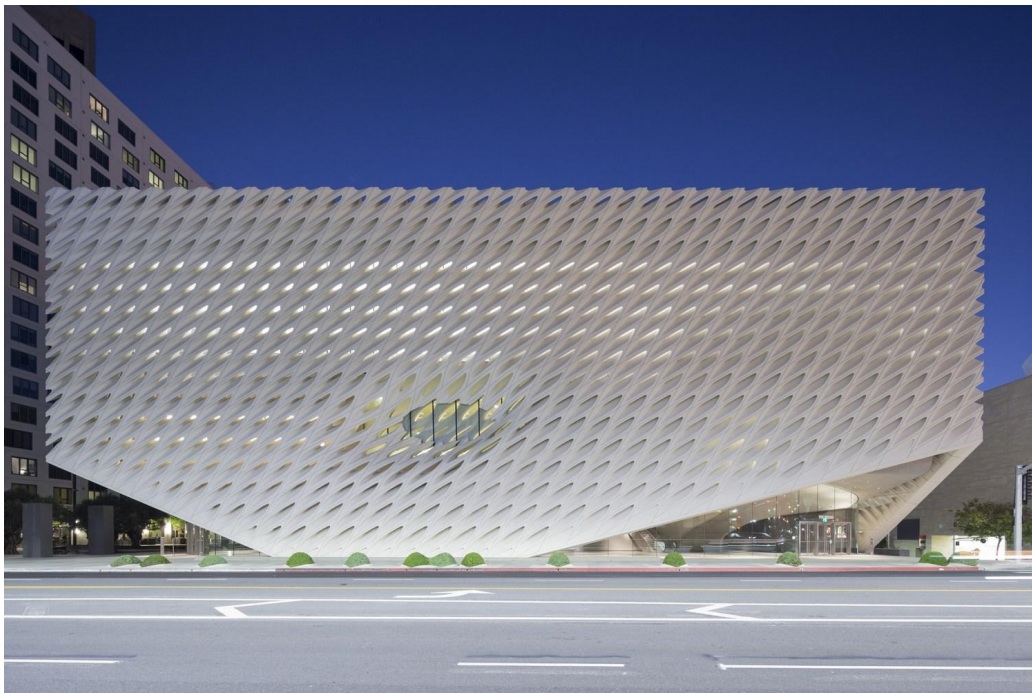


Figura 4. Figura Alzado envolvente The Broad Museum recuperado

El proyecto del Broad Museum es un caso de estudio relevante para la investigación, ya que ilustra la aplicación exitosa de BIM y modelos paramétricos en el diseño y construcción de una envolvente arquitectónica compleja. La fachada paramétrica del

Broad fue diseñada para evocar una imagen de ligereza y movimiento, con una serie de pliegues y pliegues que crean un efecto de movimiento y sombreado en el edificio. La firma de ingeniería ARUP utilizó un modelo BIM para diseñar y coordinar la fachada, lo que permitió una mayor precisión en la construcción y reducción de costos.



Figura 5. Imagen interior de la envolvente fotografía de IWAN BAAN

El proyecto del Broad Museum también destaca la importancia del trabajo colaborativo entre disciplinas en el diseño y construcción de envolventes paramétricas. La utilización de modelos IFC permitió una comunicación más eficiente y precisa entre los arquitectos, ingenieros y contratistas involucrados en el proyecto. Además, la utilización de BIM y modelos paramétricos permitió una mayor exploración y optimización del diseño de la fachada, lo que resultó en una solución arquitectónica única y efectiva.

En resumen, el proyecto del Broad Museum es un ejemplo destacado de la aplicación exitosa de BIM y modelos paramétricos en el diseño y construcción de una envolvente arquitectónica compleja. La utilización de modelos IFC y el trabajo colaborativo entre disciplinas fueron elementos claves para el éxito del proyecto. Además, el proyecto del Broad Museum aporta a la comprensión de los componentes que conforman una envolvente paramétrica y la importancia de la exploración y optimización del diseño en el contexto del BIM.

King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC), Riad, Arabia Saudita
Arquitectos: Zaha Hadid Architects



Figura 6. Envolvente exterior fotografía: HUFTON +CROW

El complejo de investigación energética se destaca por su innovadora envolvente paramétrica modular, que permite un control detallado de la iluminación y el clima interno. La utilización de la tecnología BIM en todas las etapas de diseño y construcción

del proyecto permitió una mayor colaboración entre los equipos multidisciplinares involucrados en el proceso y la exportación del modelo a formatos IFC.



Figura 7. Fotografía envoltente interior hall de entrada.

El diseño paramétrico modular de la envoltente del KAPSARC ha permitido la creación de un edificio con un alto grado de complejidad formal. Sin embargo, la implementación de esta envoltente ha presentado ciertas limitaciones en el uso del Curtain Wall como sistema de construcción.

El Curtain Wall es un sistema de fachada ampliamente utilizado en la arquitectura moderna que consiste en una estructura de soporte independiente del edificio principal, con paneles de vidrio u otro tipo de material que cubren la superficie exterior. Si bien este sistema es eficiente en términos de costos y tiempos de construcción, puede presentar dificultades en la construcción de envoltentes paramétricas complejas debido a la limitación en la capacidad de los paneles de vidrio para adaptarse a formas no planas. Por lo tanto, se requieren enfoques alternativos y personalizados para el diseño y construcción de envoltentes paramétricas complejas, como la utilización de paneles de fachada personalizados y soluciones de construcción a medida.

En conclusión, el proyecto KAPSARC, diseñado por Zaha Hadid Architects, presenta una envoltente paramétrica modular que se ha construido utilizando tecnología BIM en todas las etapas del proceso de diseño y construcción. Aunque el uso de Curtain Wall presenta ciertas limitaciones en la construcción de envoltentes paramétricas complejas, el enfoque alternativo de personalizar soluciones de construcción para adaptarse a formas no planas ha permitido la creación de un edificio único y visualmente impactante. Este proyecto destaca la importancia de la colaboración multidisciplinaria y la adopción de tecnologías avanzadas en el diseño y construcción de edificios contemporáneos.

The Edge, Ámsterdam, Países Bajos Arquitectos: PLP Architecture, El proyecto es un ejemplo destacado de cómo se utiliza el Building Information Modeling (BIM) en la integración de envolventes paramétricas en la práctica arquitectónica contemporánea. Diseñado por PLP Architecture, The Edge es un edificio de oficinas sustentable y altamente tecnológico que utiliza una fachada paramétrica de vidrio.



Figura 8. Envolvente tipo Curtain wall edificio The Edge. Fotografía de Ronald Tilleman

La fachada paramétrica del edificio se desarrolló utilizando BIM y se exportaron modelos IFC para la coordinación entre las disciplinas involucradas en el proyecto. Esto permitió una mayor eficiencia y precisión en el diseño y construcción de la fachada paramétrica, asegurando la coherencia y la precisión del modelo en todo momento. Además, la tecnología BIM también permitió una mejor colaboración y coordinación entre los diferentes equipos de diseño y construcción, lo que redujo los tiempos de respuesta y mejoró la calidad del proyecto en general.

Además, la fachada paramétrica de vidrio del edificio tiene un papel importante en su sustentabilidad, ya que permite un mayor control de la luz y la ventilación natural, reduciendo la necesidad de energía para iluminación y ventilación artificial. La fachada paramétrica se adapta a las condiciones climáticas y al entorno circundante, lo que también contribuye a su eficiencia energética.

El proyecto The Edge en Ámsterdam destaca la importancia de la integración de tecnologías paramétricas y BIM en la práctica arquitectónica contemporánea, y proporciona un ejemplo sobresaliente de cómo estas tecnologías pueden aplicarse de manera efectiva en la construcción de fachadas paramétricas sustentables y altamente eficientes.



Figura 9. Vista interior de la envolvente. Fotografía de Ronald Tilleman.

El proyecto de las torres **Al Bahr en Abu Dhabi**, Emiratos Árabes Unidos, diseñado por Aedas con la ingeniería de fachadas a cargo de ARUP, es un ejemplo sobresaliente de cómo las tecnologías paramétricas y el Building Information Modeling (BIM) pueden aplicarse en la práctica arquitectónica contemporánea. La innovadora fachada dinámica y paramétrica de las torres Al Bahr, compuesta por elementos que se abren y cierran en respuesta al sol, es un diseño complejo que se beneficia de la integración de tecnologías avanzadas en el proceso de diseño y construcción.



Figura 10. Fachada torres Al Bahr en Abu Dhabi fotografía: Aedas

Para lograr este diseño, se utilizaron tecnologías paramétricas avanzadas y se integraron en el proceso de BIM, generando modelos IFC para la colaboración y coordinación entre los equipos de diseño y construcción. La integración de la tecnología BIM y tecnologías paramétricas permitió una mayor eficiencia y precisión en el diseño y construcción de la fachada paramétrica, asegurando la coherencia y la precisión del modelo en todo momento.

La fachada paramétrica del proyecto Al Bahr Towers no solo destaca la eficiencia y la precisión que aporta la tecnología BIM y las tecnologías paramétricas al diseño y construcción de envolventes arquitectónicas, sino que también contribuye a la eficiencia energética del edificio al regular la cantidad de luz y calor que entra en el edificio.

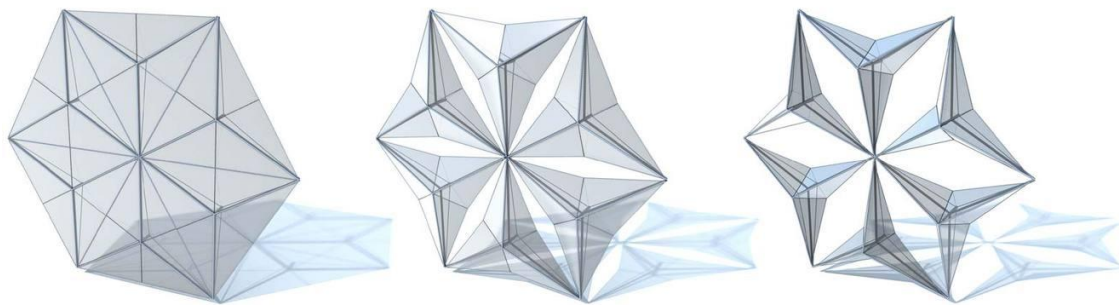


Figura 11. Tipología de envolvente móvil. Creación Aedas

Al Bahr Towers destaca la importancia de la integración de tecnologías paramétricas y BIM en la práctica arquitectónica contemporánea y proporciona un ejemplo sobresaliente de cómo estas tecnologías pueden aplicarse de manera efectiva en la construcción de fachadas dinámicas y altamente eficientes. El uso de estas tecnologías permite una mayor eficiencia y precisión en el diseño y construcción de envolventes arquitectónicas, lo que puede conducir a una construcción más sostenible y eficiente energéticamente. Este proyecto demuestra la necesidad de añadir a la solución propuesta elementos para envolventes móviles

5.4 Diseño y desarrollo de la solución.

La importancia de implementar metodologías de trabajo colaborativo en la industria del diseño y construcción, como el enfoque OpenBIM, radica en su capacidad para facilitar la comunicación y el intercambio de información entre distintas disciplinas y aplicaciones de software BIM. Dentro de este marco, Rhinoceros y Grasshopper emergen como instrumentos valiosos en la elaboración de modelos tridimensionales altamente detallados y personalizados, así como en la optimización de envolventes paramétricas en diseño arquitectónico.

La solución propuesta tiene como objetivo brindar al usuario la máxima libertad en el modelado tridimensional, al tiempo que permite la incorporación de información relevante para las etapas subsiguientes del proyecto. El enfoque se centra en el software de menor costo, Rhinoceros, que a pesar de no ser un software BIM per se, ofrece precisión y flexibilidad en la creación de modelos tridimensionales. Además, Rhinoceros es conocido por su interfaz intuitiva y facilidad de uso.

La combinación de Grasshopper con Rhinoceros posibilita la creación de algoritmos visuales que ajustan automáticamente los parámetros del diseño en función de los cambios realizados. Los complementos de conexión, como Rhino Inside para Revit y ArchiCAD Connection para Archicad, facilitan la transferencia bidireccional de datos entre Rhinoceros y estos programas BIM.

La utilización conjunta de Rhinoceros, Grasshopper y programas BIM como Revit o Archicad potencia la interoperabilidad y la colaboración efectiva en un entorno OpenBIM. Además, permite la transferencia bidireccional de datos y modificaciones entre los modelos de Revit o Archicad y Rhinoceros mediante los complementos de conexión y Grasshopper.

La solución propuesta comprende tres flujos de trabajo distintos que se adaptan a las condiciones específicas de cada usuario, todos fundamentados en la construcción de geometría en Rhinoceros y Grasshopper:

Flujo de trabajo #1: Utilización del complemento desarrollado por Geometry Gym para incrustar los datos necesarios en la geometría de referencia y exportar a IFC.

Flujo de trabajo #2: Aplicación de Rhino Inside para establecer conexión con Revit, transfiriendo la geometría al software BIM y permitiendo la exportación a IFC.

Flujo de trabajo #3: Empleo del complemento de interoperabilidad con Archicad para conectar con el software BIM y posteriormente exportar al formato de intercambio IFC.

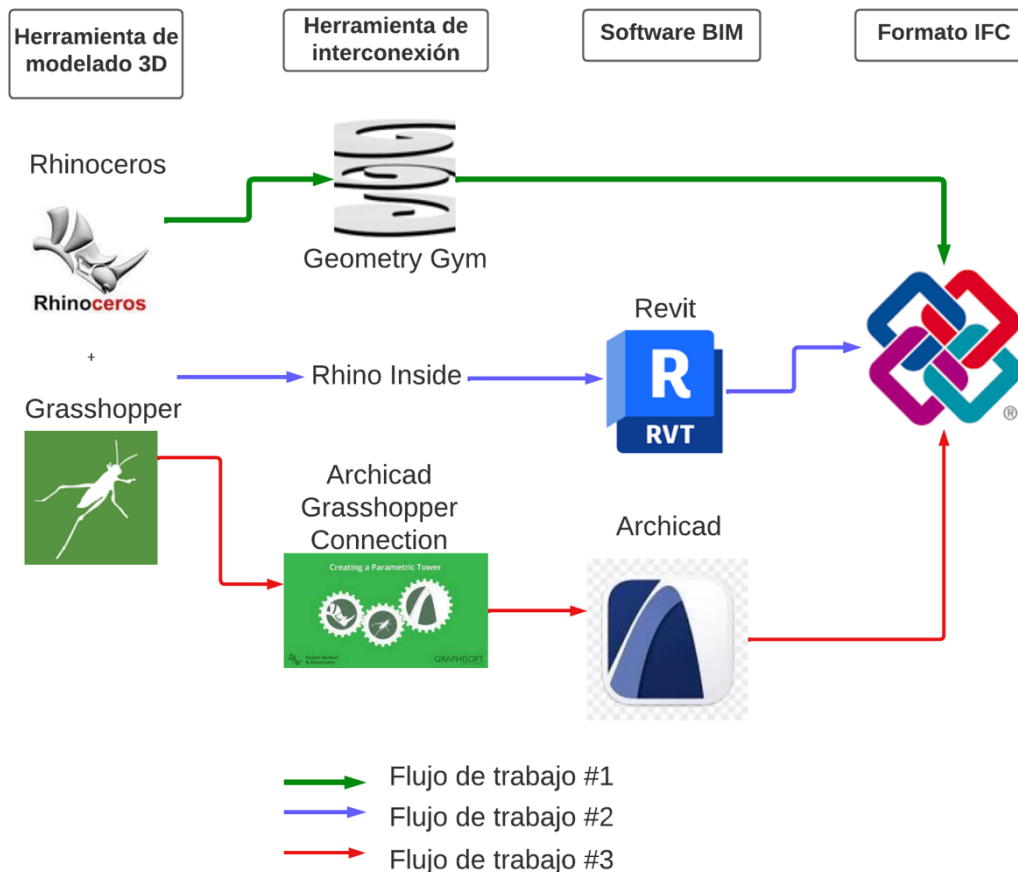


Figura 12. Descripción de los flujos de trabajo propuestos

Estos flujos de trabajo se han desarrollado considerando la información previamente recolectada y presentada en relación con la cantidad de usuarios y el costo promedio de las licencias. De esta forma, se busca que la solución propuesta sea eficiente y accesible tanto para profesionales independientes como para empresas. Adicionalmente, se han excluido aquellos programas de software que no cuentan con herramientas de conexión paramétrica interactiva compatibles con Rhinoceros. Tal decisión se fundamenta en el deseo de maximizar la utilidad de la herramienta desde las etapas tempranas de diseño y garantizar su adaptabilidad a posibles modificaciones futuras.

5.5 Herramientas informáticas específicas.

En el contexto de la presente investigación, es importante analizar el uso de herramientas existentes en el mercado para la exportación de información a IFC en Grasshopper. Sin embargo, se debe considerar la complejidad inherente en el desarrollo de una herramienta personalizada para este fin, debido a diversos factores que se describen a continuación:

Requerimientos técnicos: La implementación de una herramienta personalizada de exportación a IFC en Grasshopper exige un profundo conocimiento de la plataforma de programación visual y del estándar IFC como medio para el intercambio de información en la industria de la construcción. Asimismo, se necesita dominar el lenguaje de programación subyacente en Grasshopper, como Python o C#, para lograr funcionalidades avanzadas.

Diversidad de objetos BIM: La industria AEC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción) trabaja con una amplia gama de objetos BIM, como elementos estructurales, instalaciones y acabados, cada uno con propiedades y características específicas. El desarrollo de una herramienta capaz de gestionar y exportar de manera adecuada todos estos elementos a IFC implica un manejo exhaustivo de información y relaciones entre objetos.

Estandarización y compatibilidad: El estándar IFC es utilizado por numerosos programas de software BIM, cada uno con particularidades y enfoques distintos en la interpretación de datos. Por consiguiente, es esencial que la herramienta personalizada garantice la compatibilidad con diversas aplicaciones y se ajuste a los requerimientos y especificaciones del estándar IFC.

Flexibilidad y adaptabilidad: La herramienta debe ser adaptable a diferentes flujos de trabajo y necesidades de los usuarios, permitiendo la personalización de la información a exportar. Esto conlleva un diseño modular y escalable en su arquitectura, que facilite futuras actualizaciones y mejoras.

Manejo de datos paramétricos: La naturaleza paramétrica de Grasshopper demanda que la herramienta personalizada pueda gestionar datos y relaciones entre objetos de forma dinámica, añadiendo una capa adicional de complejidad en la programación y estructuración de la herramienta.

Validación y garantía de calidad: La herramienta debe asegurar que la información exportada a IFC sea precisa y coherente, lo que requiere la implementación de mecanismos de validación y control de calidad en el proceso de exportación.

Por lo tanto, al examinar el uso de herramientas existentes en el mercado en la sección de esta memoria de investigación, es crucial tener en cuenta la complejidad y los desafíos involucrados en el desarrollo de una herramienta personalizada para la exportación de información a IFC en Grasshopper. Se debe sopesar cuidadosamente la viabilidad de crear una herramienta personalizada frente a la adopción de soluciones ya disponibles en el mercado, teniendo en cuenta las capacidades y limitaciones de ambas opciones.

Geometry Gym es un complemento ampliamente reconocido en la comunidad de diseño paramétrico y BIM, que permite la exportación de información a IFC desde Grasshopper y Rhinoceros. A continuación, se presentan algunas de las ventajas significativas de utilizar Geometry Gym en el proceso de exportación a IFC:

Facilita la interoperabilidad: Geometry Gym facilita el intercambio de datos y la colaboración entre diferentes aplicaciones de software y disciplinas de la industria AEC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción), mejorando la interoperabilidad en un entorno OpenBIM y permitiendo la comunicación fluida entre las partes interesadas del proyecto.

Gestión eficiente de objetos BIM: El complemento maneja eficientemente una amplia variedad de objetos BIM, incluyendo elementos estructurales, instalaciones y acabados. Gracias a su capacidad para asignar objetos BIM específicos a geometrías creadas en Grasshopper, Geometry Gym garantiza una exportación precisa y coherente a IFC.

Personalización y control: Geometry Gym ofrece a los usuarios un alto grado de control y personalización en el proceso de exportación a IFC. Los usuarios pueden elegir y ajustar

la información que desean exportar, así como definir atributos, propiedades y clasificaciones específicas para cada objeto BIM.

Compatibilidad y estandarización: Al utilizar Geometry Gym, los usuarios se benefician de la compatibilidad con el estándar IFC, lo que garantiza que los modelos exportados se ajusten a las especificaciones del estándar y puedan ser interpretados correctamente por otras aplicaciones BIM.

Actualizaciones y soporte: Geometry Gym cuenta con un equipo de desarrollo activo y una comunidad en línea comprometida, lo que asegura actualizaciones regulares, mejoras en las funcionalidades y soporte para los usuarios en caso de dudas o problemas técnicos.

Ahorro de tiempo y recursos: La capacidad de exportar directamente a IFC desde Grasshopper y Rhinoceros con Geometry Gym elimina la necesidad de utilizar múltiples programas y procesos de exportación, lo que ahorra tiempo y recursos valiosos en el desarrollo del proyecto.

En resumen, Geometry Gym ofrece una solución eficiente y personalizable para la exportación de información a IFC desde Grasshopper y Rhinoceros, facilitando la interoperabilidad y colaboración en un entorno OpenBIM y brindando a los usuarios un control detallado sobre el proceso de exportación. Además, el soporte continuo y las actualizaciones regulares proporcionadas por el equipo de desarrollo y la comunidad en línea hacen de Geometry Gym una opción sólida para los profesionales de la industria AEC.

Rhino Inside:

Rhino Inside es un complemento que permite ejecutar Rhinoceros y Grasshopper dentro de otras aplicaciones, como Autodesk Revit, mejorando la interoperabilidad entre estos programas y facilitando la colaboración en un entorno OpenBIM. Al utilizar RhinoInside para la exportación de información a IFC, los usuarios pueden beneficiarse de las siguientes ventajas:

Integración nativa: RhinoInside proporciona una integración directa y fluida de Rhinoceros y Grasshopper en aplicaciones como Revit, permitiendo a los usuarios trabajar con sus herramientas y flujos de trabajo habituales sin tener que cambiar constantemente entre diferentes programas.

Compatibilidad mejorada: Al utilizar RhinoInside, los usuarios pueden aprovechar las funcionalidades y capacidades de Revit, incluyendo su capacidad para exportar modelos a IFC, garantizando así la compatibilidad con otras aplicaciones BIM y cumpliendo con los estándares de la industria.

Flexibilidad y control: RhinoInside permite a los usuarios acceder a los parámetros y propiedades nativas de Revit, lo que les brinda mayor flexibilidad y control sobre la información que se exporta a IFC y cómo se estructuran los objetos BIM.

Automatización y optimización: Con RhinoInside, los usuarios pueden emplear Grasshopper para crear algoritmos visuales que ajusten automáticamente los parámetros del diseño en función de los cambios realizados en Revit, lo que resulta especialmente útil en la fase de diseño conceptual y optimización del proyecto.

Ahorro de tiempo y recursos: La capacidad de trabajar directamente en Revit con RhinoInside elimina la necesidad de procesos de exportación e importación adicionales, lo que ahorra tiempo y recursos valiosos en el desarrollo del proyecto.

ArchiCAD Connection:

ArchiCAD Connection es un complemento diseñado para mejorar la interoperabilidad entre Rhinoceros, Grasshopper y ArchiCAD. Al utilizar ArchiCAD Connection para la exportación de información a IFC, los usuarios obtienen las siguientes ventajas:

Transferencia bidireccional de datos: ArchiCAD Connection permite la transferencia bidireccional de datos entre Rhinoceros/Grasshopper y ArchiCAD, facilitando la colaboración y la comunicación en un entorno OpenBIM y garantizando que los modelos y la información estén siempre actualizados y sincronizados.

Compatibilidad y estandarización: Al utilizar ArchiCAD Connection, los usuarios pueden aprovechar las funcionalidades y capacidades de ArchiCAD, incluyendo su capacidad para exportar modelos a IFC, garantizando así la compatibilidad con otras aplicaciones BIM y cumpliendo con los estándares de la industria.

Flexibilidad y control: ArchiCAD Connection permite a los usuarios acceder a los parámetros y propiedades nativas de ArchiCAD, lo que les brinda mayor flexibilidad y control sobre la información que se exporta a IFC y cómo se estructuran los objetos BIM.

Automatización y optimización: Con ArchiCAD Connection, los usuarios pueden emplear Grasshopper para crear algoritmos visuales que ajusten automáticamente los parámetros del diseño en función de los cambios realizados en ArchiCAD, lo que resulta especialmente útil en la fase de diseño conceptual y optimización del proyecto.

Ahorro de tiempo y recursos: La capacidad de trabajar directamente en ArchiCAD con ArchiCAD Connection elimina la necesidad de procesos de exportación e importación adicionales, lo que ahorra tiempo y recursos valiosos en el desarrollo del proyecto.

En resumen, tanto RhinoInside como ArchiCAD Connection ofrecen soluciones eficientes para la exportación de información a IFC al integrar Rhinoceros y Grasshopper con aplicaciones BIM como Revit y ArchiCAD, respectivamente. Estos complementos mejoran la interoperabilidad y facilitan la colaboración en un entorno OpenBIM al permitir la transferencia bidireccional de datos y proporcionar a los usuarios un control detallado sobre la información exportada. Además, la automatización y optimización proporcionada por la integración con Grasshopper ayuda a mejorar la eficiencia del proceso de diseño y a reducir el tiempo y los recursos necesarios en el desarrollo del proyecto.

5.6 Diseño y desarrollo del modelo del sistema de fachada

Para llevar a cabo las evaluaciones de interoperabilidad, es imprescindible emplear una geometría base, la cual se deriva del análisis meticuloso de los casos de estudio previamente expuestos en detalle. Se desarrolla un modelo geométrico único de envoltente que representa de manera generalizada los componentes utilizados en la elaboración de fachadas paramétricas. Dichos componentes se congregan en un

compendio denominado diccionario de elementos constructivos, que se presenta como resultado fundamental de la presente investigación académica.

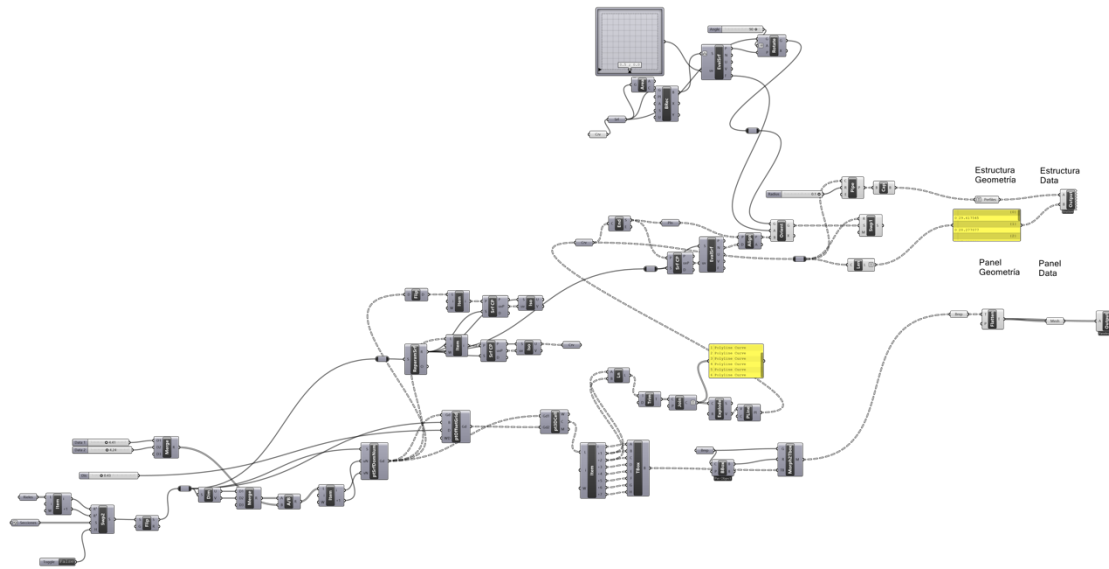


Figura 13. Código generativo de la envolvente paramétrica.

La envolvente que se utilizará para las pruebas de interoperabilidad está diseñada como elemento representativo cuya geometría puede variar dependiendo el número de elementos y su tipología. Gracias al análisis de referentes se hace que la geometría incluya variaciones de las dimensiones y cambios de inclinación. El modelo contiene la información geométrica de paneles y estructura, la cantidad total de elementos diferentes ronda los 200.

De esta manera se puede testear la manera en que los diferentes flujos de trabajo potencian la mayor expresividad y libertad al momento de generar el elemento arquitectónico.

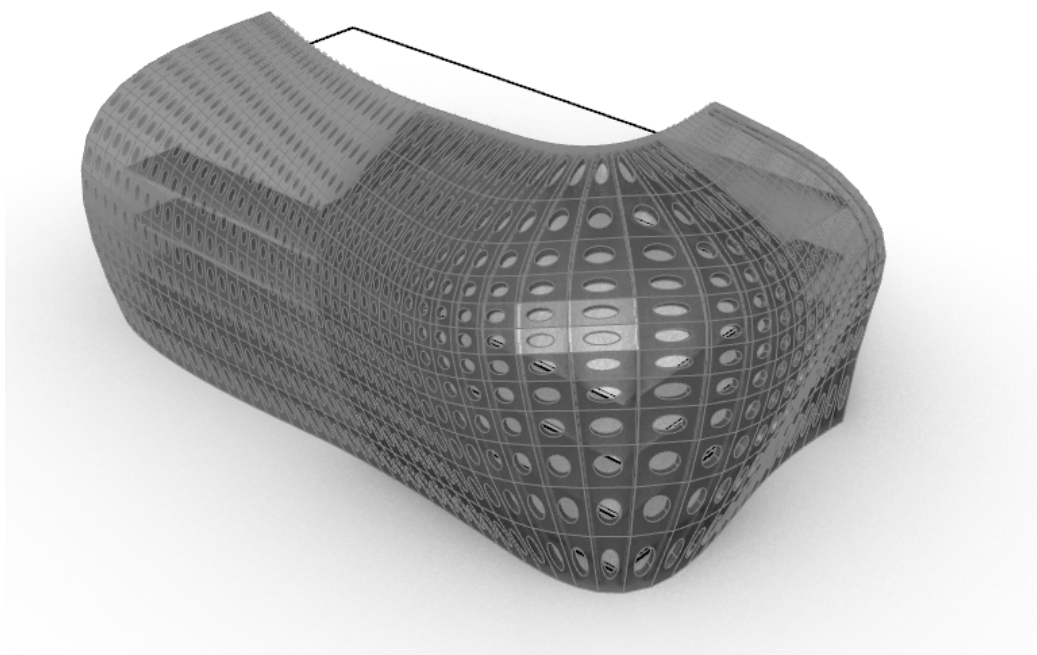


Figura 14. Isométrico de la envolvente utilizada como objeto de pruebas.

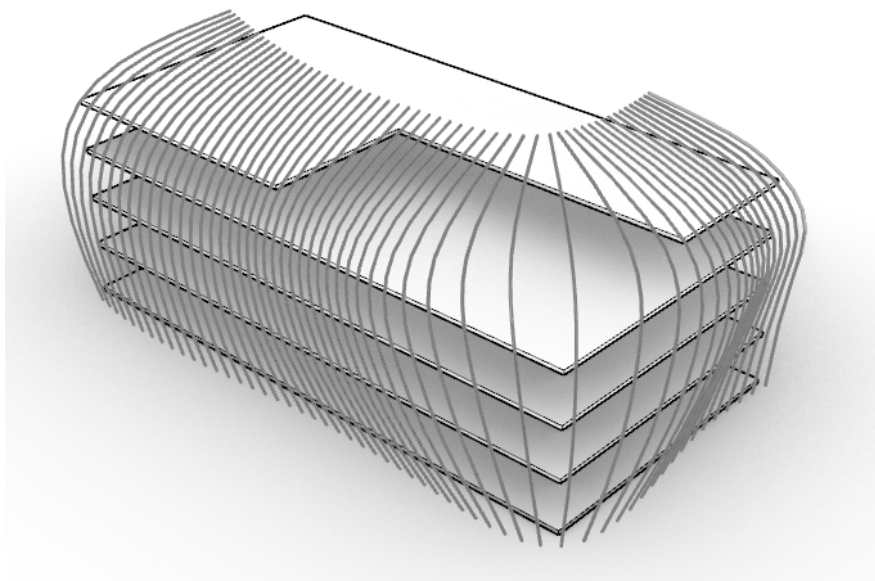


Figura 15. Perfiles estructurales de envolvente

5.7 Diccionario de elementos constructivos

La interoperabilidad entre sistemas de modelado de información de construcción (BIM) es esencial para la eficiencia y efectividad de los proyectos de construcción. En el contexto de una envolvente paramétrica, la creación de un diccionario de elementos constructivos es especialmente importante para garantizar que los elementos se definan y se modelan de manera coherente en todos los sistemas relevantes.

Un diccionario de elementos constructivos de una envolvente paramétrica puede incluir la identificación y definición de los diferentes elementos constructivos, como los paneles, juntas, soportes, juntas de estanqueidad, herrajes, motores, sensores, iluminación y sistemas de control asociados. Cada uno de estos elementos debe ser definido de manera consistente y coherente en todos los sistemas relevantes.

La creación de un diccionario de elementos constructivos puede ayudar a garantizar una interoperabilidad exitosa entre diferentes sistemas de software BIM, incluyendo Rhinoceros y el formato de uso abierto Industry Foundation Classes (IFC). La realización de pruebas de interoperabilidad con un diccionario de elementos constructivos definido puede ayudar a garantizar que los modelos de Rhinoceros se exporten correctamente a formato IFC y se interpreten correctamente en otros sistemas que utilicen este formato.

La creación de un diccionario de elementos constructivos de una envolvente paramétrica puede basarse en diversas fuentes bibliográficas, como "Parametric Design of Building Envelopes" de Arturo Tedeschi, "Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction" de Luca Caneparo y "Designing Parametric Architecture with Grasshopper" de Arturo Tedeschi.

Se puede decir que la creación de un diccionario de elementos constructivos de una envolvente paramétrica es fundamental para garantizar la interoperabilidad exitosa entre diferentes sistemas de software BIM. Al definir y modelar los elementos constructivos de manera consistente en todos los sistemas relevantes, se puede lograr una mayor eficiencia y efectividad en los proyectos de construcción.

A continuación, se presenta el diccionario de elementos constructivos resultado del estudio de bibliografía previa y los casos de estudio:

Estructura: la estructura principal que sostiene los paneles y revestimientos de la envolvente. Puede estar hecha de acero, concreto, madera u otros materiales. (Ching, Francis D.K. "Building Construction Illustrated").

Paneles: los elementos que conforman la superficie visible de la envolvente. Pueden estar hechos de vidrio, metal, cerámica, piedra, madera u otros materiales, y pueden ser de diferentes formas y tamaños dependiendo del diseño. (Snyder, Jeff. "Façades: Principles of Construction").

Juntas: las conexiones entre los paneles que permiten que se muevan y ajusten a diferentes condiciones ambientales, como el viento, la temperatura y la humedad. Estas juntas pueden ser visibles u ocultas, y pueden ser diseñadas para crear diferentes efectos visuales. (Snyder, Jeff. "Façades: Principles of Construction").

Soportes: los elementos que conectan los paneles con la estructura, proporcionando soporte estructural y estabilidad. Estos pueden ser ocultos o visibles, y pueden ser diseñados para crear diferentes efectos visuales. (Ching, Francis D.K. "Building Construction Illustrated").

Juntas de estanqueidad: los elementos que proporcionan un sellado entre los paneles y la estructura, evitando que el aire y el agua entren al edificio. Pueden estar hechos de diversos materiales como goma, silicona o espuma. (Snyder, Jeff. "Façades: Principles of Construction").

Herrajes: los elementos que permiten que los paneles se abran y cierren, proporcionando acceso para la limpieza, el mantenimiento y la ventilación. Estos pueden ser ocultos o visibles, y pueden ser diseñados para crear diferentes efectos visuales. (Ching, Francis D.K. "Building Construction Illustrated").

Motores: los elementos que proporcionan la energía para el movimiento de los paneles, permitiéndoles ajustarse automáticamente a diferentes condiciones. Estos pueden estar integrados en la estructura o estar ocultos detrás de los paneles. (Snyder, Jeff. "Façades: Principles of Construction").

Sensores: los elementos que detectan cambios en la temperatura, la luz y otras condiciones, y activan el movimiento de los paneles. Estos pueden estar integrados en la estructura o estar ocultos detrás de los paneles. (Snyder, Jeff. "Façades: Principles of Construction").

Iluminación: los elementos que proporcionan iluminación para la envolvente, creando diferentes efectos visuales y mejorando la apariencia general del edificio. Estos pueden estar integrados en los paneles o en la estructura, o montados externamente. (Ching, Francis D.K. "Building Construction Illustrated").

Sistema de Control: el software que gestiona el movimiento de los paneles, basado en la entrada de los sensores y otras fuentes. Este sistema puede estar integrado en el sistema de automatización general del edificio, permitiendo un control y monitoreo centralizado. (Snyder, Jeff. "Façades: Principles of Construction").

5.8 Exportación a formato IFC y verificación de interoperabilidad.

La norma ISO 16739, también conocida como Industry Foundation Classes (IFC) para el intercambio de datos de información de construcción, es una especificación internacional para el modelado de información de construcción (BIM). Esta norma establece un lenguaje común y una estructura de datos para describir las características físicas y funcionales de los elementos de construcción y su relación con el entorno construido.

La norma ISO 16739 define una serie de clases de objetos y relaciones que pueden ser utilizadas en diferentes aplicaciones de software de BIM. Estas clases incluyen objetos de construcción como paredes, pisos, techos, ventanas, puertas y sistemas mecánicos, eléctricos y de plomería. Además, la norma establece reglas para la organización y la comunicación de los datos, lo que permite la interoperabilidad y el intercambio de información entre diferentes aplicaciones de software BIM.

A pesar de la importancia de la norma ISO 16739 como marco para el modelado de información de construcción, su implementación completa y correcta puede ser desafiante debido a la complejidad de los procesos y flujos de trabajo en la industria de la construcción, así como a la necesidad de una mayor capacitación y formación del personal en el uso de BIM y la norma IFC. Por lo tanto, aunque la norma IFC es un componente clave para la interoperabilidad y el intercambio de datos en BIM, está fuera del alcance de esta investigación profundizar en su implementación y uso completo.

Sin embargo, el modelo planteado permite al usuario compartir un primer documento en formato IFC de tal manera que la información incrustada en el archivo pueda ser consultada en software de uso libre o de pago.

En el flujo de trabajo #1, para exportar a IFC solamente es necesario indicar una ruta en el sistema, verificando que toda la geometría esté correctamente referenciada a la información que se desea incluir en cada elemento. La ventaja de utilizar el flujo de trabajo con el plugin de Geometry Gym es que se puede exportar directamente y no utilizar otro programa de pago como Revit o Archicad. Sin embargo, se requiere un nivel avanzado de conocimientos de manejo de Grasshopper y programación visual, ya que, aunque esta herramienta permite integrar propiedades personalizadas, estas tienen que ser descritas de una manera menos intuitiva.

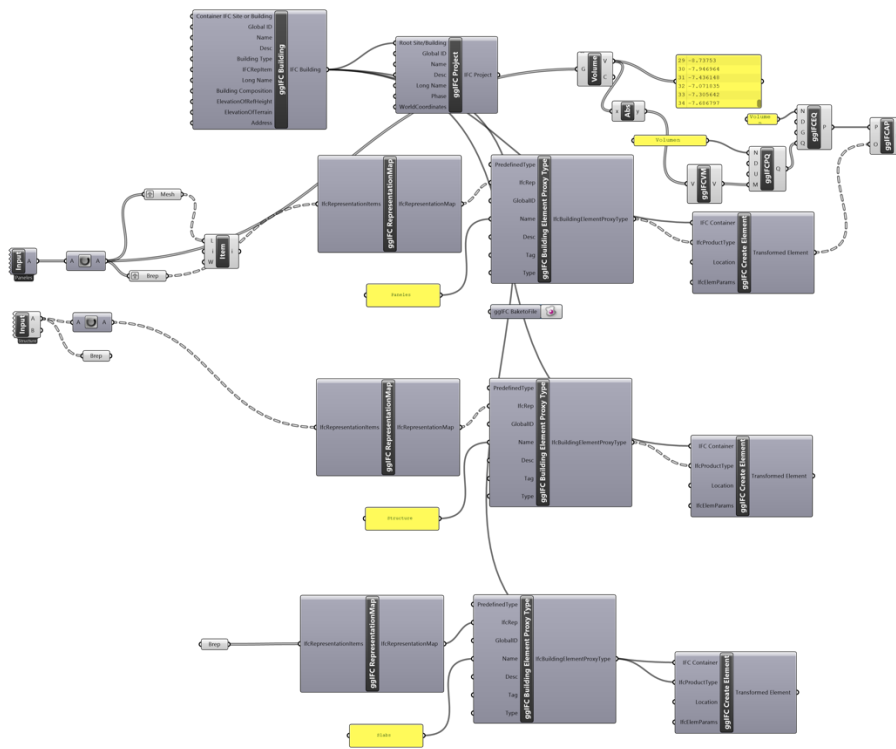


Figura 16. Flujo de trabajo #1 Geometry Gym. Intercambio de información con IFC

Se realiza la comprobación del formato IFC con un visor de IFC de uso gratuito. Como se puede ver en la siguiente figura. Además, se comprueba que el componente personalizado en este caso llamado “Volumen Rhino” se pueda leer en las unidades correctas.

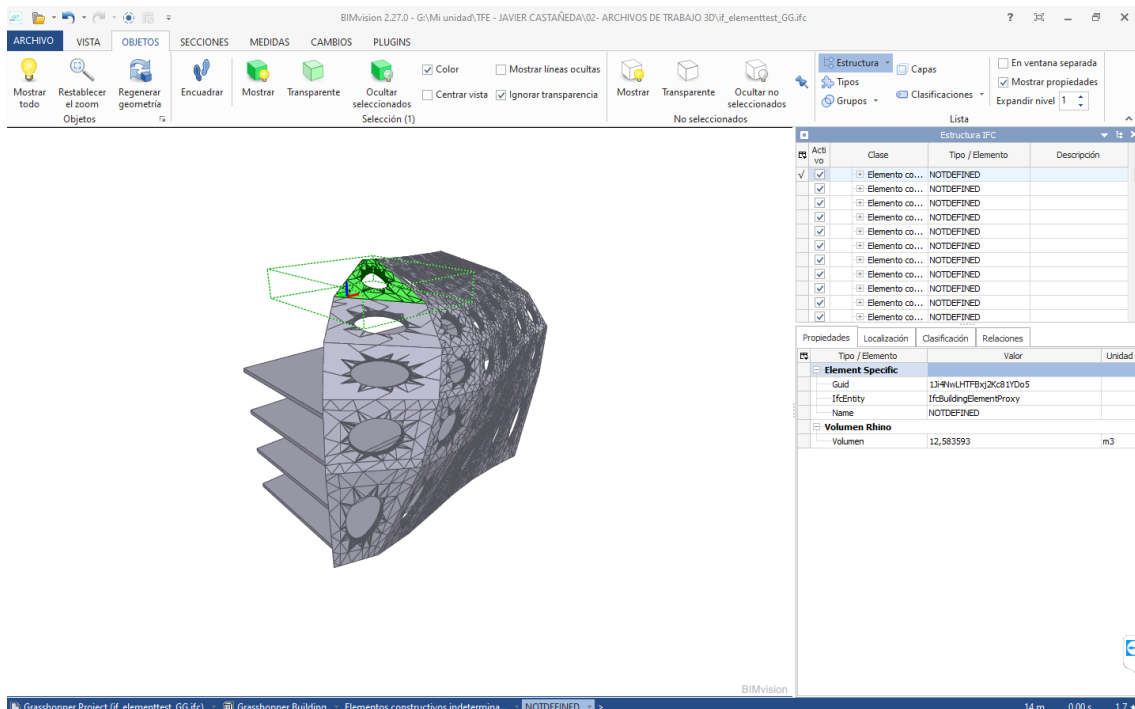


Figura 17. Comprobación de la geometría exportada y los datos IFC en BIMvision

En el flujo de trabajo #2 propuesto usando RhinoInside, es necesario utilizar alguna de las categorías de elementos o familias propias del entorno de trabajo de Revit. Esto hace que sea más difícil el intercambio de información, ya que fuerza al usuario a filtrar la jerarquía creada de la envolvente. También se pueden utilizar los componentes de DirectShape, lo que permite insertar la geometría como elementos genéricos.

En el tercer flujo de trabajo propuesto usando Archicad Connection, se exporta usando Archicad. Esta solución es la más intuitiva de todas, permitiendo agregar parámetros más especializados (aunque no personalizables) a la geometría de tipo "Morph". En el caso de la envolvente, se ha probado incluir datos como vida de servicio, resistencia al fuego, transmitancia térmica, etc.

En el caso de la envolvente se ha probado incluir datos como vida de servicio, resistencia al fuego, transmitancia térmica etc.. como se muestra en la figura siguiente.

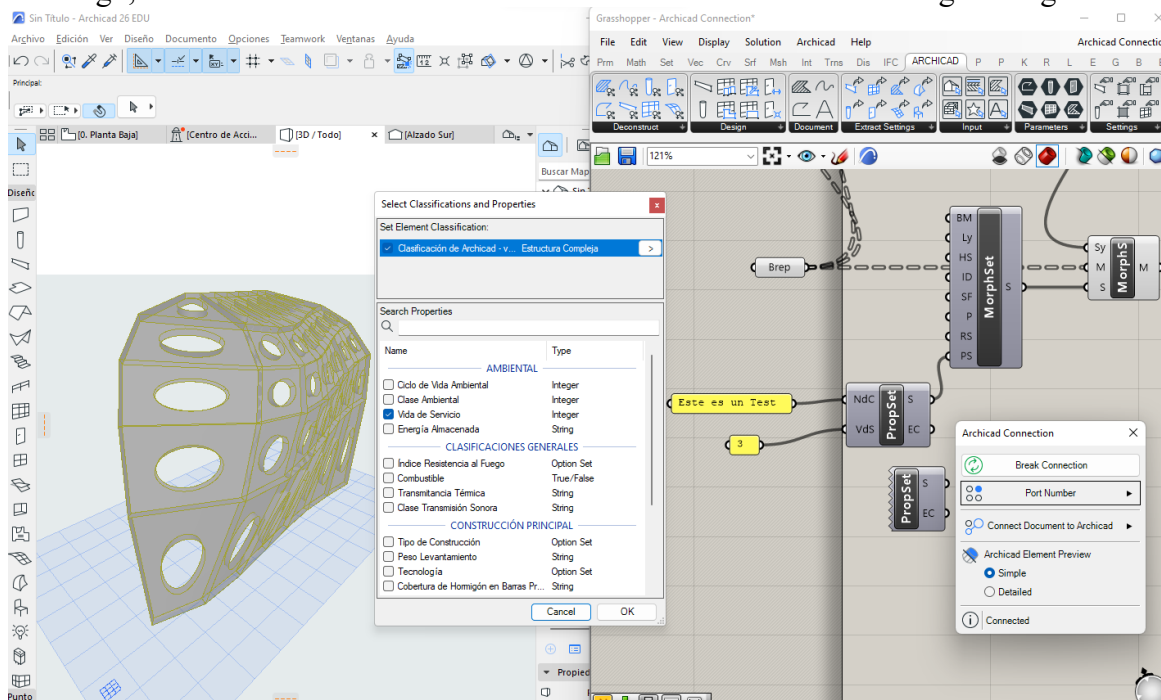
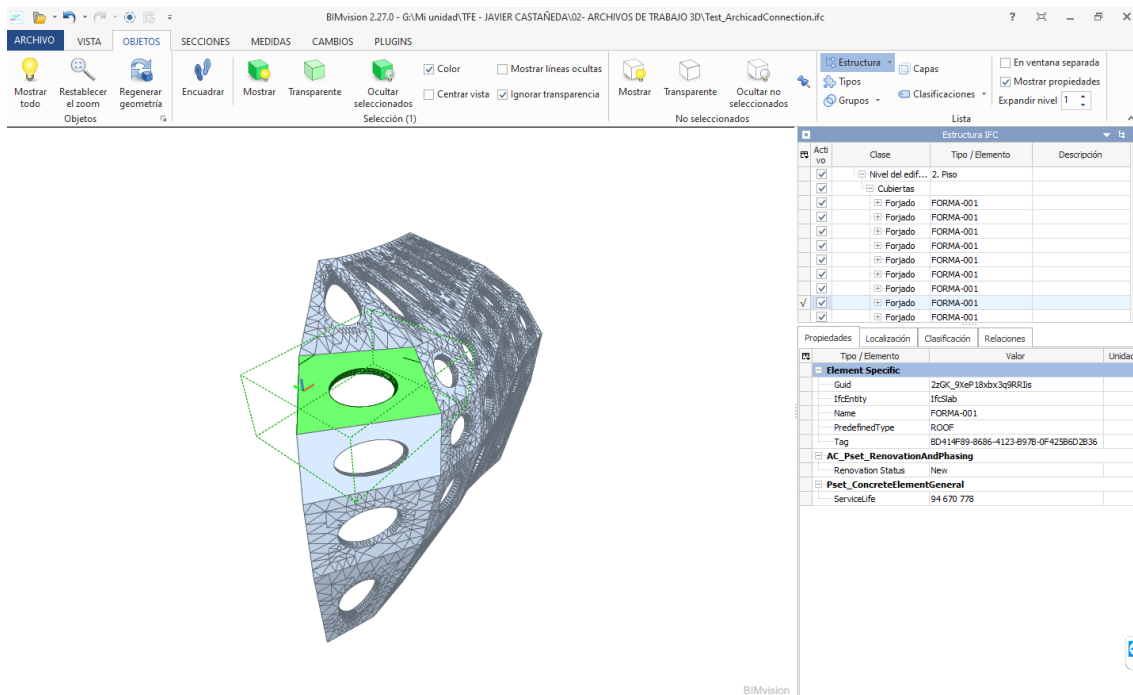


Figura 18. Flujo de trabajo #3

Una vez se tienen los archivos correspondientes, se procedió a abrir el archivo IFC con un visor de uso gratuito. Se ha usado BIMvision para verificar que la geometría 3D se haya exportado correctamente. Además, se ha verificado que se puedan leer los datos personalizados de cada elemento.



Se realizó también la prueba de lectura de cada archivo IFC producido en los 3 tipos diferentes de flujos de trabajo en otros programas BIM. En todos los casos, se pudo leer la geometría y extraer información como cantidad de elementos, área superficial y volumen. Sin embargo, los parámetros personalizados no pudieron ser leídos por los programas BIM. Esto se debe a la falta de un uso semántico común. Aunque se espera que en las futuras versiones del formato IFC se incluyan más categorías comunes.

En resumen, se evaluaron tres flujos de trabajo propuestos para la exportación de archivos IFC utilizando diferentes herramientas y plugins. Cada flujo de trabajo presenta ventajas y desventajas en términos de facilidad de uso, nivel de conocimientos requeridos y capacidad para incluir parámetros personalizados en la geometría. A pesar de las limitaciones en la lectura de parámetros personalizados en otros programas BIM, la utilización de estos flujos de trabajo puede mejorar la interoperabilidad y el intercambio de información en la industria de la construcción.

5.9 Evaluación de la solución

En este apartado, se presenta la evaluación de la solución propuesta en la investigación, la cual aborda la implementación de una metodología de trabajo colaborativo en la industria del diseño y la construcción, utilizando herramientas como OpenBIM, Rhinoceros, Grasshopper, Geometry Gym, RhinoInside y ArchiCAD Connection. La evaluación se centrará en analizar la efectividad, eficiencia y adaptabilidad de la solución en función de criterios predefinidos, así como en identificar posibles áreas de mejora y oportunidades para futuras investigaciones.

Criterios de evaluación: Para evaluar la solución propuesta, se establecerán criterios de evaluación específicos que permitan medir su desempeño en diferentes aspectos. Estos criterios pueden incluir, entre otros, la facilidad de uso, la eficiencia en la transferencia

de datos, la calidad y precisión de los modelos 3D generados, y la satisfacción de los usuarios.

Continuación, se presenta una tabla que muestra los tres flujos de trabajo y los criterios de evaluación correspondientes:

Flujos de trabajo	Facilidad de uso	Eficiencia en la transferencia de datos	Calidad y precisión de los modelos 3D	Satisfacción de los usuarios
Flujo de trabajo #1: Geometry Gym	2	2	3	4
Flujo de trabajo #2: RhinoInside	2	4	2	2
Flujo de trabajo #3: ArchiCAD Connection	5	5	5	3

Figura 19. Calificación según criterios de cada solución

Para cada flujo de trabajo, se evaluará su desempeño en una escala de 1 a 5 en función de los siguientes criterios:

Facilidad de uso: Se evaluará qué tan fácil es para los usuarios aprender y aplicar el flujo de trabajo en sus proyectos, incluyendo la integración con otras herramientas y la comprensión de la documentación y soporte técnico.

Eficiencia en la transferencia de datos: Se evaluará la rapidez y precisión con la que los flujos de trabajo pueden transferir datos entre Rhinoceros, Grasshopper y las aplicaciones BIM, así como su capacidad para manejar cambios y actualizaciones en tiempo real.

Calidad y precisión de los modelos 3D: Se evaluará la calidad y precisión de los modelos 3D generados utilizando cada flujo de trabajo, incluyendo su capacidad para crear geometrías complejas y orgánicas, así como cumplir con los estándares y requisitos específicos de la industria.

Satisfacción de los usuarios: Se evaluará la satisfacción general de los usuarios con cada flujo de trabajo, teniendo en cuenta factores como la eficacia y eficiencia de la solución, su adaptabilidad a diferentes contextos y proyectos, y el soporte técnico y la formación proporcionados.

6 Discusión

En esta sección, se examinan y analizan los resultados obtenidos de la evaluación de los tres flujos de trabajo en relación con la pregunta de investigación y la revisión bibliográfica previamente realizada. Además, se abordarán las implicaciones y relevancia de estos resultados en función de la pregunta de investigación y los objetivos propuestos.

Interpretación y análisis de los resultados: Tras evaluar los tres flujos de trabajo propuestos conforme a los criterios de evaluación, los resultados obtenidos revelan diferencias en cuanto a su desempeño en aspectos tales como facilidad de uso, eficiencia en la transferencia de datos, calidad y precisión de los modelos 3D, y satisfacción de los usuarios. Estas diferencias pueden atribuirse a las características específicas de cada flujo de trabajo, así como a las herramientas y tecnologías empleadas en su implementación.

Al cotejar los resultados con la revisión bibliográfica, se constata que ciertas tendencias y hallazgos previos en investigaciones relacionadas con el trabajo colaborativo, OpenBIM y la integración de Rhinoceros y Grasshopper en procesos BIM se reflejan en los resultados de la evaluación. Por ejemplo, la eficiencia en la transferencia de datos y la calidad y precisión de los modelos 3D generados son aspectos clave en el trabajo colaborativo y la interoperabilidad entre distintas disciplinas y software.

Discusión de las implicaciones y relevancia de los resultados: Los resultados obtenidos tienen varias implicaciones para la pregunta de investigación y los objetivos establecidos en esta investigación. En primer lugar, la comparación de los tres flujos de trabajo proporciona información valiosa sobre las ventajas y limitaciones de cada enfoque en el contexto del trabajo colaborativo y la interoperabilidad en la industria del diseño y la construcción. Esto puede ayudar a los profesionales y empresas a tomar decisiones informadas sobre qué flujo de trabajo adoptar y cómo adaptarlo a sus necesidades específicas.

Aunque las tres soluciones planteadas en este trabajo cumplen con el objetivo de intercambiar información de la envolvente a diferentes programas BIM y al formato IFC, es relevante destacar que requieren un nivel avanzado de conocimientos técnicos que permitan al usuario compartir en detalle la información más relevante para cada proyecto. Por ejemplo, con el flujo de trabajo #1 se puede tener un mayor grado de flexibilidad al insertar información particular a los elementos, pero también se tiene el riesgo de incurrir en errores del sistema al ejecutar el script con algún error. Esto produce reprocesos y falta de fiabilidad en la herramienta creada.

En cuanto al flujo de trabajo #2, se encuentra que es el más restrictivo de todos y el que presenta la mayor cantidad de problemas al transferir la información. El sistema de familias de Revit no es intuitivo al momento de generar los parámetros que acompañan la geometría, y la geometría genérica que ofrece no termina de satisfacer los requerimientos planteados al inicio de esta investigación. Aunque cabe resaltar que su sistema de interconexión con Rhinoceros es el más avanzado e intuitivo.

Con el flujo de trabajo #3, también se cumple el objetivo de compartir la información. Sin embargo, limita la categorización de la información y no permite incluir mediciones personalizadas. Esto es compensado con el propio traductor de información incorporado en el programa Archicad, que agrega esa información según el formato IFC utilizado. En

este proyecto, se ha utilizado el formato IFC 2x3, aunque a la fecha de publicación ya se encuentra disponible el formato IFC 4 que promete ser más flexible.

Los resultados de la evaluación pueden contribuir al desarrollo de nuevas soluciones y mejoras en los flujos de trabajo existentes, lo que a su vez puede mejorar la eficiencia y efectividad del trabajo colaborativo y la interoperabilidad en la industria. Por ejemplo, la identificación de áreas donde ciertos flujos de trabajo pueden tener dificultades, como la facilidad de uso o la transferencia de datos, puede impulsar el desarrollo de nuevas herramientas y técnicas para abordar estas limitaciones.

En resumen, los resultados obtenidos en la evaluación de los tres flujos de trabajo proporcionan información valiosa para la pregunta de investigación y los objetivos establecidos en esta investigación. Las implicaciones de estos resultados pueden guiar a profesionales y empresas en la adopción y adaptación de soluciones de trabajo colaborativo, así como contribuir al desarrollo de nuevas soluciones y mejoras en los flujos de trabajo existentes.

Limitaciones:

En la evaluación de los flujos de trabajo, se identificó que ninguno de ellos cuenta con elementos específicos que faciliten la inclusión de información no geométrica en el proyecto de manera sencilla. También se observó que se requiere un conocimiento profundo de la normativa para poder clasificar adecuadamente cada uno de los elementos tridimensionales en el modelo. Sin embargo, se empleó una solución simplificada utilizando la categoría IFC_BuildingElement_proxy, lo que permitió compartir y leer la información geométrica y algunas mediciones sencillas como cantidades, áreas y volúmenes.

Se sugiere que futuras investigaciones en este campo se centren en el proceso de integración del modelo IFC y en cómo este flujo de trabajo puede abordar las siguientes dimensiones de trabajo (4D, 5D y 6D). Existe un potencial considerable en este flujo de trabajo para impulsar la automatización en la lectura de datos, lo que podría facilitar la generación de partidas de presupuesto, esquemas de planificación de obra y programas de mantenimiento de edificaciones.

Al enfocarse en estos aspectos, es posible mejorar la eficiencia y la efectividad del flujo de trabajo propuesto, lo que permitiría a profesionales y empresas optimizar sus proyectos y facilitar el trabajo colaborativo. Además, la atención en el proceso de integración del modelo IFC y la incorporación de las siguientes dimensiones de trabajo en futuras investigaciones podría conducir al desarrollo de nuevas soluciones y mejoras en los flujos de trabajo existentes, lo que a su vez mejoraría la interoperabilidad y la colaboración en la industria del diseño y la construcción.

7 Conclusión

En esta investigación, se propuso y evaluó una metodología de trabajo colaborativo en la industria del diseño y la construcción, utilizando herramientas como OpenBIM, Rhinoceros, Grasshopper, Geometry Gym, RhinoInside y ArchiCAD Connection. La evaluación se centró en analizar la efectividad, eficiencia y adaptabilidad de la solución en función de criterios predefinidos, así como en identificar posibles áreas de mejora y oportunidades para futuras investigaciones.

Resumen de los hallazgos clave y conclusiones del estudio: La evaluación de los tres flujos de trabajo propuestos reveló diferencias en su desempeño en términos de facilidad de uso, eficiencia en la transferencia de datos, calidad y precisión de los modelos 3D, y satisfacción de los usuarios. Estas diferencias pueden atribuirse a las características específicas de cada flujo de trabajo, así como a las herramientas y tecnologías empleadas en su implementación. La comparación de los resultados con la revisión de la literatura permitió corroborar ciertas tendencias y hallazgos previos en la investigación relacionada con el trabajo colaborativo, OpenBIM y la integración de Rhinoceros y Grasshopper en procesos BIM.

Significado y contribución de la investigación al campo: Los resultados obtenidos de esta investigación tienen varias implicaciones para la adopción y adaptación de soluciones de trabajo colaborativo en la industria del diseño y la construcción. La información proporcionada puede guiar a profesionales y empresas en la toma de decisiones informadas sobre qué flujo de trabajo adoptar y cómo adaptarlo a sus necesidades específicas. Además, los resultados de la evaluación pueden contribuir al desarrollo de nuevas soluciones y mejoras en los flujos de trabajo existentes, mejorando así la eficiencia y efectividad del trabajo colaborativo y la interoperabilidad en la industria.

Sugerencias para futuras investigaciones y áreas de investigación adicionales: Futuras investigaciones en este campo podrían centrarse en el proceso de integración del modelo IFC y en cómo este flujo de trabajo puede abordar las siguientes dimensiones de trabajo (4D, 5D y 6D). Hay un potencial considerable en este flujo de trabajo para impulsar la automatización en la lectura de datos, lo que podría facilitar la generación de partidas de presupuesto, esquemas de planificación de obra y programas de mantenimiento de edificaciones.

Otras áreas de investigación adicionales podrían incluir el desarrollo de herramientas y técnicas para facilitar la inclusión de información no geométrica en los modelos, así como la mejora de la clasificación de elementos tridimensionales de acuerdo con las normativas aplicables. Estas investigaciones adicionales podrían proporcionar una mayor comprensión de los desafíos y oportunidades asociados con el trabajo colaborativo y la interoperabilidad en la industria del diseño y la construcción, mejorando en última instancia la eficiencia y efectividad de los flujos de trabajo propuestos y existentes.

8 Referencias bibliográficas

Becerik-Gerber, B., Bhargava, A., & Pradhan, A. (2011). An ontology approach for modeling and managing building information. *Automation in Construction*, 20(2), 126-133.

BuildingSMART. (2018). Industry Foundation Classes (IFC) overview. Recuperado de <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/>.

Burry, J., Burry, M., & Faulí, J. (2010). *Sagrada Família: Gaudí's unfinished masterpiece and its new geometry*. Columbia University Press.

Eastman, C. M., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. John Wiley & Sons.

Gómez-Soberón, J. M., Álvarez-Ramírez, J., & Villagómez-Vega, A. (2019). Analysis of factors affecting the performance of curtain wall systems using building information modeling. *International Journal of Architectural Engineering & Technology*, 16(3), 218-228.

Jin, R., Chen, W., & Wang, X. (2014). Quantitative usability evaluation of building information models for construction projects. *Automation in Construction*, 46, 44-55.

Kumar, P., Gupta, P., & Bhardwaj, A. (2013). Implementation of 3D BIM in building construction projects. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 3(8), 69-76.

Lin, Y. C., Lin, C. Y., & Wu, C. H. (2018). A BIM-based building interoperability platform for emergency management. *Automation in Construction*, 86, 13-24.

Yeh, I. C., & Chen, Y. C. (2018). Developing a BIM-based energy auditing system for existing buildings. *Sustainability*, 10(2), 459.

BuildingSMART. (2021). Information Delivery Manual (IDM). Recuperado de <https://technical.buildingsmart.org/standards/information-delivery-manual/>.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.

Kensek, K. (2014). *Building Information Modeling*. Routledge.

Kolarevic, B., & Malkawi, A. (2005). *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*. Routledge.

TCQ. (n.d.). TCQi | TCQ. Recuperado de <https://tcqinformatica.com/software-construccion-tcqi-tcq/>.

Pauwels, P., & Terkaj, W. (2016). EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. *Advanced Engineering Informatics*, 30(2), 219-229.

Schlueter, A., & Thesseling, F. (2009). Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Energy and Buildings*, 41(3), 223-232.

Solibri, Inc. (2018). Solibri Model Checker: Ensuring Quality Assurance in the BIM Process. Solibri.

Succar, B., & Kassem, M. (2015). Macro-BIM adoption: Conceptual structures. *Journal of Building Engineering*, 4, 17-25.

Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. Routledge.

United Nations. (2021). *Ciudades y Comunidades Sostenibles*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>.

Zhang, L., & El-Gohary, N. M. (2016). An ontology-based approach for integrating building information modeling (BIM) and the specification of construction products. *Automation in Construction*, 69, 148-159.

International Organization for Standardization. (2013). *ISO 16739:2013 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries*. Geneva, Switzerland: ISO.

9 Anejo 1

Detalle de modelo 3D y Parametrización de la solución.

Como parte de la investigación, se ha llevado a cabo un proceso de modelado 3D y parametrización de la envolvente de un edificio, que se adapta a los requerimientos previamente descritos. El objetivo de este anejo es proporcionar una descripción detallada del proceso seguido para la modelación y parametrización de la envolvente, con el fin de permitir un intercambio eficiente de información entre los tres flujos de trabajo propuestos y profundizar en los pasos seguidos para el diseño de las distintas soluciones planteadas.

Modelado 3D Grasshopper y Rhinoceros.

En primer lugar, se ha iniciado el proceso de modelado 3D utilizando el software Rhinoceros. Partiendo de un documento en blanco, se ha planteado de manera esquemática los volúmenes tridimensionales correspondientes a los forjados de un edificio típico de pórticos, los cuales han sido presentados a modo de referencia y no forman parte de la solución propuesta.

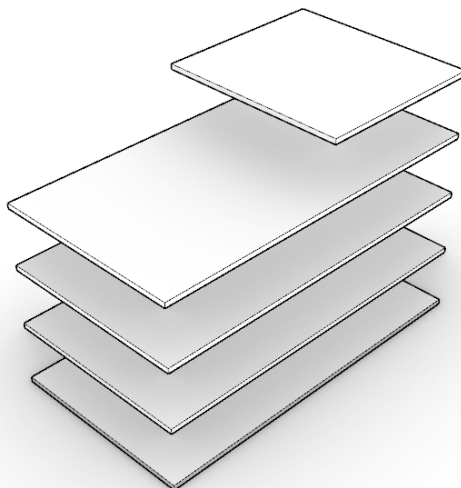


Figura 20. Forjados esquemáticos

A continuación, se ha generado una superficie inicial que sirve como base geométrica para la generación de toda la información y geometría de la envolvente, lo que ha permitido al diseñador tener mayor libertad en el momento de diseñar, ya que no estará limitado por los parámetros de generación de elementos, como muros o curtain wall, en los programas de BIM.

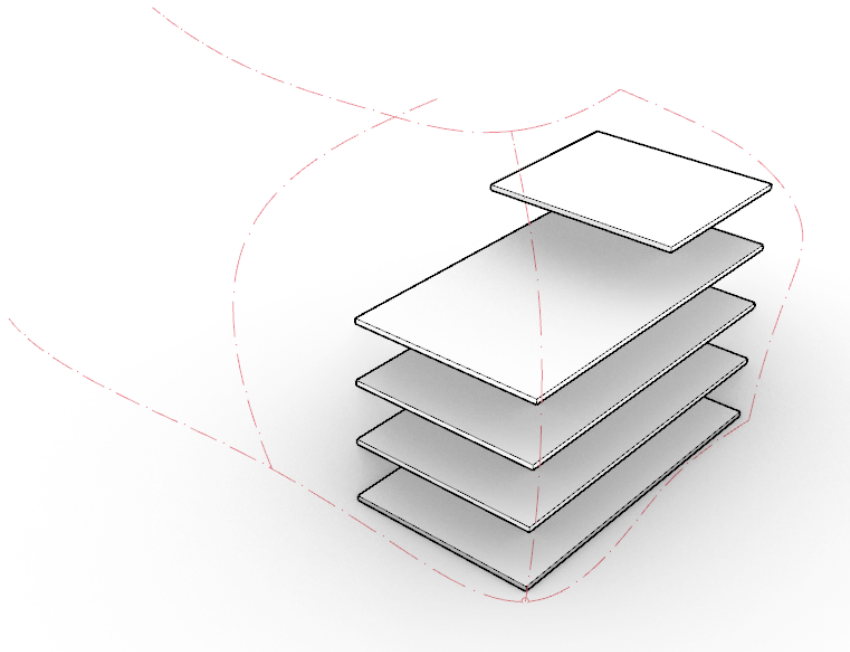


Figura 21. Curvas Base de Superficie.

La fase 1 del proceso se ha enfocado en trazar dos rieles (superior e inferior) y tres secciones transversales que definirán la curvatura de la superficie. Este es el momento donde el usuario puede incorporar su propia geometría dependiendo del proyecto en el que se esté trabajando y la envolvente que requiera diseñar.

En la fase 2, se han referenciado las curvas en Grasshopper y se ha realizado la programación para utilizar los comandos que ofrece el API de Rhino para generar una superficie a partir de curvas, utilizando el comando Sweep2Crvs.

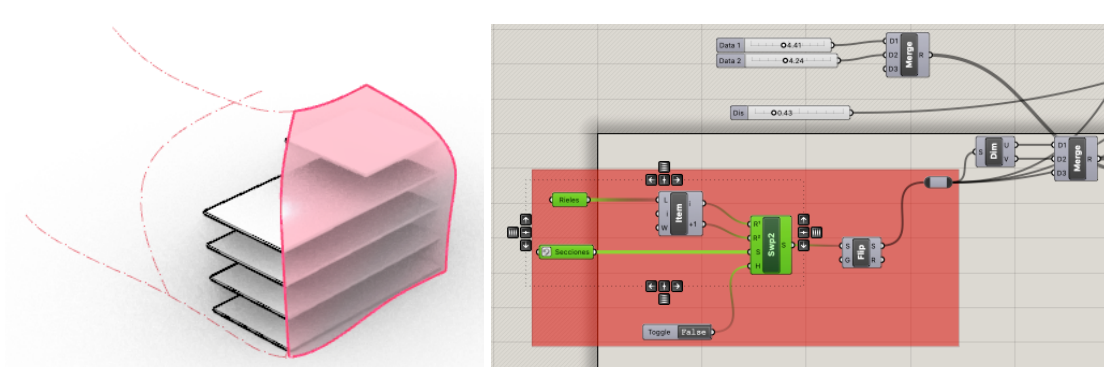


Figura 22. Programación Grasshopper.

Después de la fase 2, se ha generado una malla de puntos en las coordenadas UV de la superficie, que se ha realizado de manera meticulosa y cuidadosa para permitir la generación de la envolvente de la manera más eficiente y flexible posible. En este sentido, se ha determinado que la malla tenga celdas lo más cercanas posibles a 1.20m x 2.4m, ya que es el formato más utilizado en la producción de láminas fenólicas o de vidrio.

Aunque esta parte puede parecer sencilla, en realidad es una fase crucial que permite dar mayor flexibilidad a la solución. En el caso de una superficie simple sin curvatura o en la situación de incluir una superficie con doble curvatura, el panelizado de esta manera

permite descomponer la geometría en todo momento de tal manera que se pueda crear elementos planos. De esta forma, se logra una gran versatilidad y adaptabilidad en el diseño, lo que permite que la solución sea ajustada y personalizada para cada proyecto de manera óptima y eficiente.

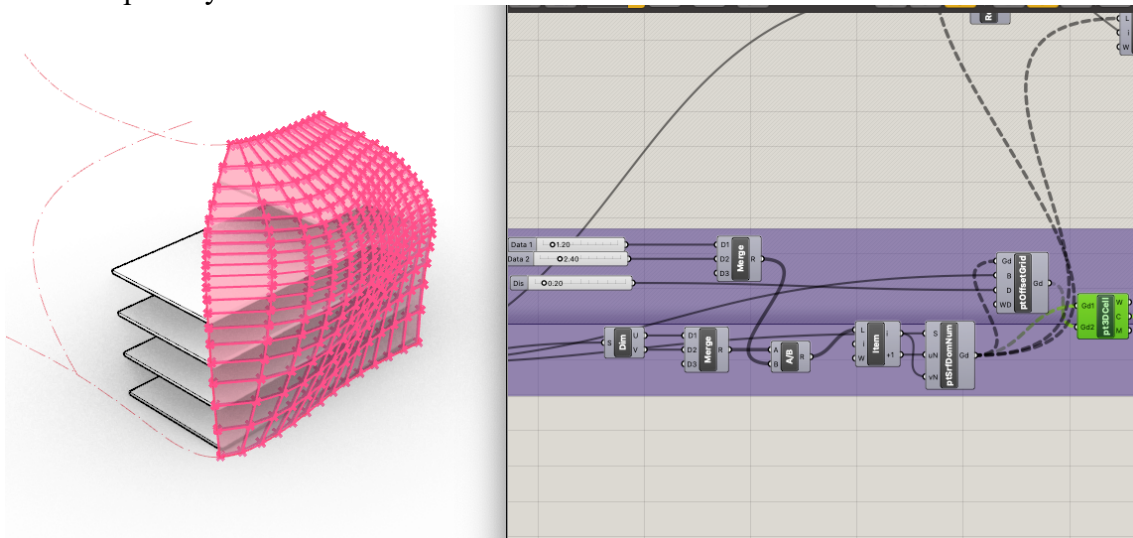


Figura 23. Penalización de superficie.

La presente programación ofrece la posibilidad de intercambiar la tipología de panel por cualquier geometría que se requiera. Para tal fin, se utiliza un componente denominado boxmorph, que permite generar múltiples variaciones de una misma tipología de elemento, lo que aumenta la flexibilidad del diseño.

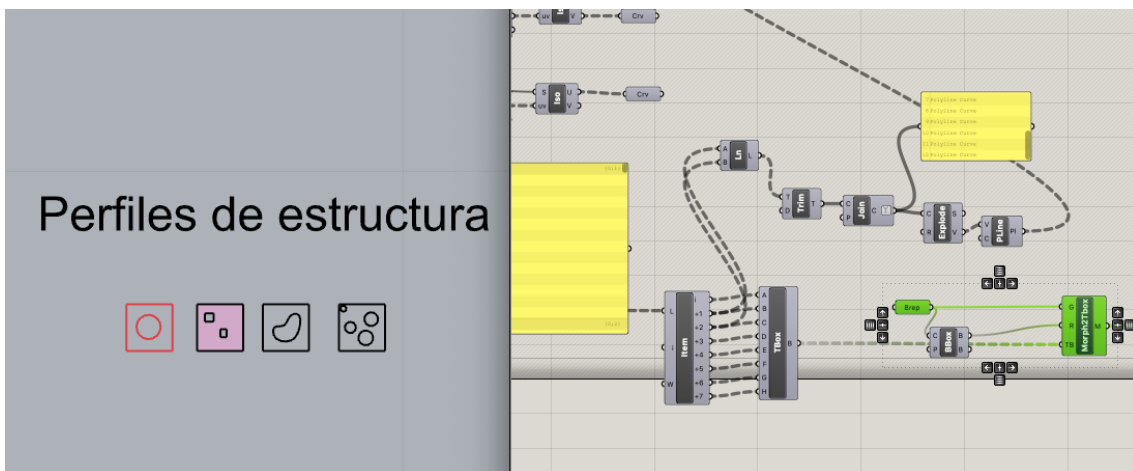


Figura 24. Opciones de cambio de panel.

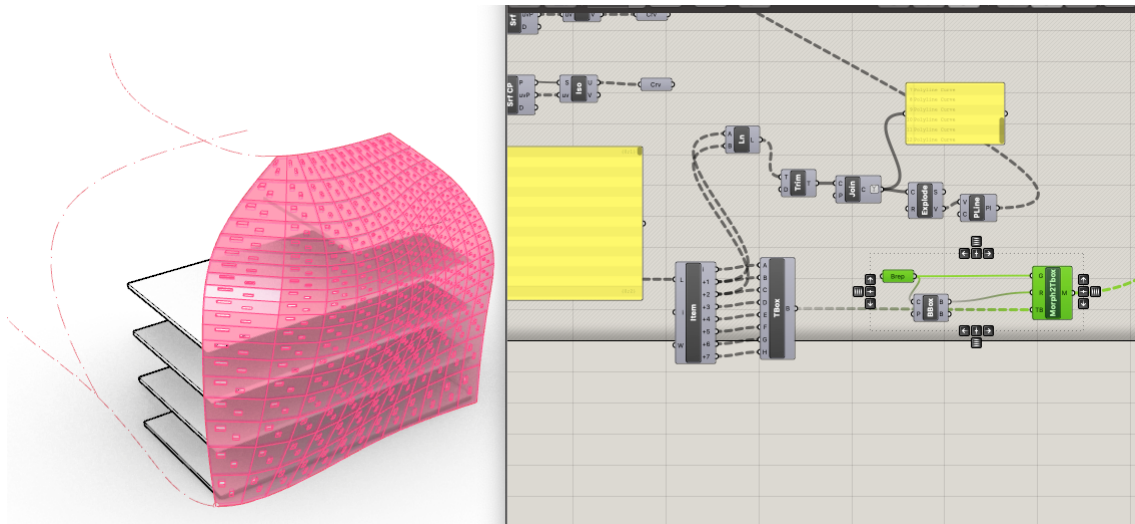


Figura 25. Adaptabilidad de la envolvente.

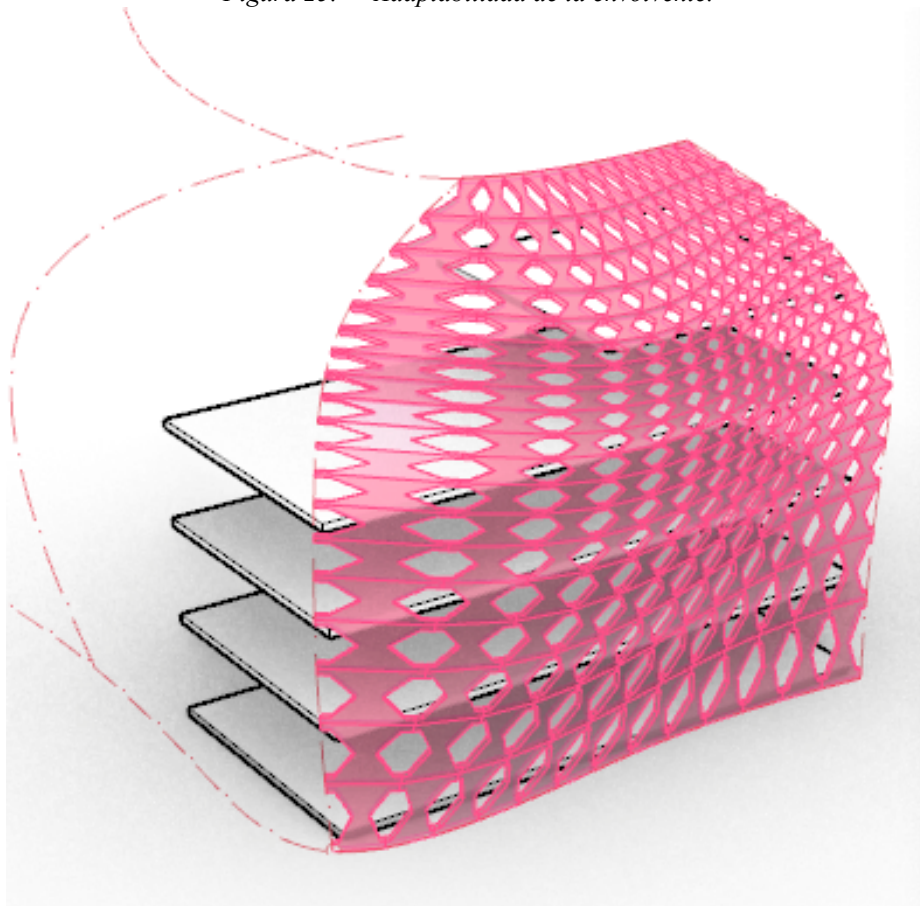


Figura 26. Uso de Paneles personalizados.

En esta etapa del proceso, se ha logrado una envolvente con 216 paneles que constituyen el recubrimiento principal, y se pueden extraer valiosos datos de ellos, como el área, las dimensiones, el perímetro de contorno, los nodos compartidos y los puntos de anclaje. La solución también permite dar grosor a la envolvente, y es importante destacar que en este punto se está recuperando y almacenando información que se actualizará de manera eficiente y confiable en caso de que se realicen cambios en el diseño de la envolvente.ç

En la siguiente fase, se extraen las curvas de referencia para la estructura principal de la superficie base. Aunque en este ejemplo se emplearán perfiles tubulares, esta programación permite seleccionar cualquier tipo de sección que se necesite. Además, se puede cambiar el plano de alineación y orientación de la sección con respecto a la normal de la superficie base referenciada en la fase 1.

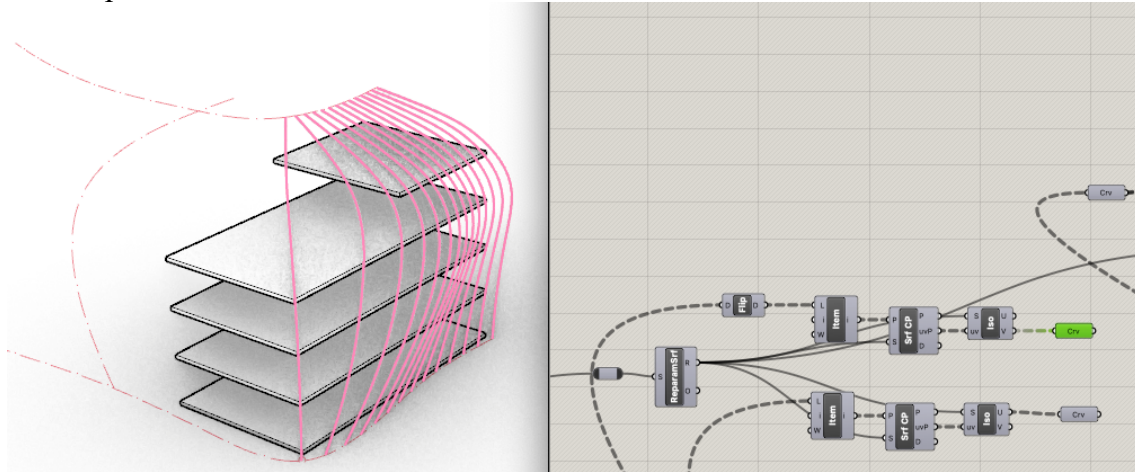


Figura 27. Curvas base de estructura

Con esta programación, se obtienen grandes avances y ventajas en el flujo de trabajo y facilidad con respecto a otros programas. Además de la programación de la perfilería estructural, se extrae la información correspondiente a los metros lineales de perfilería necesarios, el volumen y el área de pintura requerida. También se pueden extraer datos de los nodos, el número de elementos de anclaje y tornillería. Al tener el eje estructural de cada perfil, se puede exportar a otros programas especializados de cálculo estructural, aunque en este trabajo no se explora esa posibilidad.

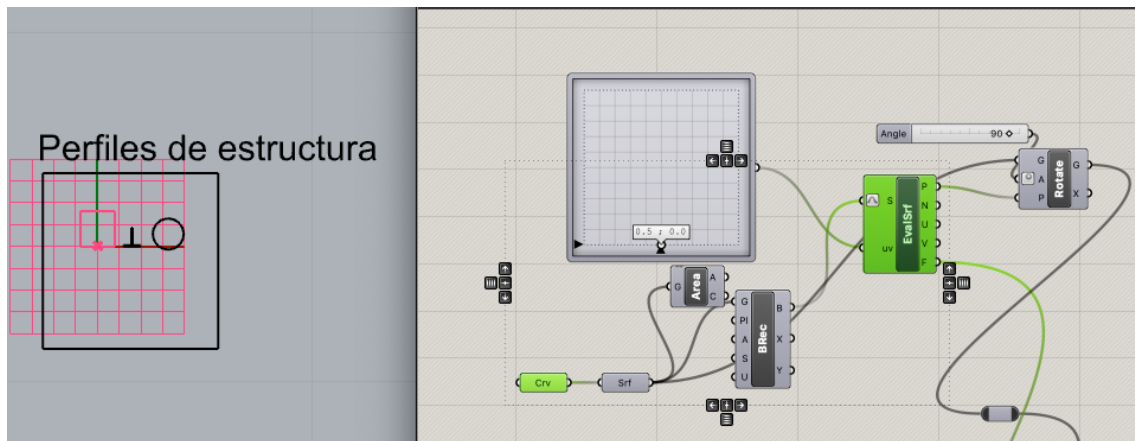


Figura 28. Selección de perfil estructural.

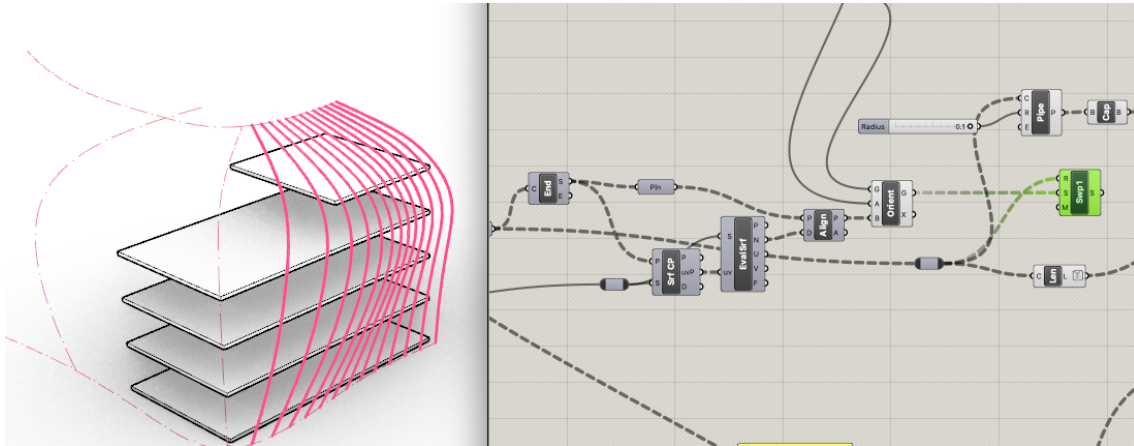


Figura 29. Representación 3D Perfilera estructural.

Finalmente, se agrupa y ordena la representación geométrica de todos los componentes de la envoltura, en ramas de información que permiten relacionar fácilmente los valores numéricos con los elementos visuales que conforman cada parte. De esta manera, se logra una solución personalizada y altamente eficiente en la representación y producción de la envoltura. En las siguientes secciones, se presentará la programación específica de cada flujo de trabajo.

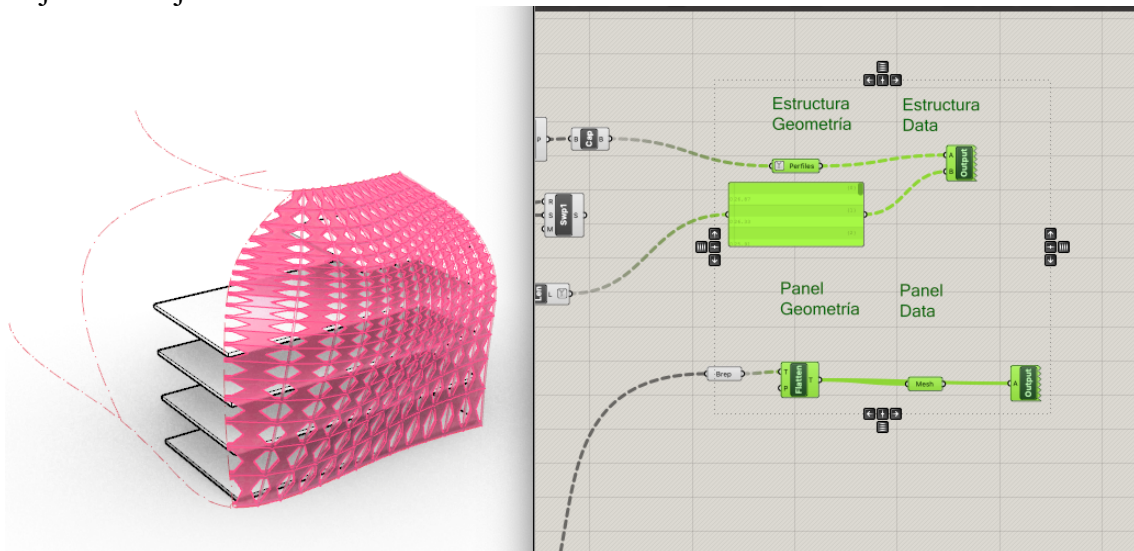


Figura 30. Data generada al final el código de geometría

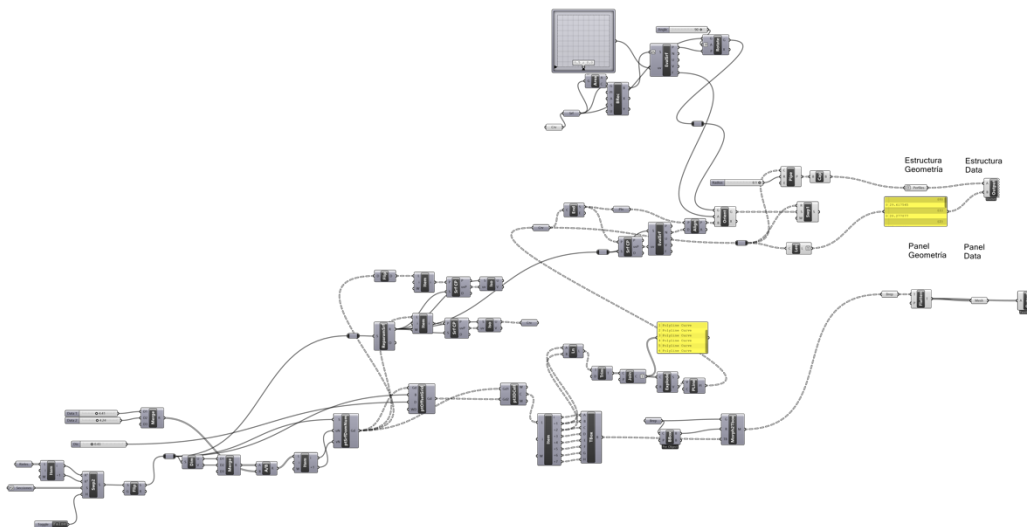


Figura 31. Código de generación de geometría e información de la envoltura paramétrica.

Flujo de trabajo #1 Rhinoceros y GeometryGym.

En el marco de la evaluación de la solución propuesta, es esencial poder exportar y compartir la información de manera ordenada para permitir su uso y comprensión en otros sistemas y programas. Con este fin, se ha utilizado en el primer flujo de trabajo el complemento Geometry Gym, el cual habilita la escritura y lectura de archivos IFC. A continuación, se presenta con minuciosidad el proceso paso a paso para programar esta solución.

El primer paso es importar la geometría y la información de nuestro código previamente explicado. Para esto se utiliza los componentes de Input_Data de Grasshopper para no generar un documento demasiado difícil de trabajar por la cantidad y complejidad de la geometría. Esto puede variar dependiendo la capacidad del sistema que se utilice.

A continuación, se debe crear el componente ggIFC Building, el cual genera el tipo de construcción según los requerimientos del uso del formato. También se debe agregar el nombre del proyecto. Estos componentes son indispensables para el funcionamiento del código.

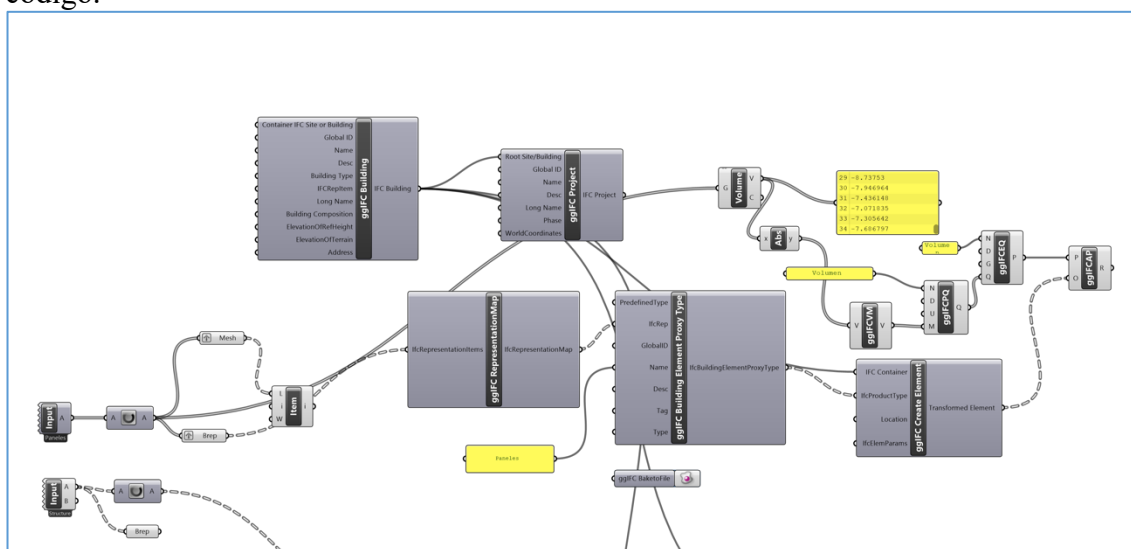


Figura 32. Generación de proyecto IFC en Rhino

Una vez creado el proyecto, ahora se debe indicar al código la representación geométrica del elemento que se quiera exportar. En este caso será la información de los paneles y los perfiles estructurales. En este punto se le puede asignar un tipo predefinido según el diccionario de elementos IFC al cuál se puede acceder desde la página de BuildingSmart. Sin embargo, para esta solución se ha decidido crear un elemento totalmente nuevo. Para esto se puede utilizar el componente Building Element Proxy type. Normalmente este tipo de elemento en otros programas no permite incluir información adicional, pero mediante este método se puede incorporar de manera automática a toda la geometría un nombre e identificador único. Se puede ver que se ha optado por nombrar como “paneles” “Estructure” a los dos grandes grupos de geometría de la envolvente.

Se repite el proceso de Asignación de parámetros a cada categoría y posteriormente la solución plantea la posibilidad de adicionar un parámetro personalizado a cada elemento. Para el ejemplo propuesto se decide incorporar un parámetro llamado “Volumen Rhino”

el cuál lo que integrará será el valor del volumen de cada panel individualmente. Este valor se propone solamente a modo de ejemplo, otras de las aplicaciones de este parámetro sería incluir valores de peso o tiempo de producción.

Una vez se haya referenciado cada uno de los elementos y la información que se requiere incorporar a cada tipo, se utiliza el comando “BakeToFile”. Este comando lo que hará será generar una rutina que escriba en el directorio donde se encuentre el archivo de Grasshopper el archivo IFC.

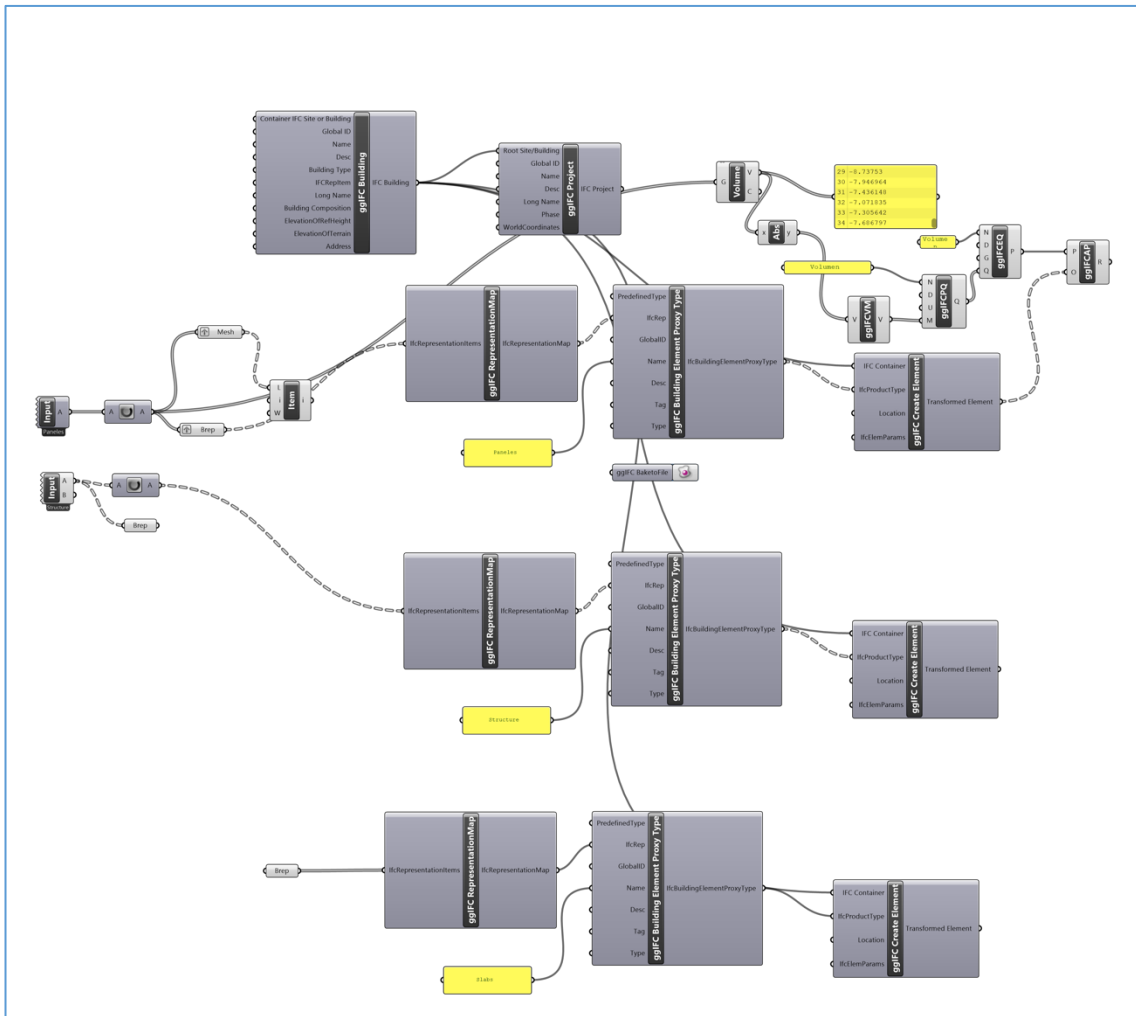


Figura 33. Imagen del código de exportación a IFC.

Una vez exportado el archivo a Rhino se realiza la prueba de lectura del archivo en un visor gratuito de IFC. En este podemos encontrar que cada uno de los elementos puede ser seleccionado individualmente y estos contienen el parámetro personalizado que se ha incluido en cada uno de ellos.

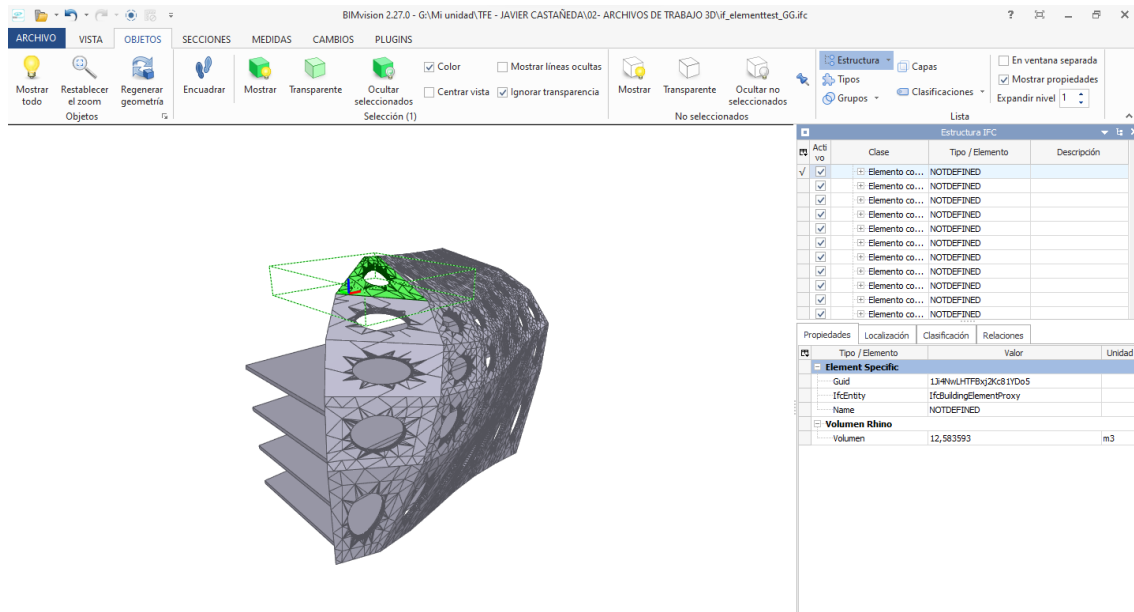


Figura 34. Prueba de visor IFC.

Una de las ventajas de este flujo de trabajo es la libertad que se tiene al aplicar parámetros personalizables a cada elemento. Sin embargo, una gran desventaja es la dificultad y poca optimización para el manejo de grandes cantidades de información. Al exportar la geometría el programa muchas veces fallaba sin razón aparente o tardaba mucho en generar el resultado esperado.

Flujo de trabajo #2 Rhinoceros y RhinoInside.

El segundo flujo de trabajo consiste en la implementación de RhinoInside, una tecnología que permite la integración de Rhino en el entorno de trabajo de Revit. Esto abre la posibilidad de utilizar todas las herramientas y opciones que ofrece Rhino, y a su vez, integrar las ventajas que ofrece Revit en la gestión de proyectos BIM. En esta sección se describirá el proceso paso a paso para programar esta solución, destacando las ventajas y desventajas que se presentan al utilizar esta tecnología.

El procedimiento en RhinoInside es bastante más sencillo que en el flujo de trabajo #1. Se utilizará el componente de DirectShape incorporado con Rhino Inside. Primero se tendrá que crear un archivo nuevo en Revit y después conectar la geometría de la envolvente según su categoría. Esta solución le pedirá al usuario seleccionar en que categoría deberá introducir la geometría dada.

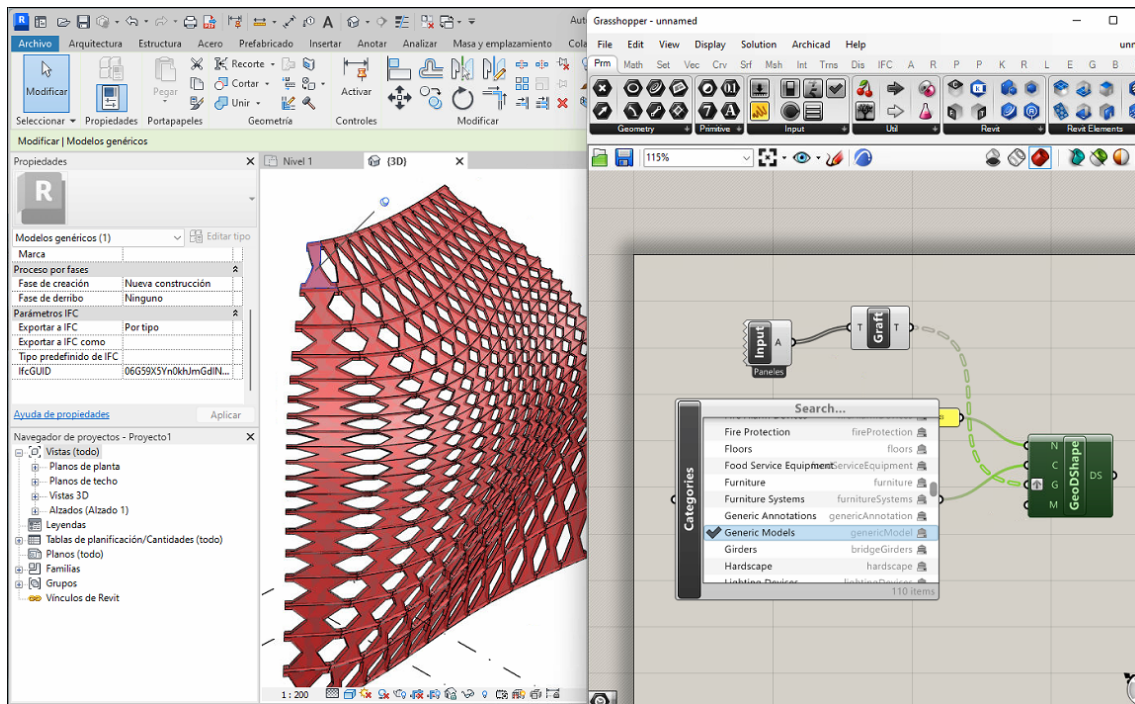


Figura 35. Conexión con RhinoInside

Una vez introducida la geometría se le dará un nombre personalizado en Grasshopper y después se tendrá que continuar desde Revit. El programa permite gestionar la categoría y parámetros IFC que se quieran incorporar a la geometría. En este flujo de trabajo no se puede añadir fácilmente parámetros personalizados. Aunque Revit incorpora todos los datos geométricos de cada elemento individual.

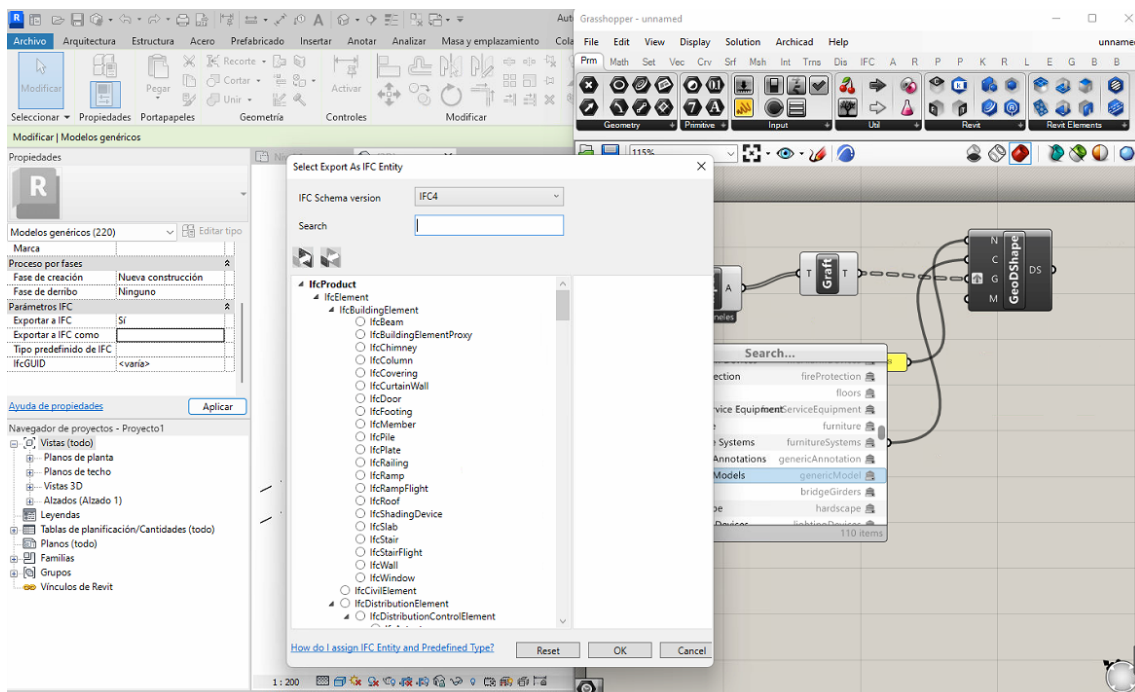


Figura 36. Selección de parámetro IFC

Se selecciona la categoría de Building Element Proxy y se procede a exportar a través de Revit.

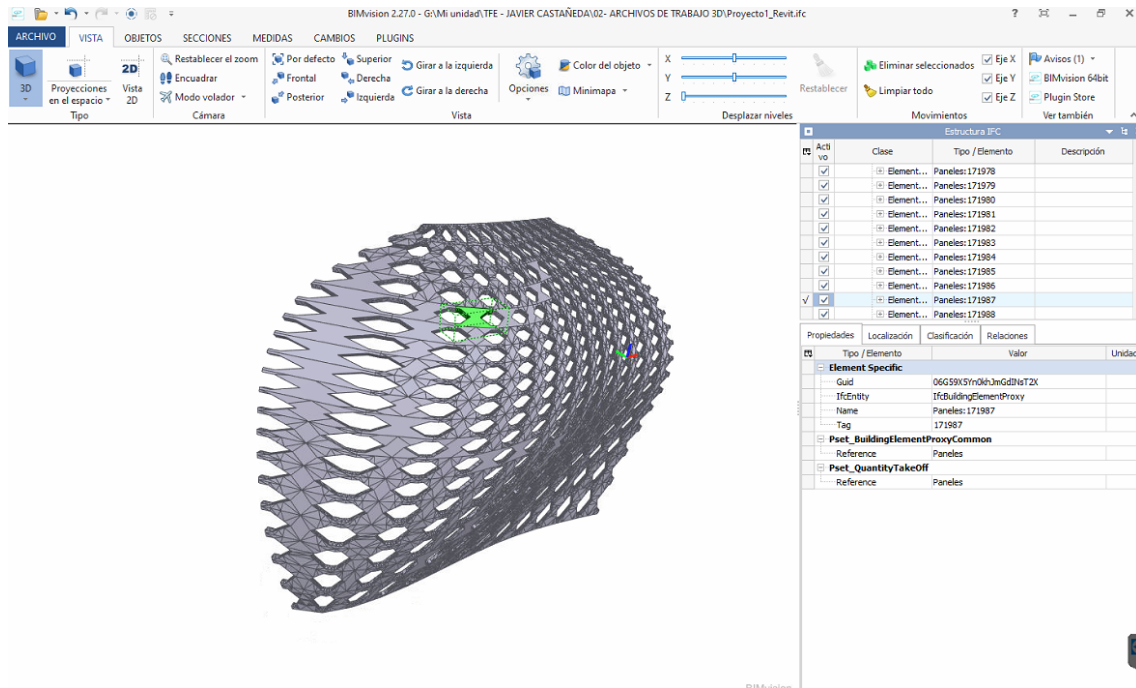


Figura 37. Comprobación con BIM visión

Al comparar los resultados en BIM visión podemos ver que la geometría se puede leer de la misma manera y de una forma mucho más optimizada. Se observa que se le ha asignado automáticamente un número de elemento a cada panel y que además se pueden recuperar los datos geométricos para mediciones.

Propiedades	Localización	Clasificación	Relaciones
Tipo / Elemento	Valor	Unidad	
Location			
Project	0001		
Storey	Nivel 2		
Top Elevation	15,822031	m	
Bottom Elevation	14,881552	m	
Global Top Elevation	15,822031	m	
Global Bottom Elevation	14,881552	m	
Geometry			
Has Own Geometry	Sí		
Children Have Geometry	No		
Global X	22,929914	m	
Global Y	16,101235	m	
Global Z	14,881552	m	
Bounding Box Length	2,339418	m	
Bounding Box Width	1,187818	m	
Bounding Box Height	0,940479	m	
Dimensions			
Area max	0,279331	m2	
Area max-1	0,143868	m2	
Thickness	0,200774	m	
Area total	4,319894	m2	
Volume	0,274194	m3	
Membership			

Figura 38. Información recuperada en BimVision

Este flujo de trabajo presenta la ventaja al usuario de hacer uso de todos los componentes automatizados de Revit y Rhinoceros. Sin embargo, se ve limitado en su flexibilidad al no poder integrar parámetros personalizables en la geometría.

Flujo de trabajo #3 Rhinoceros y Archicad Connection.

En este tercer flujo de trabajo se explora la integración de Rhinoceros y Archicad Connection para la exportación de información detallada de la envolvente y su posterior importación en Archicad. Esta integración permite una transferencia de información más eficiente y detallada que puede ser utilizada en el modelado y diseño de proyectos arquitectónicos. A continuación, se detallará el proceso paso a paso para lograr esta integración y transferencia de información.

La solución creada en este flujo de trabajo es la más eficiente de todas, ya que integra la facilidad de conexión que tiene Revit Inside, pero permite incrustar información personalizada en los elementos.

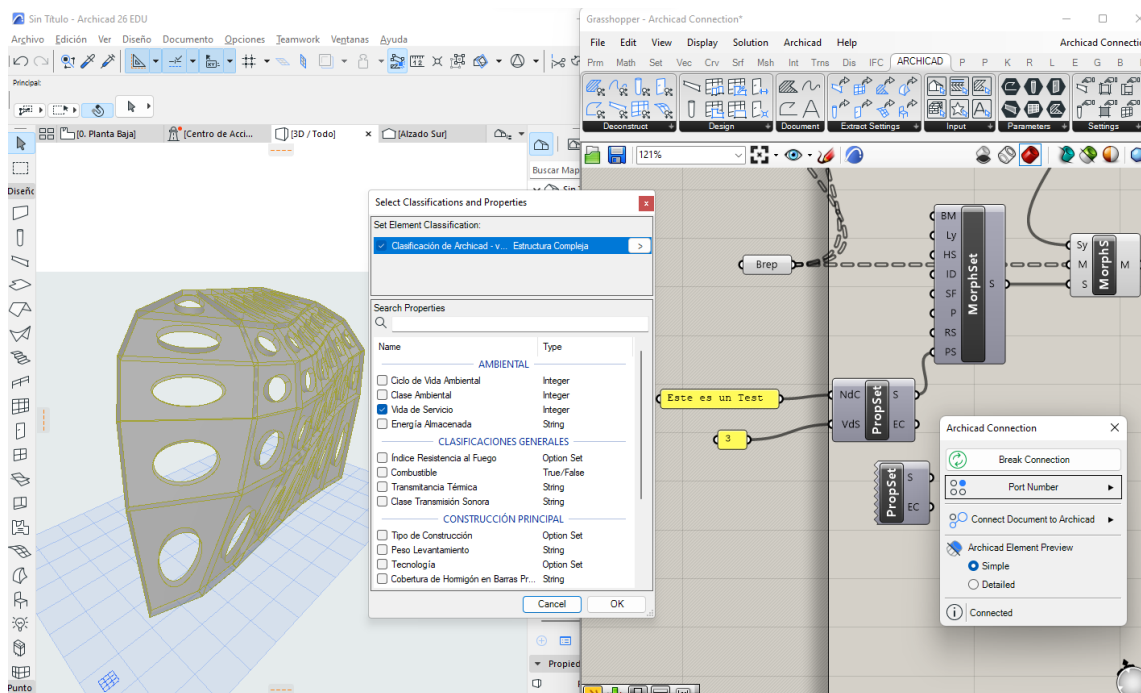


Figura 39. Programación específica RhinoInside.

La programación es muy sencilla, sólo se debe referenciar la geometría creada previamente y posteriormente iniciar la conexión con Archicad abierto. Se utilizará el componente Morph y este mismo permitirá añadir información en diferentes niveles directamente desde Rhino. Permite también incluir datos previamente preparados como lo son el ciclo de vida de servicio, combustible, valores de transmitancia térmica y demás.

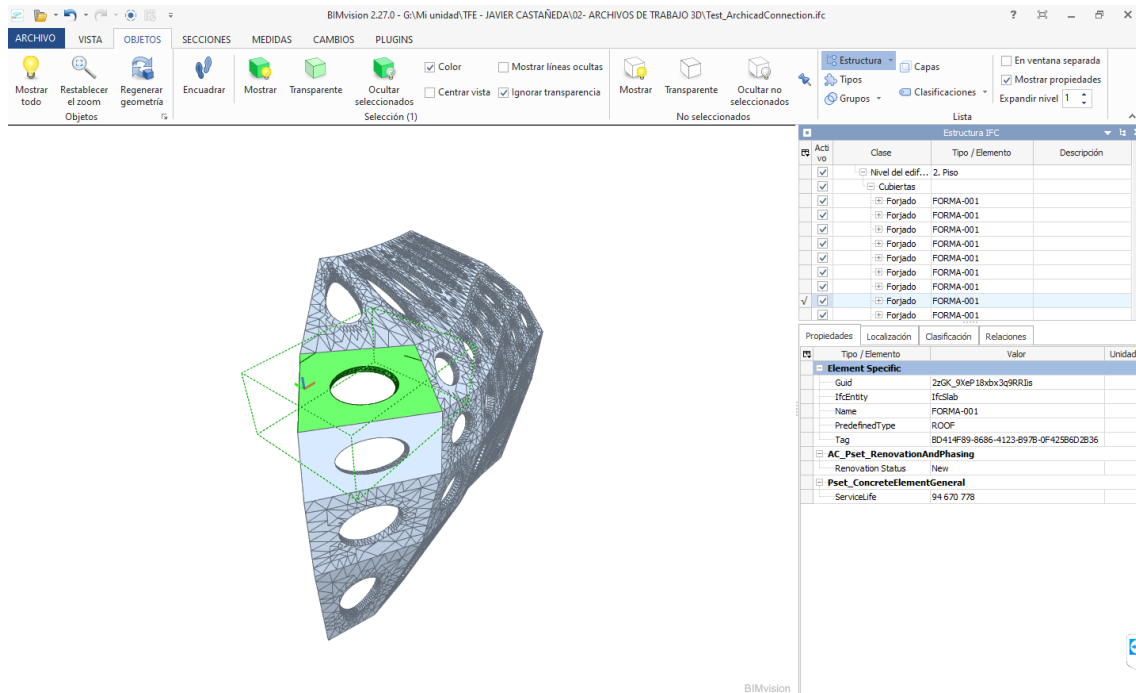


Figura 40. Comprobación IFC

Al exportar a IFC se puede comprobar que la geometría llega ordenada y que contiene los valores personalizados. De tal manera esta herramienta permite el mayor grado de optimización en el proceso de paso de información entre herramientas.

En conclusión, la creación de estos tres flujos de trabajo para la generación de una envolvente compleja con estructura de soporte ha permitido una integración sin fisuras entre diferentes programas y sistemas. La combinación de Rhinoceros, Grasshopper, Geometry Gym, RhinoInside y ArchicadConnection ha permitido un intercambio eficiente de información, tanto geométrica como paramétrica, entre los diferentes programas y ha permitido una mayor flexibilidad en la elección de la tipología de panel y la sección estructural. Además, la capacidad de exportar y compartir la información de manera ordenada ha permitido una mayor facilidad en la gestión de cambios y ha hecho posible el uso de la información en otros sistemas y programas especializados en el cálculo estructural y la simulación energética. En definitiva, la creación de estos flujos de trabajo ha permitido una mayor eficiencia y flexibilidad en el proceso de diseño y construcción de la envolvente, lo que se traduce en una mejora en la calidad final del proyecto.