



UNIVERSIDAD DE PLAYA ANCHA
FACULTAD DE ARTE
DEPARTAMENTO DE ARTE Y DISEÑO
CARRERA DIBUJANTE PROYECTISTA

**"Exploración del Modelado Paramétrico como Herramienta
Proyectual en un Entorno BIM: Análisis en Proyectos de Pequeña
Escala con Grasshopper y Tekla Structures"**

Trabajo de Título para optar al Título de Dibujante Proyectista

Autor: Gabriel Alfredo Acuña Badilla

Profesor: Mag. Néstor Fabián Currilem González.

Valparaíso, Chile

Año 2024

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINAS
Índice de Contenidos	I
Resumen	II
Abstract	III
Introducción	IV

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SUS OBJETIVOS

1.1. Planteamiento del problema.....	12
1.1.1. Interrogante de Investigación.....	13
1.1.2. Justificación del estudio.....	14
1.2. Objetivos de la investigación.....	15
1.2.1. Objetivo General.....	15
1.2.2. Objetivos Específicos.....	15
Objetivo Específico N°1.....	15
Objetivo Específico N°2.....	15
Objetivo Específico N°3.....	16
Objetivo Específico N°4.....	16
1.3. Problemas y Limitaciones.....	16

1.4. Impacto esperado.....	17
-----------------------------------	-----------

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción al Marco Teórico.....	20
--	-----------

2.2. Building Information Modeling (BIM).....	20
--	-----------

2.2.1. Definición de BIM.....	20
-------------------------------	----

2.2.2. Aplicación de BIM en la Ingeniería Estructural.....	22
--	----

2.2.3. Beneficios y Desafíos de BIM.....	25
--	----

2.3. Modelado Paramétrico.....	29
---------------------------------------	-----------

2.3.1. Definición y Principios del Modelado Paramétrico.....	29
--	----

2.3.2. Modelado Paramétrico y Diseño Computacional.....	41
---	----

2.3.3. Ventajas del Modelado Paramétrico en Entornos BIM.....	50
---	----

2.3.4. Uso de Grasshopper en Modelado Paramétrico.....	56
--	----

2.3.5. Teoría de la Modelación y Diseño en Grasshopper para Estudios de Caso.....	58
--	----

2.4. Tekla Structures como Herramienta de Modelado BIM.....	72
--	-----------

2.4.1. Características Principales de Tekla Structures.....	72
---	----

2.4.2. Ventajas de Tekla en la Ingeniería Estructural.....	73
--	----

2.4.3. Interacción entre Tekla y Grasshopper.....	74
---	----

2.5. Impacto del Modelado Paramétrico: Eficiencia y Adaptabilidad.....	77
---	-----------

2.5.1. Eficiencia en el Diseño Estructural.....	77
---	----

2.5.2. Adaptabilidad ante Cambios de Diseño.....	78
2.6. Relevancia del Modelado Paramétrico en la Formación de Dibujantes Projectistas.....	80
2.6.1. Importancia en la Educación del Dibujante Projectista.....	81
2.6.2. Ventajas Competitivas en el Mercado Laboral.....	81
CAPÍTULO III: MARCO OPERACIONAL	
3.1. Diseño de investigación y tipo de estudio.....	84
3.2. Universo de estudio.....	84
3.3. Tipo de Muestra.....	84
3.4. Método de recogida de datos.....	85
3.5. Instrumento utilizado.....	85
CAPÍTULO IV: PROCESAMIENTO DE DATOS	
4.1. Introducción.....	88
4.1.1. Criterios de Selección de Proyectos.....	88
4.1.2. Metodología de Análisis.....	90
4.1.3. Indicadores de Evaluación.....	92
4.2. Análisis de Proyectos.....	95
4.2.1. Proyecto 1: Diseño Paramétrico de una Columna con Placa de Anclaje.....	95
4.2.2. Proyecto 2: Diseño Paramétrico de una Cercha Reticulada.....	98

4.2.3. Proyecto 3: Diseño Paramétrico de una Nave Industrial de Dos Aguas.....	102
4.3 Comparación de Resultados.....	106
4.3.1 Resultados del Modelado Paramétrico.....	106
4.3.2 Resultados del Modelado Tradicional.....	106
4.3.3 Evaluación Comparativa.....	107
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	
5.1. Resumen de hallazgos.....	111
5.2. Recomendaciones para futuros estudios.....	112
5.3. Conclusiones finales.....	114
CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA	
6.1. Bibliografía.....	120
6.2. Linkografía.....	121

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo analizar cómo el modelado paramétrico puede ser beneficioso en un entorno BIM. Para ello, se utilizaron herramientas como Tekla Structures y Grasshopper de Rhino en proyectos pequeños, en donde el principal objetivo es demostrar que estas tecnologías pueden ser de gran ayuda en el modelado de proyectos estructurales dentro del trabajo de los Dibujantes Proyectistas.

En el Capítulo I, se presenta el contexto general y se identifica el problema central de este estudio: la necesidad de mejorar la precisión y adaptabilidad en los procesos de diseño estructural. Además, se explican los objetivos específicos, como explorar cómo aplicar el modelado paramétrico, definir criterios de flexibilidad y abordar las dificultades asociadas a su aprendizaje.

El Capítulo II aborda los conceptos clave de Building Information Modeling (BIM) y del modelado paramétrico. Aquí se exploran sus fundamentos, aplicaciones prácticas, ventajas y limitaciones. Además, se hace un análisis de herramientas como Tekla Structures y Grasshopper, destacando su papel en la ingeniería estructural y su relevancia para la formación de los Dibujantes Proyectistas.

En el Capítulo III, se detalla la metodología utilizada. Este capítulo explica cómo se seleccionaron los proyectos de estudio, los indicadores empleados para evaluar los resultados y el diseño general de la investigación. Gracias a esta metodología, fue posible comparar las ventajas del modelado paramétrico versus el método tradicional.

El Capítulo IV presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos en casos prácticos. Estos estudios comparan la implementación

del modelado paramétrico con el tradicional en proyectos específicos. Los datos muestran que el modelado paramétrico permite una mayor flexibilidad ante cambios, tiempos de diseño más cortos y una reducción considerable de errores.

Por último, en el Capítulo V, se resumen las conclusiones más importantes. Se concluye que el modelado paramétrico es útil para proyectos y que es escalable a proyectos de mayor envergadura. Además, se sugieren recomendaciones para integrar estas herramientas en la formación académica y en la práctica profesional de los Dibujantes Proyectistas.

ABSTRACT

This research aims to analyze how parametric modeling can be beneficial in a BIM environment. To achieve this, tools such as Tekla Structures and Grasshopper from Rhino were applied to small-scale projects. The main objective is to demonstrate that these technologies can significantly aid in the structural modeling tasks performed by Drafter Designers.

In Chapter I, the general context is presented, and the central problem of the study is identified: the need to improve precision and adaptability in structural design processes. Additionally, the specific objectives are outlined, including exploring how to apply parametric modeling, defining flexibility criteria, and addressing the challenges associated with learning this methodology.

Chapter II covers the key concepts of Building Information Modeling (BIM) and parametric modeling. It explores their fundamentals, practical applications, advantages, and limitations. Furthermore, tools such as Tekla Structures and Grasshopper are analyzed, highlighting their role in structural engineering and their importance in the training of Drafter Designers.

In Chapter III, the methodology used in the study is detailed. This chapter explains how the projects were selected, the indicators employed to evaluate results, and the overall research design. Through this methodology, it was possible to compare the advantages of parametric modeling with traditional methods.

Chapter IV provides a detailed analysis of the results obtained through practical case studies. These studies compare the implementation of parametric modeling with traditional approaches in specific projects. The data show that parametric modeling allows for greater flexibility when

accommodating changes, shorter design times, and a significant reduction in errors.

Finally, in Chapter V, the most important conclusions are summarized. It is concluded that parametric modeling is not only useful for small-scale projects but also scalable to larger ones. Additionally, recommendations are made for integrating these tools into the academic training and professional practice of Drafter Designers.

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción ha experimentado transformaciones significativas a lo largo de la historia, especialmente en la forma de representar y gestionar los proyectos. Desde los primeros planos trazados manualmente hasta la sofisticación de los modelos digitales actuales, la representación gráfica ha evolucionado de ser un medio estático a convertirse en un proceso dinámico e integral. En este contexto, la metodología Building Information Modeling (BIM) ha revolucionado la industria, permitiendo una gestión más eficiente y colaborativa de los proyectos mediante la integración de datos y modelos computacionales.

La tecnología actual ofrece herramientas avanzadas como el modelado paramétrico, que permite representar, proyectar y analizar diferentes escenarios dentro del mismo modelo. Esta capacidad ha transformado la representación gráfica en un recurso estratégico para optimizar tiempos, reducir errores y mejorar la adaptabilidad en los proyectos de construcción. Asimismo, las proyecciones de la industria apuntan hacia una mayor automatización y personalización de los modelos computacionales, consolidando el papel del diseño paramétrico como una pieza clave en el futuro de la construcción.

En este marco de transformación, el Dibujante Proyectista de la Universidad de Playa Ancha desempeña un rol esencial al enfrentar los desafíos tecnológicos que plantea la industria debido a su formación técnica y conocimientos en herramientas de modelado. Sin embargo, la constante evolución de las tecnologías exige que este perfil profesional se adapte y amplíe sus competencias, incorporando nuevas metodologías como el modelado paramétrico y las herramientas BIM.

Esta tesis busca contribuir al desarrollo profesional del Dibujante Proyectista mediante el análisis y la aplicación del modelado paramétrico en un entorno BIM. A través de estudios de caso, se pretende explorar los beneficios y desafíos de esta metodología, proporcionando ejemplos prácticos que demuestren cómo estas herramientas pueden mejorar los procesos técnicos, optimizar tareas y fortalecer las habilidades profesionales. Con ello, se espera que los proyectistas utilicen el modelado paramétrico como una herramienta clave para destacar como profesionales eficientes, capaces de enfrentar retos tecnológicos, aportar soluciones prácticas y responder a las exigencias de un mercado laboral que valora la innovación y la proactividad en el diseño estructural.

1. CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SUS OBJETIVOS

1.1. Planteamiento del problema.

La industria de la construcción demanda que los modelos BIM sean cada vez más precisos y eficientes. Paralelamente, los avances tecnológicos ofrecen soluciones constantemente actualizadas para satisfacer estas necesidades. Sin embargo, muchas oficinas de diseño continúan utilizando métodos tradicionales y muestran resistencia al cambio tecnológico, lo que genera limitaciones frente a las innovaciones del sector. Entre los principales desafíos se encuentran la gestión de cambios rápidos en los diseños, la reducción de errores en la documentación (como los dibujos) y la optimización de recursos en proyectos complejos. En este contexto, el Dibujante Proyectista enfrenta una carga considerable al tener que ajustar los modelos manualmente. Como señala Eastman et al. (2011), "los métodos tradicionales de diseño y documentación son propensos a errores y requieren una considerable cantidad de tiempo para coordinar y actualizar los cambios".

El modelado BIM ha entregado un gran aporte para las soluciones descritas, sin embargo las intervenciones manuales y tareas repetitivas siguen siendo parte del método tradicional para enfrentar estos problemas. En este contexto, el modelado paramétrico surge como una solución innovadora que permite crear modelos dinámicos y adaptativos dentro del entorno BIM. Con las herramientas como Tekla Structures para el modelado BIM y Grasshopper de Rhino para la parametrización, los dibujantes proyectistas pueden realizar ajustes rápidos y estandarizar modelos, reduciendo errores y mejorando la eficiencia.

Este estudio se centra en explorar la aplicabilidad y beneficios del modelado paramétrico tomando como ejemplos proyectos de pequeña

escala. El uso de Tekla y Grasshopper pretende optimizar el trabajo del dibujante proyectista, permitiéndole responder rápidamente a cambios de diseño sin necesidad de rehacer el modelo desde cero, ahorrando tiempo y aumentando la precisión de los entregables. Sin embargo, se reconocen los desafíos que implica el manejo de estas herramientas.

Para los dibujantes proyectistas en formación en la Universidad de Playa Ancha, este estudio puede servir como una referencia introductoria para incorporar el modelado paramétrico en su labor, incrementando sus aptitudes y conocimientos para competir en el mercado laboral. Además, se busca demostrar el potencial de esta metodología no solo en proyectos pequeños, sino también en su escalabilidad para optimizar proyectos de mayor envergadura, contribuyendo al desarrollo tecnológico en el ámbito de la construcción. Sacks et al. (2018) afirman que "la implementación efectiva de BIM y el modelado paramétrico pueden transformar la práctica del diseño, mejorando la calidad y reduciendo los tiempos de entrega".

La implementación del modelado paramétrico en un entorno BIM representa una oportunidad para que el Dibujante Proyectista aborde los desafíos de eficiencia y precisión en su labor. Sin embargo, la efectividad de esta metodología en proyectos aún no está completamente clara, lo cual lleva a plantear la interrogante central de esta investigación:

1.1.1. Interrogante de Investigación.

¿Cómo puede el uso del modelado paramétrico en un entorno BIM, mediante Tekla Structures y Grasshopper de Rhino, potenciar al dibujante proyectista en términos de eficiencia, adaptabilidad y precisión en su trabajo?

1.1.2. Justificación del estudio.

La industria de construcción actualiza constantemente sus tecnologías para buscar la eficiencia, sobre todo en la fase de diseño. El dibujante proyectista tiene un rol importante de creación de documentos y maquetas electrónicas como parte de la cadena productiva, y es aquí en donde el modelado paramétrico ofrece la oportunidad de actualizar y mejorar profundamente su práctica en un entorno BIM. Este estudio está enfocado en mostrar cómo estas tecnologías, especialmente Tekla Structures y Grasshopper de Rhino, pueden convertirse en un recurso invaluable para mejorar la calidad, flexibilidad y eficiencia de su trabajo.

La combinación de Tekla Structures como herramienta BIM y Grasshopper como plataforma paramétrica permite a los proyectistas responder con agilidad a cambios en el diseño sin recurrir a procesos repetitivos y exhaustivos. En este contexto, la investigación busca demostrar que estas herramientas optimizan el tiempo de diseño, reducen los errores de modelamiento y facilitan la estandarización, ofreciendo así una ventaja competitiva y profesional en un mercado en constante evolución.

Además, este estudio incorpora el análisis de transferibilidad como parte de su validación cualitativa, lo que permite que los resultados obtenidos puedan ser aplicados en contextos similares dentro de la industria. Al proporcionar descripciones detalladas de los casos de estudio y sus resultados, se facilita que otros profesionales o estudiantes evalúen la posibilidad de adaptar las metodologías presentadas a sus propios proyectos. De esta manera, la investigación aborda un contexto específico y amplía su impacto hacia una audiencia más diversa, lo que refuerza la aplicabilidad de la transferencia como criterio de validez (Figueroa Lizarzaburu, Lizarzaburu Mora, & Valarezo Sánchez, 2015).

En última instancia, esta investigación busca beneficiar a los

estudiantes y futuros profesionales de la Universidad de Playa Ancha y otros interesados en el campo, brindándoles una base comparativa para comprender el impacto positivo de las herramientas paramétricas y su potencial de integración en procesos existentes, contribuyendo al avance de la industria hacia una construcción más ágil.

1.2. Objetivos de la investigación.

1.2.1. Objetivo General.

Desarrollar un modelo experimental para explorar los beneficios y desafíos de la implementación del modelado paramétrico en un entorno BIM, utilizando Tekla Structures para desarrollar proyectos pequeños y específicos, evaluando su impacto en la eficiencia, adaptabilidad y precisión en el diseño.

1.2.2. Objetivos Específicos.

Objetivo Específico N°1.

Caracterizar la eficiencia de la metodología de modelado paramétrico en proyectos de pequeña escala en Tekla Structures y Grasshopper de Rhino.

Objetivo Específico N°2

. Identificar criterios de adaptabilidad de modelos paramétricos en proyectos individuales frente a cambios simulados.

Objetivo Específico N°3.

Describir criterios de precisión en el modelado de proyectos pequeños creados con modelos paramétricos.

Objetivo Específico N°4.

Identificar los principales desafíos y limitaciones personales al aprender la metodología del modelado paramétrico en Tekla Structures y Grasshopper.

1.3. Problemas y Limitaciones.

Esta investigación enfrenta varios desafíos y limitaciones que influyen en el alcance y la profundidad de los análisis, así como en los resultados y conclusiones. Estas restricciones están relacionadas con el tiempo, los recursos tecnológicos y la selección de software, lo que afecta directamente la implementación del modelado paramétrico en un entorno BIM. A continuación, se describen los puntos más relevantes:

El tiempo limitado para aprender herramientas avanzadas de modelado paramétrico, como Tekla Structures y Grasshopper de Rhino, dificulta adquirir conocimientos profundos durante el tiempo disponible para la investigación. Estas herramientas tienen una curva de aprendizaje bastante alta, ya que requieren tanto dominar sus funciones como comprender los principios del modelado paramétrico. Por ello, el estudio se centra en aplicaciones básicas e intermedias, dejando de lado usos más complejos.

Otro punto clave es el enfoque en proyectos de pequeña escala. Debido a los recursos disponibles y las limitaciones de tiempo, el análisis se

restringe a proyectos más manejables. Aunque esto permite trabajar en condiciones controladas, los resultados podrían no aplicarse de forma directa a proyectos de mayor envergadura o complejidad.

En cuanto al software utilizado, este estudio se enfoca exclusivamente en Tekla Structures y Grasshopper de Rhino, dejando fuera otras herramientas potencialmente relevantes. Este sesgo es intencional y tiene como objetivo encapsular el estudio hacia una aplicabilidad práctica y conocida para los Dibujantes Proyectistas. El enfoque se centra en el diseño estructural, que es el sector con mayor porcentaje de desarrollo laboral para los egresados de la Universidad de Playa Ancha. Este enfoque busca garantizar que los resultados obtenidos sean relevantes para las actividades más comunes en este ámbito profesional.

Cabe destacar que este estudio no se plantea como una guía práctica, ya que carece de una estructuración clara para la incorporación de un programa formativo. La implementación de un programa educativo requiere un análisis más profundo del método paramétrico, considerando las múltiples variables asociadas a las herramientas paramétricas y su amplia gama de aplicaciones. Este tipo de investigación escapa al alcance de esta tesis y podría ser abordado en futuros estudios que exploren con mayor detalle la integración de estas metodologías en el ámbito educativo.

Se decidió trabajar bajo estas limitaciones para buscar optimizar los recursos y el tiempo disponibles, garantizando un análisis coherente y ajustado a los objetivos de la investigación.

1.4. Impacto esperado.

Este estudio sobre el modelado paramétrico en un entorno BIM busca generar un impacto positivo en la formación de los Dibujantes Proyectistas de la Universidad de Playa Ancha. Uno de los principales objetivos es introducir

herramientas como Tekla Structures y Grasshopper de Rhino, ayudando a los estudiantes a familiarizarse con estas tecnologías que son valoradas en el mercado laboral. Esto permitirá sentar una base técnica sólida para que puedan explorar y aplicar estas metodologías en su trabajo profesional.

Aunque este estudio no pretende ser una propuesta directa para cambiar el plan de estudios, sí podría servir como un punto de partida para considerar futuras actualizaciones. Estas herramientas y técnicas representan un avance importante que, con el tiempo, podría integrarse en la enseñanza formal para preparar mejor a los proyectistas frente a las demandas de la industria.

Además, el trabajo busca fomentar en los estudiantes una actitud innovadora y proactiva. El modelado paramétrico facilita la automatización de tareas repetitivas y permite abordar los proyectos con más eficiencia y flexibilidad. Al conocer estas herramientas, los futuros dibujantes proyectistas podrán responder mejor a los cambios y aportar soluciones más dinámicas, ayudando al desarrollo del sector y a la mejora continua de los procesos de diseño.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción al Marco Teórico.

El presente marco teórico reúne los conceptos y herramientas fundamentales para comprender cómo el modelado paramétrico puede integrarse en un entorno BIM, optimizando el trabajo de los dibujantes proyectistas en el ámbito de la ingeniería estructural. En primer lugar, se revisa el concepto de BIM, una metodología que centraliza toda la información del proyecto en un modelo digital, facilitando la colaboración y coordinación entre diversos profesionales. A continuación, se estudia el modelado paramétrico, que introduce parámetros ajustables, ofreciendo una flexibilidad y precisión que los métodos tradicionales no alcanzan.

Asimismo, se examinan las herramientas Tekla Structures y Grasshopper de Rhino, que combinan el BIM y el modelado paramétrico de manera práctica, permitiendo optimizar tareas repetitivas y mejorar la documentación técnica. Finalmente, este marco teórico establece los principios necesarios para comprender y aplicar la metodología paramétrica, dejándola lista para ponerla en práctica en el desarrollo del estudio de esta tesis.

2.2. Building Information Modeling (BIM).

2.2.1. Definición de BIM.

Building Information Modeling (BIM) es una metodología que centraliza toda la información relevante de un proyecto de construcción en un modelo digital tridimensional, facilitando la colaboración y la gestión de datos en todas las fases del ciclo de vida del proyecto. BIM se define como un

enfoque integral que permite integrar, coordinar y comunicar datos estructurales, arquitectónicos y de instalaciones en un único modelo compartido. De acuerdo con Eastman et al. (2011), BIM representa un cambio de paradigma en la industria de la construcción, transformando la manera en que los profesionales gestionan la información, al eliminar redundancias y reducir la posibilidad de errores en el diseño y ejecución.

Uno de los aspectos fundamentales de BIM es su capacidad para centralizar la información, permitiendo que múltiples actores accedan al modelo y realicen ajustes en tiempo real. Esto facilita una mayor eficiencia en la planificación, ya que los cambios en el modelo se reflejan instantáneamente en la documentación del proyecto (Kensek, 2014). BIM no se limita a la creación de un modelo 3D; también incorpora datos sobre el tiempo (4D), costos (5D), sostenibilidad (6D) y operación y mantenimiento (7D), lo que permite una visión detallada del proyecto en cada etapa y una previsión precisa de los recursos necesarios (Sacks et al., 2018).

Además, BIM ha sido señalado como un recurso clave para reducir el impacto ambiental de los proyectos de construcción, ya que permite realizar análisis de eficiencia energética y evaluar materiales de construcción sostenibles desde las primeras fases de diseño (Kolarevic, 2003). Esta capacidad de análisis ha incrementado el uso de BIM en proyectos complejos, donde la precisión en los datos y la adaptabilidad del modelo son esenciales para responder a los retos de la sostenibilidad y la eficiencia en la construcción.

BIM se destaca también por su rol en mejorar la comunicación entre profesionales de distintas disciplinas, lo cual reduce el riesgo de conflictos y facilita la toma de decisiones informadas en el diseño y la construcción (Smith & Tardif, 2009). Este enfoque colaborativo ha permitido que BIM se convierta en un estándar en la industria de la construcción, siendo adoptado no solo en grandes proyectos, sino también en proyectos de menor

envergadura, gracias a su versatilidad y adaptabilidad a distintas escalas.



Figura 1. Etapas que abarca un proceso de desarrollo en BIM

2.2.2. Aplicación de BIM en la Ingeniería Estructural.

En el campo de la ingeniería estructural, Building Information Modeling (BIM) ha transformado la manera en que se diseñan, planifican y ejecutan los

proyectos de construcción, proporcionando un modelo centralizado que facilita el flujo de información entre todos los agentes involucrados. BIM permite que los ingenieros estructurales desarrollen modelos tridimensionales detallados que integran información crítica del proyecto, como especificaciones de materiales, cargas estructurales y datos de costos. Estos modelos multidimensionales no solo sirven para visualizar la estructura en su totalidad, sino que también posibilitan un análisis preciso de las fuerzas y la resistencia de los materiales, mejorando la seguridad y eficacia del diseño estructural (Eastman et al., 2011).

Uno de los beneficios más significativos de BIM en la ingeniería estructural es la capacidad de identificar y resolver problemas de diseño antes de la construcción física, lo que se conoce como “construcción virtual”. Esta capacidad de detección temprana permite ajustar elementos estructurales y de soporte, evitando errores que podrían resultar costosos o peligrosos en etapas avanzadas del proyecto. Según Sacks et al. (2018), el uso de BIM en la ingeniería estructural ha demostrado reducir errores de coordinación en un 40% y disminuir los conflictos entre disciplinas en aproximadamente un 55%. Al identificar problemas en el diseño estructural y resolverlos virtualmente, los ingenieros pueden evitar re-trabajos y minimizar los riesgos asociados con fallas estructurales durante la construcción.

Además, BIM facilita la planificación eficiente de los recursos y la estimación de costos en proyectos estructurales. Mediante el uso de modelos 5D que integran información de costos con el diseño tridimensional, los ingenieros estructurales pueden evaluar distintas opciones de materiales, calcular presupuestos detallados y ajustar las especificaciones del proyecto según sea necesario (Smith & Tardif, 2009). Este enfoque no solo permite un mayor control sobre los costos, sino que también mejora la sostenibilidad del proyecto al optimizar el uso de recursos y reducir el desperdicio de materiales.

La capacidad de BIM para coordinar en tiempo real a múltiples profesionales también es clave en la ingeniería estructural. Con BIM, los ingenieros pueden trabajar en colaboración con arquitectos, contratistas y otros especialistas, asegurándose de que todos los elementos estructurales estén alineados con el diseño general del proyecto. Kensek (2014) destaca que esta colaboración en tiempo real no solo reduce el margen de error en el diseño, sino que también mejora la productividad y reduce los tiempos de entrega, al permitir que todos los profesionales tengan acceso simultáneo a la misma información actualizada del proyecto.

Por último, el uso de BIM en la ingeniería estructural permite realizar simulaciones y análisis avanzados, como evaluaciones de comportamiento estructural ante diferentes cargas y condiciones. Estos análisis, que en métodos tradicionales se realizarían de manera aislada, ahora pueden integrarse directamente en el modelo BIM, facilitando la toma de decisiones informadas y aumentando la confiabilidad del diseño (Kolarevic, 2003). En conjunto, BIM ofrece una herramienta integral que mejora la precisión, eficiencia y seguridad de los proyectos de ingeniería estructural, convirtiéndose en una práctica estándar en la industria.

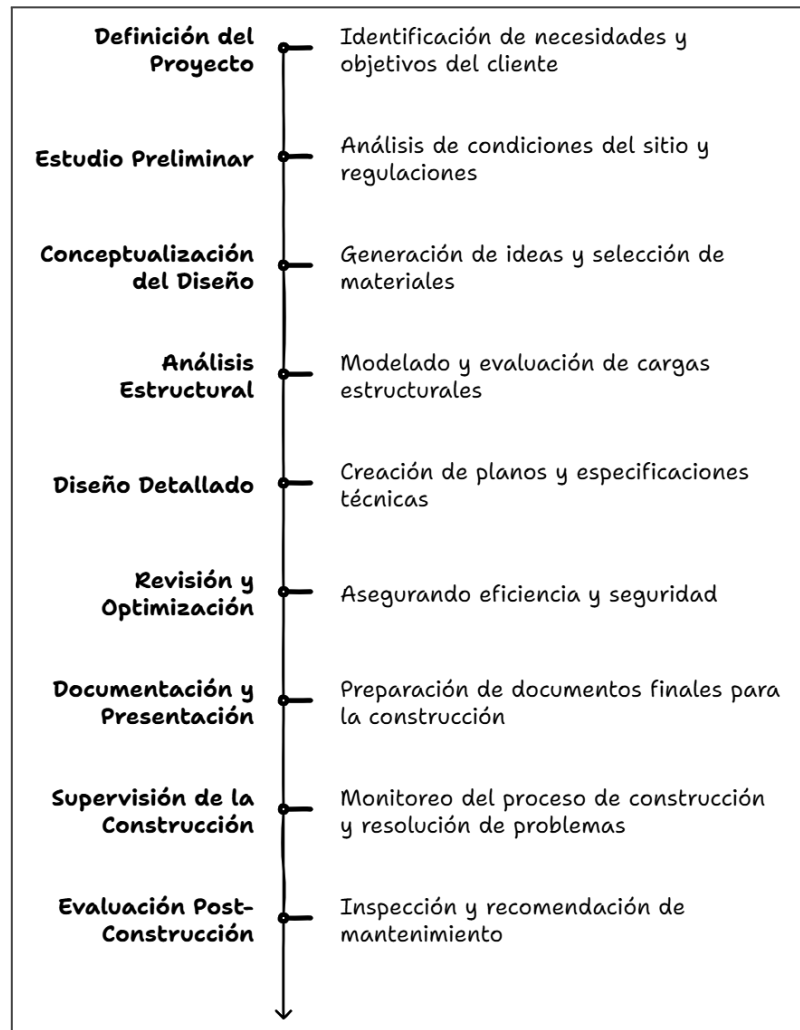


Figura 2. Etapas de desarrollo de un proyecto constructivo.¹

2.2.3. Beneficios y Desafíos de BIM.

Es posible identificar siete aspectos destacados del sistema actualmente utilizado para el diseño y desarrollo de proyectos BIM, entre los cuales se resaltan:

¹ Mapa conceptual aplicado a diseños de proyectos AEC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción)

→ Mejora de la Coordinación y Colaboración.

BIM permite integrar a todos los agentes del proyecto (arquitectos, ingenieros, contratistas, etc.) en un modelo único y centralizado. Esto mejora la comunicación y reduce los conflictos, ya que todos trabajan con la misma fuente de información. Según Eastman et al. (2011), el uso de modelos compartidos en BIM reduce los errores de coordinación en un 40%.

→ Detección Temprana de Errores.

A través de herramientas como el clash detection, BIM identifica interferencias entre sistemas (estructuras, instalaciones, etc.) antes de llegar a la etapa de construcción. Esto minimiza los costos y tiempos asociados a correcciones en obra, que suelen ser significativamente más caros.

→ Optimización de Costos y Recursos.

BIM permite integrar datos de costos (5D) y materiales en los modelos, facilitando estimaciones precisas y planificación de recursos. Esto ayuda a evitar desperdicios y a mantener los presupuestos bajo control.

→ Visualización Avanzada.

La representación tridimensional del proyecto permite a los equipos visualizar la estructura en detalle, facilitando la comprensión del diseño por parte de todos los involucrados, incluso aquellos sin formación técnica.

→ Incremento en la Eficiencia.

La automatización de tareas repetitivas, como la generación de planos

y documentos técnicos, reduce el tiempo necesario para completar el diseño y documentación del proyecto. Esto deja más tiempo para la toma de decisiones y la optimización del diseño.

→ **Análisis Avanzados.**

BIM permite realizar simulaciones y análisis integrados, como evaluaciones de sostenibilidad (6D) o análisis estructurales dinámicos. Estas capacidades aumentan la precisión y la confiabilidad de las decisiones técnicas.

→ **Mejora de la Sostenibilidad.**

El análisis temprano de materiales y la simulación energética permiten seleccionar opciones más sostenibles y minimizar el impacto ambiental del proyecto.

Desafíos de BIM.

También es posible destacar algunos de los desafíos que deben ser considerados. Entre ellos se encuentran:

→ **Curva de Aprendizaje y Capacitación.**

La implementación de BIM requiere que los equipos adquieran nuevas habilidades y se capaciten en herramientas específicas como Tekla Structures o Revit. Este proceso puede ser costoso y consumir tiempo.

→ **Costo Inicial de Implementación.**

Los costos asociados con licencias de software, infraestructura tecnológica y formación inicial pueden ser elevados, lo que representa un obstáculo para pequeñas empresas o proyectos de bajo

presupuesto.

→ Resistencia al Cambio.

En muchos casos, los equipos están acostumbrados a trabajar con métodos tradicionales, y la adopción de BIM implica un cambio cultural dentro de la organización que puede generar resistencia.

→ Complejidad en Proyectos Multidisciplinarios.

Aunque BIM facilita la integración entre disciplinas, la coordinación efectiva requiere estándares y protocolos bien definidos. La falta de un protocolo común puede generar inconsistencias y retrasos.

→ Dependencia de la Tecnología.

El éxito de BIM depende en gran medida de la infraestructura tecnológica (hardware y software). Las fallas en los sistemas o la falta de actualizaciones pueden interrumpir los procesos de diseño y gestión.

→ Falta de Estándares Universales.

Aunque existen normativas específicas en algunos países, la falta de estándares universales para la implementación de BIM puede dificultar su adopción global y su integración en proyectos internacionales.

→ Gestión de Datos Complejos.

A medida que los proyectos se vuelven más grandes y detallados, los modelos BIM pueden volverse difíciles de gestionar. Esto requiere una planificación meticulosa para evitar errores o sobrecargas de información.

2.3. Modelado Paramétrico.

2.3.1. Definición y Principios del Modelado Paramétrico.

El modelado paramétrico es una metodología de diseño que utiliza parámetros y relaciones lógicas predefinidas para definir y controlar las características de un modelo. Esta técnica permite que los modelos se actualicen automáticamente al modificar los valores de los parámetros, facilitando la exploración de múltiples variantes de diseño y optimizando la eficiencia en el proceso creativo.

Otra definición puede sugerir que la modelación paramétrica es una técnica de diseño que utiliza algoritmos y programación para crear formas y estructuras complejas.

En el contexto de la arquitectura y la ingeniería estructural, el modelado paramétrico ha revolucionado las prácticas tradicionales al introducir una mayor flexibilidad y adaptabilidad en los diseños. Según un artículo de Adobe sobre modelado paramétrico, esta metodología permite crear objetos 3D complejos mediante parámetros, lo que resulta en una herramienta versátil y potente para diseñar, visualizar y analizar una amplia gama de modelos y estructuras².

Los principios fundamentales del modelado paramétrico incluyen:

- **Relaciones Lógicas:** Los componentes del diseño están interconectados mediante reglas predefinidas, asegurando coherencia y precisión en todo el modelo.

² Comparar con publicación de Adobe en <https://www.adobe.com/mx/products/substance3d/discover/parametric-modeling.html>

- Automatización de Cambios: Las modificaciones en un parámetro se reflejan automáticamente en todos los elementos relacionados, eliminando la necesidad de ajustes manuales repetitivos.
- Exploración de Variantes: Facilita la generación y evaluación de múltiples configuraciones de diseño en un corto período, optimizando la toma de decisiones.

Un artículo de Autodesk destaca que el modelado paramétrico es un enfoque de CAD 3D que permite cumplir la finalidad del diseño al integrar inteligencia que automatiza los cambios repetitivos³.

Esta capacidad de automatización es especialmente valiosa en proyectos de gran escala, donde los cambios frecuentes pueden ser gestionados de manera eficiente.

Además, el modelado paramétrico se integra eficazmente con tecnologías como el Building Information Modeling (BIM), mejorando la colaboración entre disciplinas y optimizando la gestión de proyectos. La revista ESDESIGN señala que el diseño en 3D se sirve tanto del modelado paramétrico como del no paramétrico, y que sus características y aplicaciones son diferentes, por lo que es esencial conocer cómo y cuándo utilizar uno u otro método⁴.

Ejemplo de Principios Aplicados.

Imaginemos el diseño de una fachada dinámica que responde a las condiciones de iluminación natural. Mediante parámetros como la posición

³ Ver artículo en <https://www.autodesk.com/es/solutions/parametric-modeling>

⁴ Ver artículo en <https://www.esdesignbarcelona.com/actualidad/disenio-producto/modelado-parametrico>

del sol o el ángulo de incidencia de la luz, el modelado paramétrico ajusta automáticamente la apertura de los paneles de la fachada para optimizar la entrada de luz y reducir el consumo energético. Este principio se utiliza en proyectos emblemáticos como el Al Bahar Towers en Abu Dabi.

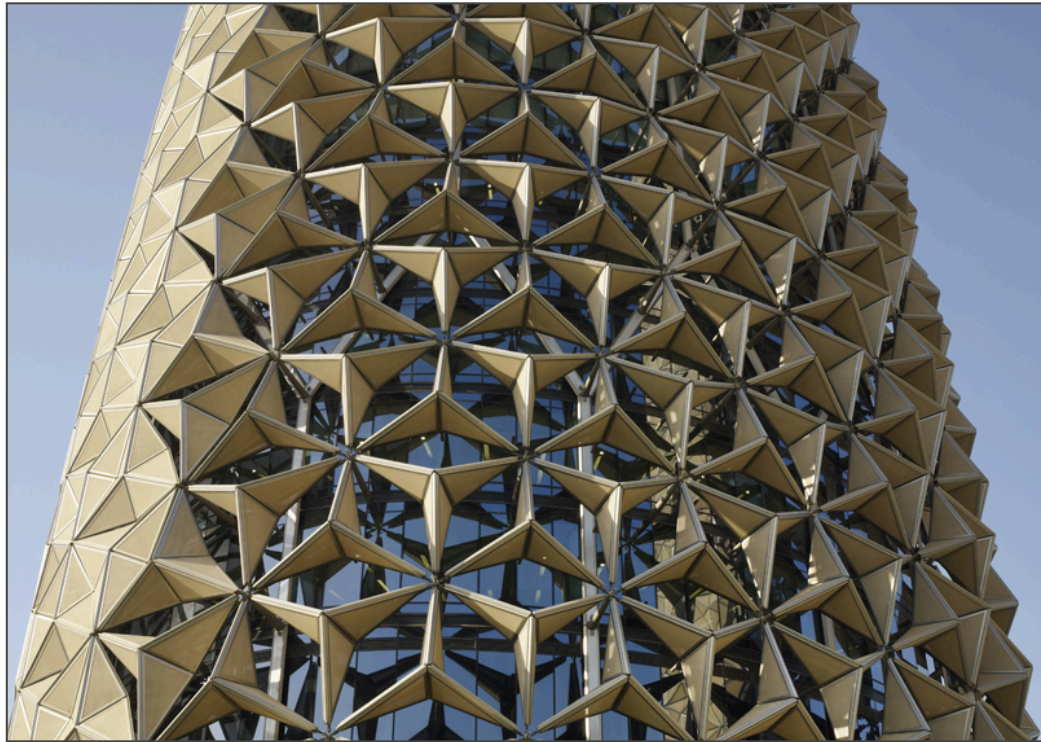


Figura 3. A través de la gestión de BMS y del calendario astrológico, la fachada automatizada funciona de manera autónoma.

A continuación se muestra una tabla que detalla los softwares actuales que permiten el trabajo con el modelado paramétrico, incluyendo sus descripciones, aplicaciones principales y ventajas.

Programa	Descripción	Aplicaciones Principales	Ventajas
Grasshopper para Rhino	Extensión de Rhinoceros para programación visual y diseño paramétrico.	Geometrías complejas, fachadas dinámicas, análisis ambiental.	Intuitivo, versátil, amplia comunidad de usuarios.
Dynamo para Revit	Herramienta de programación visual integrada con Revit para diseño BIM.	Elementos arquitectónicos, layouts, integración BIM.	Integración con Revit, diseño BIM, simulaciones rápidas.
Tekla Structures	Software BIM especializado en diseño estructural con capacidades paramétricas.	Modelado de estructuras, conexiones automatizadas, documentación técnica.	Precisión estructural, enfoque constructivo, proyectos a gran escala.
Autodesk Fusion 360	Software CAD/CAM/CAE para diseño y simulación paramétrica en manufactura.	Prototipos personalizados, manufactura aditiva, simulación de resistencia.	Integración CAD/CAM, diseño y simulación en un entorno único.
SolidWorks	Software CAD paramétrico para diseño de maquinaria y productos mecánicos.	Diseño mecánico, ensamblajes adaptativos, simulaciones físicas.	Compatibilidad con manufactura, simulaciones avanzadas.
FreeCAD	Software de código abierto para diseño paramétrico en arquitectura y mecánica.	Diseño básico, personalización de modelos, impresión 3D.	Gratuito, accesible para principiantes.
Bentley GenerativeComponents	Herramienta de Bentley Systems para geometrías complejas en infraestructuras.	Infraestructuras, geometrías urbanas, ingeniería civil.	Ideal para proyectos de infraestructura a gran escala.
SketchUp con Extensiones Paramétricas	Software de diseño con extensiones que agregan capacidades paramétricas.	Modelado arquitectónico rápido, componentes repetitivos, configuraciones personalizadas.	Amigable para principiantes, extensiones variadas.

Parametric Design Plugins	Plugins especializados para optimización estructural y simulaciones ambientales.	Optimización estructural, simulaciones ambientales, iluminación natural.	Adaptación a necesidades específicas, análisis avanzado.
---------------------------	--	--	--

Tabla 1. Descripción de softwares y sus aplicaciones en el modelado paramétrico. Fuente: Elaboración propia.

Además de identificar las herramientas de software utilizadas en el mercado, se presentan los sectores productivos que aplican esta técnica de manera significativa.

Sectores donde se aplica el Modelado Paramétrico.

El impacto del modelado paramétrico se extiende a una variedad de sectores que requieren precisión, adaptabilidad y creatividad en sus procesos:

1. Construcción y Arquitectura.

El modelado paramétrico es ampliamente utilizado para diseñar geometrías complejas, optimizar recursos y adaptar estructuras a condiciones específicas. Las fachadas dinámicas o los diseños orgánicos son ejemplos comunes de su aplicación en este sector.



Figura 4. Imagen de arquitectura paramétrica

2. Ingeniería Estructural.

En esta disciplina, el modelado paramétrico permite optimizar diseños estructurales, generar variantes automáticamente y asegurar que las conexiones y elementos cumplan con los estándares de carga y seguridad.

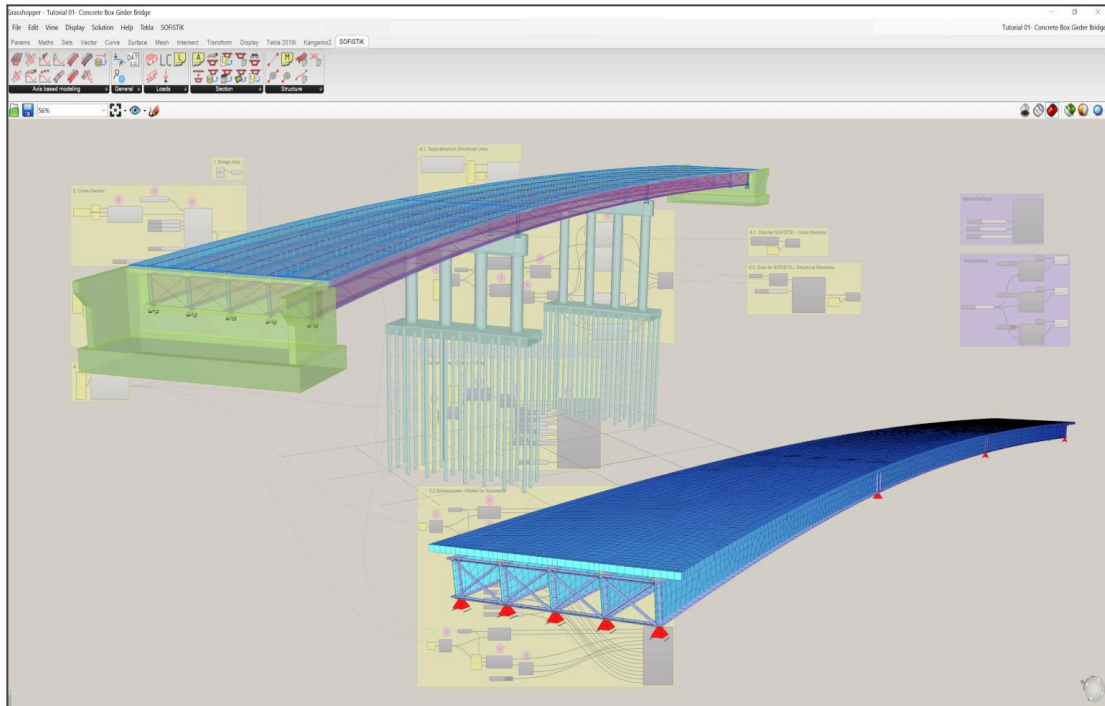


Figura 5. Modelo paramétrico de un puente en Grasshopper.

3. Urbanismo y Planificación Territorial

En el desarrollo urbano, facilita el diseño de ciudades inteligentes, simulando tráfico, densidad poblacional y distribución de servicios. Además, permite evaluar el impacto ambiental de nuevos desarrollos.

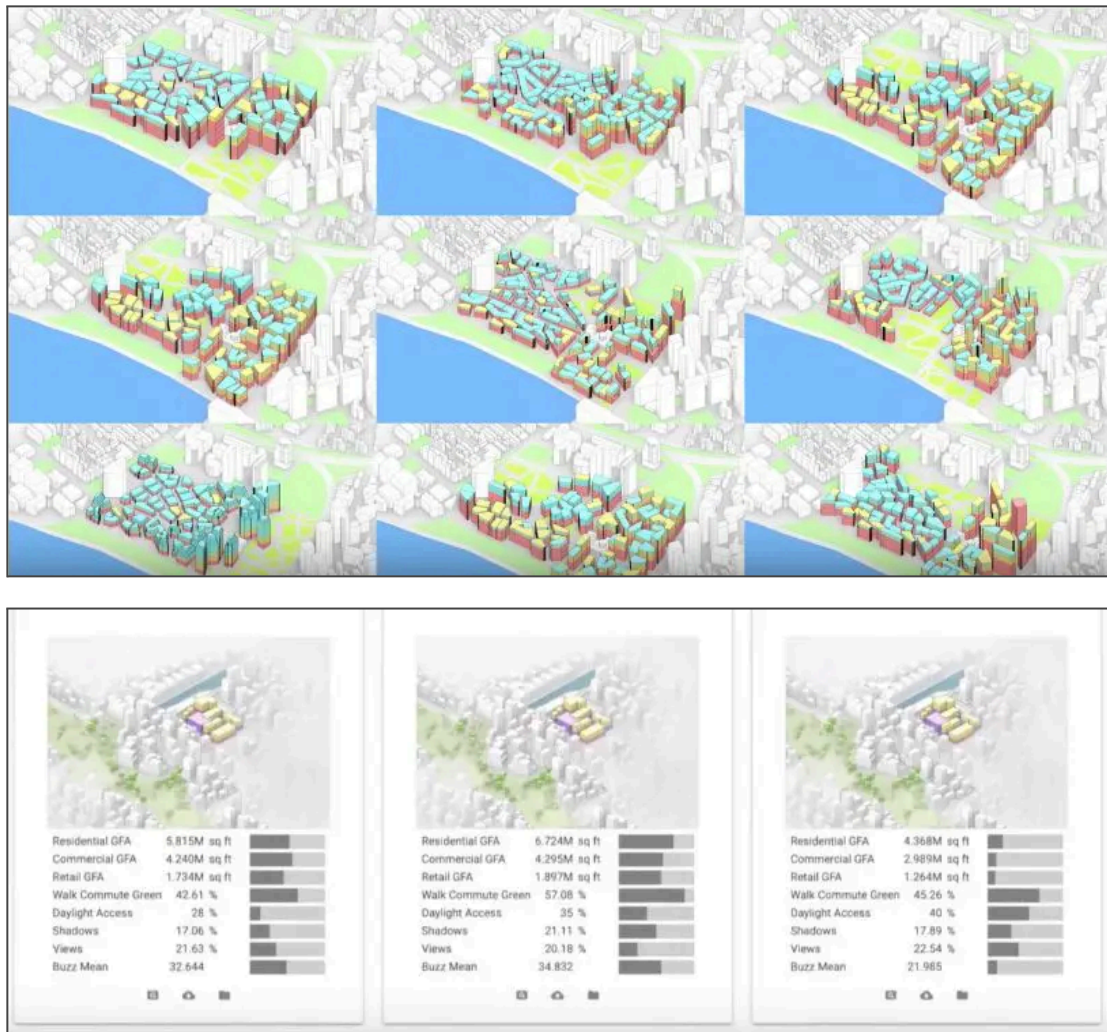


Figura 6. Modelo paramétrico de un estudio de planificación urbana.



4. Diseño Industrial

A person is seen from the side, looking at a large computer monitor. The monitor displays a 3D CAD model of a car chassis, showing various components like the engine, transmission, and suspension in different colors. The software interface includes a file explorer on the left and a command bar at the top. The person is sitting at a desk with a glass of water and a mouse visible.

37

5. Moda y Textiles.

Este sector se beneficia del modelado paramétrico para crear patrones adaptativos y ropa personalizada que responde a parámetros de tamaño o material.

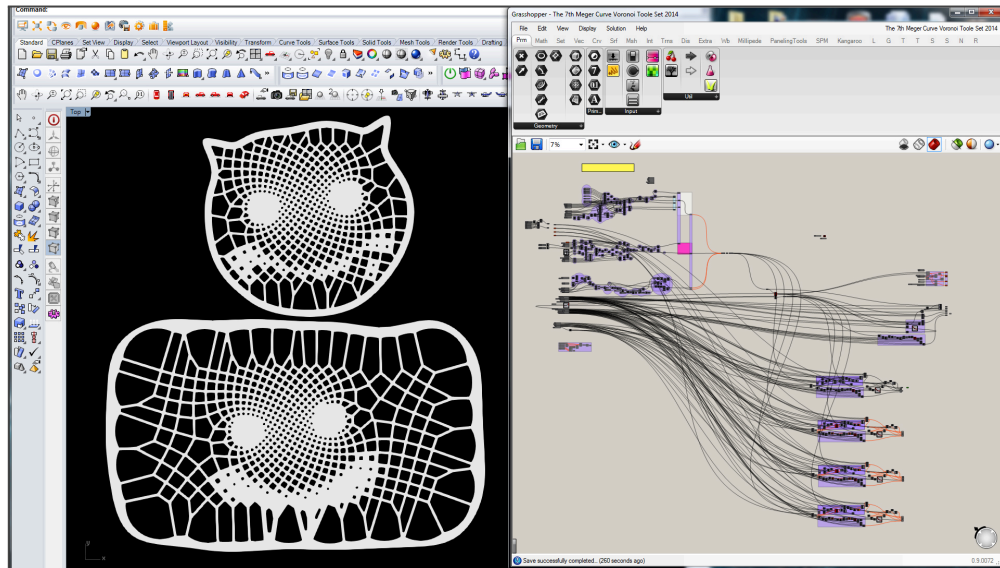


Figura 9. Diseño de una trama paramétrica en la industria de la moda.

6. Fabricación Digital.

En procesos como la manufactura aditiva y el maquinado CNC, los modelos paramétricos permiten crear componentes personalizados y optimizados para la producción.



Figura 10. Composición de modelos paramétricos e impresión en 3D.

7. Ingeniería Mecánica.

Permite diseñar máquinas, herramientas y sistemas con componentes dinámicos optimizados para su rendimiento y adaptabilidad.

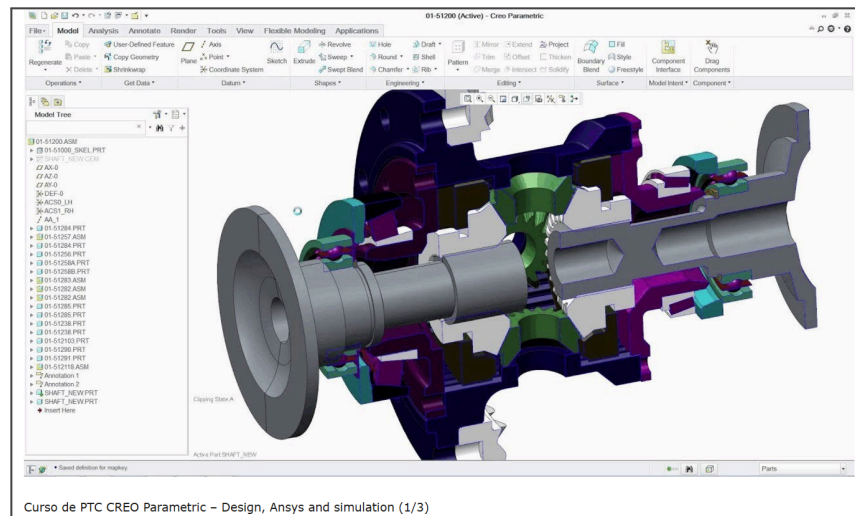


Figura 11. Estudio de un diseño mecánico en base a parámetros.

8. Diseño Gráfico y Animación.

En animación y efectos visuales, el modelado paramétrico ayuda a generar objetos 3D complejos y dinámicos, mejorando la eficiencia en producciones audiovisuales.



Figura 12. Diseño paramétrico futurista

2.3.2. Modelado Paramétrico y Diseño Computacional.

El modelado paramétrico está estrechamente relacionado con el diseño computacional, ya que ambos se fundamentan en el uso de algoritmos y procesos computacionales para resolver problemas complejos de diseño. Según BIM Corner, el diseño computacional combina habilidades técnicas y analíticas para descomponer problemas en componentes manejables y crear soluciones mediante herramientas digitales avanzadas.

El diseño computacional, como plantea BIM Corner, sigue un proceso estructurado que incluye los siguientes pasos:

- Descomposición: Dividir un problema complejo en partes más pequeñas y manejables.

- Reconocimiento de patrones: Identificar relaciones o repeticiones que puedan ser representadas en el modelo.
- Abstracción: Simplificar las características principales del problema, eliminando elementos no esenciales.
- Diseño de algoritmos: Crear instrucciones secuenciales o iterativas que automatizan la solución del problema.

Estos pasos son fundamentales para entender cómo se implementa el modelado paramétrico en herramientas como Grasshopper o Dynamo, donde el usuario puede definir relaciones entre parámetros y crear geometrías dinámicas adaptativas. Vincular estos procesos permite una integración más efectiva de conceptos paramétricos con la práctica profesional.

Vinculación entre Modelado Paramétrico y Diseño Computacional.

El diseño computacional aporta un marco analítico y sistemático que potencia la capacidad del modelado paramétrico para resolver problemas. Por ejemplo:

- Automatización: Utilizar algoritmos para automatizar ajustes geométricos y garantizar coherencia en el modelo.
- Eficiencia: Generar soluciones óptimas al analizar grandes volúmenes de datos y relaciones paramétricas.
- Exploración Creativa: Fomentar la creación de múltiples variantes de diseño mediante iteraciones algorítmicas.

Relación entre el Diseño Paramétrico y los Lenguajes de Programación.

El diseño paramétrico se fundamenta en la manipulación de parámetros y relaciones entre elementos dentro de un modelo, lo cual se

logra a través de herramientas que integran lenguajes de programación. Estas herramientas permiten que los diseñadores creen algoritmos personalizados para gestionar y optimizar sus modelos de manera más avanzada que con enfoques tradicionales.

Los lenguajes de programación ofrecen la posibilidad de ir más allá de las limitaciones de las interfaces gráficas de las herramientas paramétricas (como Grasshopper o Dynamo), permitiendo personalizar procesos, realizar cálculos complejos y mejorar la eficiencia en el diseño.

Cómo los Lenguajes de Programación Aportan al Diseño Paramétrico

- **Automatización Avanzada**

Los lenguajes de programación permiten la creación de scripts que automatizan tareas repetitivas dentro de un modelo paramétrico. Por ejemplo, mediante Python se pueden desarrollar scripts que generen automáticamente configuraciones de diseño basadas en datos de entrada, como dimensiones del terreno o restricciones de normativas locales.

- **Personalización y Flexibilidad**

Mientras que las herramientas de programación visual como Grasshopper ofrecen nodos predefinidos, los lenguajes de programación permiten personalizar completamente las funciones y algoritmos. Esto es esencial en proyectos complejos donde se requieren soluciones únicas y específicas.

- **Integración de Datos Externos**

Con lenguajes como Python o C#, los modelos paramétricos pueden vincularse a bases de datos externas, hojas de cálculo o APIs que alimenten los parámetros con información en tiempo real. Por ejemplo, se puede conectar un modelo de fachada paramétrica a datos

climáticos para que ajuste sus componentes dinámicamente según las condiciones del entorno.

- Optimización de Recursos y Diseño Generativo

Los lenguajes de programación permiten implementar técnicas de diseño generativo, donde se exploran cientos o miles de alternativas automáticamente mediante algoritmos de optimización. Por ejemplo, se pueden utilizar bibliotecas como NumPy o Pandas en Python para realizar cálculos estadísticos y seleccionar configuraciones que minimicen costos o maximicen la sostenibilidad.

- Simulaciones Avanzadas

A través de lenguajes de programación, se pueden integrar simulaciones avanzadas dentro de los procesos de diseño paramétrico. Por ejemplo, utilizando Rhinopython en Grasshopper, los diseñadores pueden simular el comportamiento estructural o térmico de un modelo antes de su construcción.

Lenguajes de Programación Relevantes para el Diseño Paramétrico.

A continuación se muestra una tabla resume los lenguajes de programación más relevantes en el diseño paramétrico, destacando sus aplicaciones principales y ventajas específicas.

Lenguaje de Programación	Aplicaciones Principales	Ventajas
Python	Automatización, análisis de datos, diseño generativo. Compatible con bibliotecas como NumPy, Pandas y Matplotlib.	Versátil, ampliamente utilizado, soporta cálculos avanzados y visualización.
C#	Desarrollo de nodos personalizados en Dynamo y Revit, extensión de	Ideal para personalización avanzada, integración con herramientas BIM.

	funcionalidades en herramientas BIM.	
JavaScript	Diseño interactivo y plataformas web de modelado paramétrico como ShapeDiver.	Esencial para aplicaciones web e interactivas en diseño paramétrico.
Visual Basic for Applications (VBA)	Automatización y personalización de tareas en AutoCAD.	Facilita tareas repetitivas y personalización en entornos CAD.
Processing y Java	Diseño generativo y visualización creativa, especialmente en proyectos artísticos y arquitectónicos.	Promueve la interactividad en diseño generativo y artístico.
Rhinopython y RhinoScript	Personalización de procesos dentro de Rhinoceros y Grasshopper.	Amplía la funcionalidad en Grasshopper con scripts personalizados.

Tabla 2. Lenguajes de programación basados en texto relacionados con la programación visual. Fuente: elaboración propia⁵

Ejemplo Práctico: Python y el Diseño Paramétrico:

En Grasshopper, un diseñador puede construir una geometría adaptativa con nodos visuales. Sin embargo, al implementar Python, se pueden realizar operaciones más complejas, como:

- Iterar automáticamente sobre miles de configuraciones de diseño.
- Incorporar cálculos estructurales en tiempo real para optimizar dimensiones.
- Conectar el modelo a una API climática para ajustar dinámicamente una fachada en función de la temperatura y el viento.

Dada la información investigada, se puede concluir que, los lenguajes

⁵ Se puede profundizar más a través de una formación relacionada en <https://www.e-zigurat.com/es/blog/python-arquitectos/>

de programación no solo enriquecen el diseño paramétrico, sino que amplían sus capacidades al incorporar personalización avanzada, integración de datos externos y simulaciones complejas; pueden resolver problemas más ambiciosos, optimizar procesos y generar innovaciones que no serían posibles con herramientas gráficas estándar. Esto posiciona el modelado paramétrico como una metodología aún más poderosa en el entorno de diseño contemporáneo.

Programación Visual.

La programación visual es un enfoque de desarrollo de software en el que los usuarios crean programas manipulando elementos gráficos o diagramas en lugar de escribir código en un lenguaje textual. Este método utiliza interfaces visuales para representar procesos lógicos, como nodos y conexiones, que definen las relaciones entre las diferentes partes de un programa.

En el contexto del diseño paramétrico, la programación visual permite a los diseñadores crear algoritmos y procesos complejos de manera intuitiva, utilizando herramientas gráficas para definir las relaciones y parámetros que controlan un modelo.

Algunos softwares que utilizan este método son:

1. Grasshopper para Rhino:

Grasshopper es una extensión de Rhinoceros que permite a los usuarios construir geometrías paramétricas mediante nodos visuales. Es ampliamente utilizado en arquitectura e ingeniería.

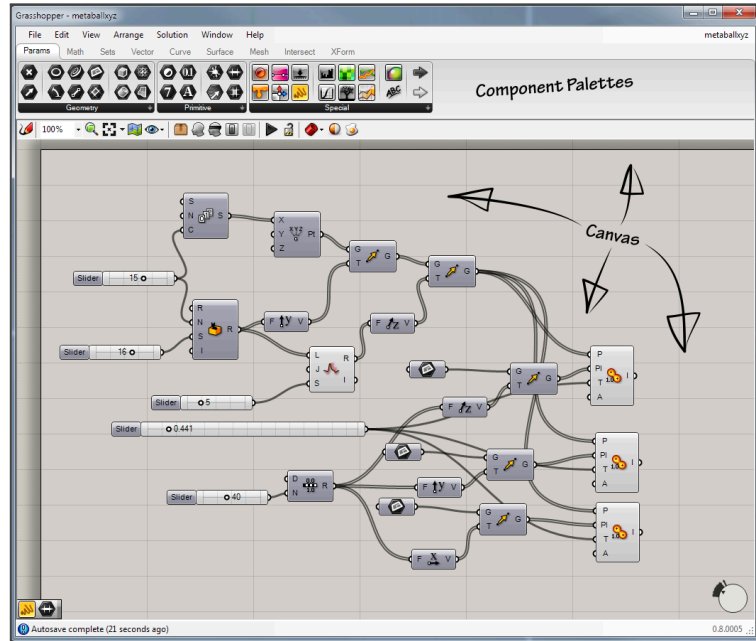


Figura 13. Interfaz gráfica de Grasshopper.

2. Dynamo para Revit:

Dynamo es una herramienta que se integra con Autodesk Revit y permite crear procesos BIM paramétricos mediante nodos y conexiones, optimizando tareas en diseño y construcción.

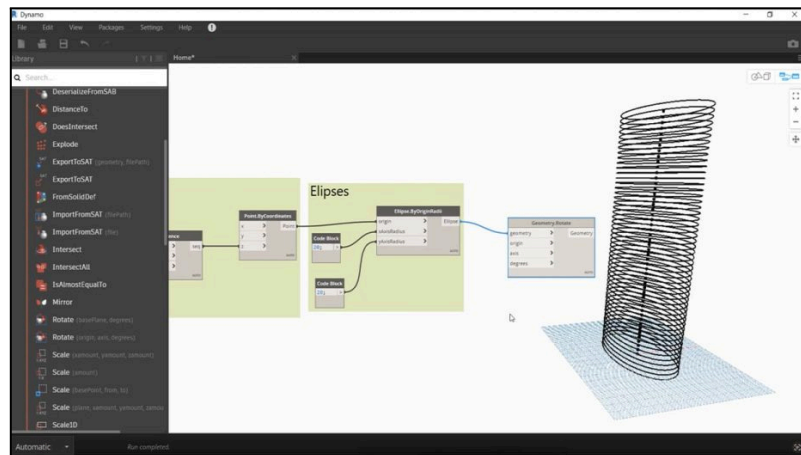


Figura 14. Interfaz gráfica de Dynamo.

3. TouchDesigner:

Usado en diseño interactivo y artístico, combina programación visual con datos en tiempo real.

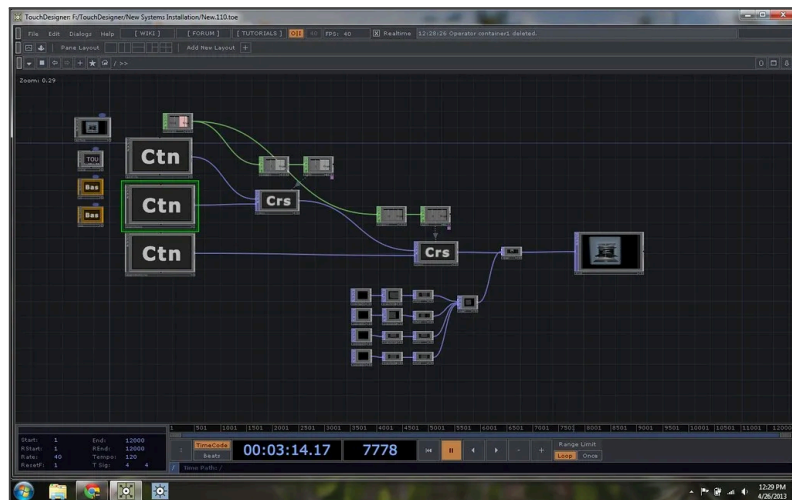


Figura 15. Interfaz gráfica de TouchDesigner.

4. Scratch:

Scratch se enfoca en la enseñanza y demuestra cómo las interfaces visuales hacen la programación más accesible para principiantes.

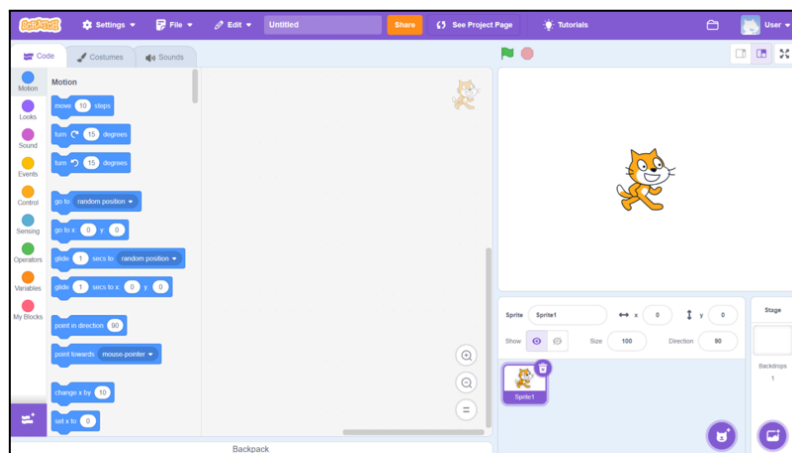


Figura 16. Interfaz gráfica de Scratch.

Tabla Comparativa: Programación Visual vs. Programación Basada en Texto.

Para implementar el modelado paramétrico, existen dos enfoques principales en diseño computacional: programación visual y programación basada en texto. A continuación, se comparan sus características clave en la siguiente tabla:

Aspecto	Programación Visual	Programación Basada en Texto
Interfaz	Basada en nodos y conexiones gráficas.	Escribe código en lenguajes como Python o C#.
Facilidad de Uso	Más intuitiva, ideal para principiantes.	Requiere conocimientos previos de sintaxis.
Flexibilidad	Limitada a componentes disponibles.	Más flexible, permite personalización avanzada.
Velocidad de Desarrollo	Rápida para tareas estándar.	Lenta al inicio, pero más eficiente en proyectos grandes.
Aplicaciones Comunes	Grasshopper, Dynamo.	RhinoScript, Python para Dynamo.
Curva de Aprendizaje	Menor, ideal para estudiantes o profesionales no programadores.	Mayor, exige conocimientos de programación.

Tabla 3. Comparación de características entre técnicas de programación.

Fuente: Elaboración propia.⁶

Integrar el diseño computacional en el modelado paramétrico amplía las capacidades técnicas, y también promueve un enfoque más analítico y eficiente. Este vínculo resuelve problemas complejos y desarrolla soluciones innovadoras que mejoran la calidad del diseño en entornos BIM. La elección

⁶ Un blog especializado en sistemas informáticos menciona un artículo que trata el tema a mayor profundidad. Ver en <https://successfulsoftware.net/2024/01/16/visual-vs-text-based-programming-which-is-better/>

entre programación visual y basada en texto dependerá del nivel de experiencia del usuario, los requisitos del proyecto y la necesidad de personalización.

2.3.3. Ventajas del Modelado Paramétrico en Entornos BIM.

El modelado paramétrico ha revolucionado los entornos de Building Information Modeling (BIM), permitiendo una mayor eficiencia, flexibilidad y precisión en los procesos de diseño y construcción. Al integrar parámetros y relaciones lógicas dentro de un modelo BIM, se pueden automatizar tareas, explorar variantes y mantener la coherencia en proyectos complejos. Estas capacidades han convertido al modelado paramétrico en un estándar en la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC).

Principales Ventajas del Modelado Paramétrico en Entornos BIM:

- **Automatización de Procesos**

El modelado paramétrico elimina la necesidad de realizar ajustes manuales en cada componente del diseño. Cuando un parámetro cambia, las relaciones predefinidas aseguran que el modelo se actualice automáticamente, ahorrando tiempo y reduciendo errores.

Ejemplo: Si se modifica la altura de una columna, las vigas conectadas se ajustan automáticamente para mantener la coherencia estructural.

- **Flexibilidad y Adaptabilidad**

Los entornos BIM requieren modelos dinámicos que puedan responder rápidamente a cambios en las especificaciones del cliente,

normativas o condiciones del proyecto. El modelado paramétrico permite realizar modificaciones sin comprometer la integridad del diseño, adaptándose a nuevas necesidades con facilidad.

Cita: Según Kolarevic (2003), “la adaptabilidad es una de las fortalezas clave del modelado paramétrico, permitiendo que los diseños evolucionen sin esfuerzo ante cambios inesperados”.

- Optimización de Recursos

La integración de herramientas paramétricas permite analizar distintas configuraciones del diseño y seleccionar la más eficiente en términos de materiales, costos y tiempo. Esto ayuda a minimizar el desperdicio y mejorar la sostenibilidad del proyecto.

Ejemplo: En proyectos de fachadas complejas, el modelado paramétrico optimiza el corte y ensamblaje de paneles, reduciendo el material sobrante.

- Exploración de Variantes

El diseño paramétrico permite la creación de múltiples variantes de un modelo en poco tiempo, lo que facilita la comparación y selección de la mejor solución según criterios específicos, como costo, eficiencia energética o estética.

Cita: Woodbury (2010) señala que “el modelado paramétrico fomenta la innovación al ofrecer a los diseñadores la capacidad de explorar soluciones creativas con mayor profundidad”.

- Coordinación y Colaboración Multidisciplinaria

En entornos BIM, el modelado paramétrico facilita la colaboración

entre equipos de arquitectura, ingeniería y construcción al mantener un modelo centralizado que todos los profesionales pueden actualizar en tiempo real. Esto reduce conflictos y mejora la comunicación.

Ejemplo: En un proyecto de puente, los ingenieros estructurales pueden ajustar las cargas mientras los arquitectos refinan la geometría, y ambos cambios se reflejan automáticamente en el modelo.

- Simulación y Análisis en Tiempo Real

El modelado paramétrico permite integrar simulaciones avanzadas en tiempo real, como análisis estructural, térmico o de iluminación, para prever el comportamiento del diseño bajo distintas condiciones.

Ejemplo: En un edificio con fachada dinámica, las simulaciones climáticas controlan la apertura y cierre de los paneles para optimizar la iluminación natural y el confort térmico.

Casos de Éxito en Entornos BIM

- Torre Generali, Milán

El diseño paramétrico permitió modelar la torsión de la torre, optimizando la estructura para cumplir con los requisitos estéticos y estructurales. Las herramientas paramétricas en entornos BIM facilitaron la coordinación entre arquitectos e ingenieros.



Figura 17. La Torre Generali. Diseño conceptual y renderizado.

La Torre Generali es un ejemplo destacado del uso del modelado paramétrico en entornos BIM. El diseño complejo y retorcido de la torre requirió la aplicación de herramientas avanzadas de modelado para garantizar la precisión y viabilidad del proyecto. El uso de técnicas paramétricas permitió a los arquitectos y ingenieros explorar múltiples variantes de diseño, optimizar recursos y facilitar la coordinación entre disciplinas (4*[Torre Generali / Zaha Hadid Architects | ArchDaily en Español](#))

- Heydar Aliyev Center, Azerbaiyán

El centro cultural, diseñado por la reconocida arquitecta iraní-británica Zaha Hadid, fue concebido como el principal referente para los programas

culturales del país. Su construcción se basó en el uso de algoritmos y modelos tridimensionales, lo que permitió dar vida a una obra icónica que refleja la esencia y sensibilidad de la cultura azerí. Su diseño se caracteriza por formas orgánicas y líneas curvas que se integran armoniosamente con la topografía del terreno. La aplicación de tecnologías avanzadas de modelado computacional fue esencial para alcanzar la uniformidad y fluidez en su estructura. (5* [Arquitectura paramétrica: algoritmos y programación al servicio de estructuras complejas - Bosch](#))



Figura 18. Centro cultural Heydar Aliyev Center, Azerbaiyán.

- Aeropuerto Arturo Benito Merinez

El proyecto Nuevo Pudahuel AMB, cuya superficie es de un total aproximado de de aproximadamente 200.000 m², fue diseñado con tecnología BIM. REALI S.A. fue la empresa encargada de la coordinación, gestión, logística y construcción de la cubierta de Nuevo Pudahuel AMB. En

conjunto con CT ingenieros lograron desarrollar la geometría de la cubierta compleja que posee curvaturas en planta y elevación; habiendo una doble dificultad construída en base a elementos poligonales. Para el modelado se utilizan 3 diferentes programas: GRASSHOPPER, RHINO, TEKLA y REVIT.⁷



Figura 19. Modelo esquemático de la estructura de la cubierta de con doble curvatura del Nuevo Pudahuel AMB.

⁷ La revista [catalogoarquitectura.cl](https://www.catalogoarquitectura.cl/cl/bim/cual-es-el-rol-de-bim-en-la-cubierta-del-nuevo-aero-puerto-de-santiago-cl-1577150740) cuenta más información en <https://www.catalogoarquitectura.cl/cl/bim/cual-es-el-rol-de-bim-en-la-cubierta-del-nuevo-aero-puerto-de-santiago-cl-1577150740>

2.3.4. Uso de Grasshopper en Modelado Paramétrico.

Grasshopper es una herramienta de programación visual integrada en Rhinoceros (Rhino), un software ampliamente utilizado en diseño paramétrico. Grasshopper permite a los diseñadores, arquitectos e ingenieros crear modelos complejos y dinámicos mediante algoritmos visuales, sin necesidad de conocimientos avanzados de programación textual. Su interfaz gráfica, basada en nodos y conexiones, facilita la manipulación de parámetros y la generación de geometrías adaptativas.

El uso de Grasshopper en el modelado paramétrico ha transformado la forma en que se abordan los proyectos arquitectónicos y estructurales, ofreciendo una flexibilidad incomparable para explorar variantes de diseño, automatizar procesos y resolver problemas complejos.

Grasshopper cuenta con aplicaciones que sirven para crear formas no convencionales, como fachadas dinámicas y estructuras complejas. Permite simular diferentes configuraciones estructurales y materiales para minimizar el desperdicio y maximizar la eficiencia en proyectos de construcción. Con complementos como Ladybug y Honeybee, Grasshopper facilita análisis de rendimiento térmico, iluminación natural y comportamiento climático, asegurando la sostenibilidad de los diseños. Grasshopper puede generar automáticamente múltiples configuraciones basadas en un conjunto de reglas y restricciones definidas por el diseñador, promoviendo la creatividad y eficiencia. Mediante el complemento Karamba, los ingenieros pueden realizar simulaciones estructurales directamente en Grasshopper para garantizar la viabilidad del diseño.

Unas de las principales características en el modelado paramétrico son:

- **Diseño Arquitectónico Complejo:**
Grasshopper permite la creación de formas orgánicas y estructurales complejas que serían difíciles de lograr mediante técnicas tradicionales. Por ejemplo, fachadas dinámicas, cúpulas y estructuras no convencionales pueden diseñarse y ajustarse rápidamente.
- **Optimización de Recursos:**
La integración de algoritmos paramétricos en Grasshopper ayuda a optimizar materiales y procesos constructivos, reduciendo costos y desperdicios.
- **Simulaciones y Análisis:**
Grasshopper puede integrar simulaciones climáticas, análisis estructurales y estudios de iluminación para garantizar que los diseños cumplan con estándares de sostenibilidad y eficiencia.
- **Personalización de Diseño:**
Los usuarios pueden desarrollar scripts personalizados mediante Rhinopython o C# (Lenguajes de programación basados en texto) para ampliar las funcionalidades de Grasshopper y crear soluciones específicas para sus proyectos.

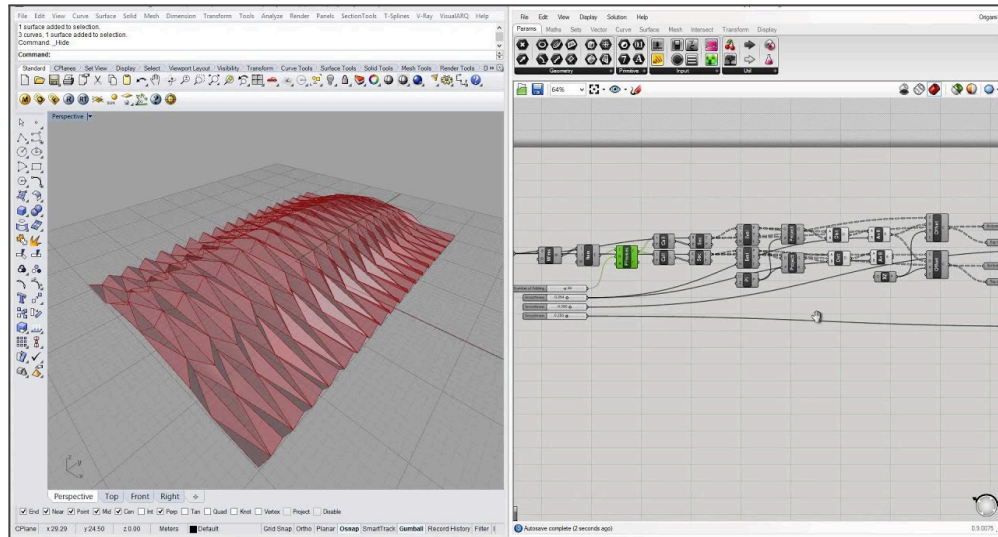


Figura 20. Ejemplo de un modelo paramétrico en Grasshopper.

2.3.5. Teoría de la Modelación y Diseño en Grasshopper para Estudios de Caso

Introducción al entorno de trabajo en Grasshopper

Grasshopper es un entorno visual de programación que opera como un complemento de Rhino, permitiendo la creación de modelos paramétricos a través de la conexión de componentes en un lienzo digital. Este lienzo es el espacio principal de trabajo donde se colocan los componentes, que representan operaciones o parámetros específicos. Los componentes se conectan entre sí mediante cables que transfieren datos, creando flujos de trabajo dinámicos y personalizables.

El entorno de Grasshopper está diseñado para ser interactivo, lo que permite modificar parámetros en tiempo real y observar cómo se actualiza el modelo en Rhino simultáneamente. Además, los componentes están

organizados en categorías lógicas como Input, Curve, Surface, Mesh, entre otras, facilitando su búsqueda y uso. Esta flexibilidad lo convierte en una herramienta ideal para la resolución de problemas en diseño estructural y la optimización de modelos.

3

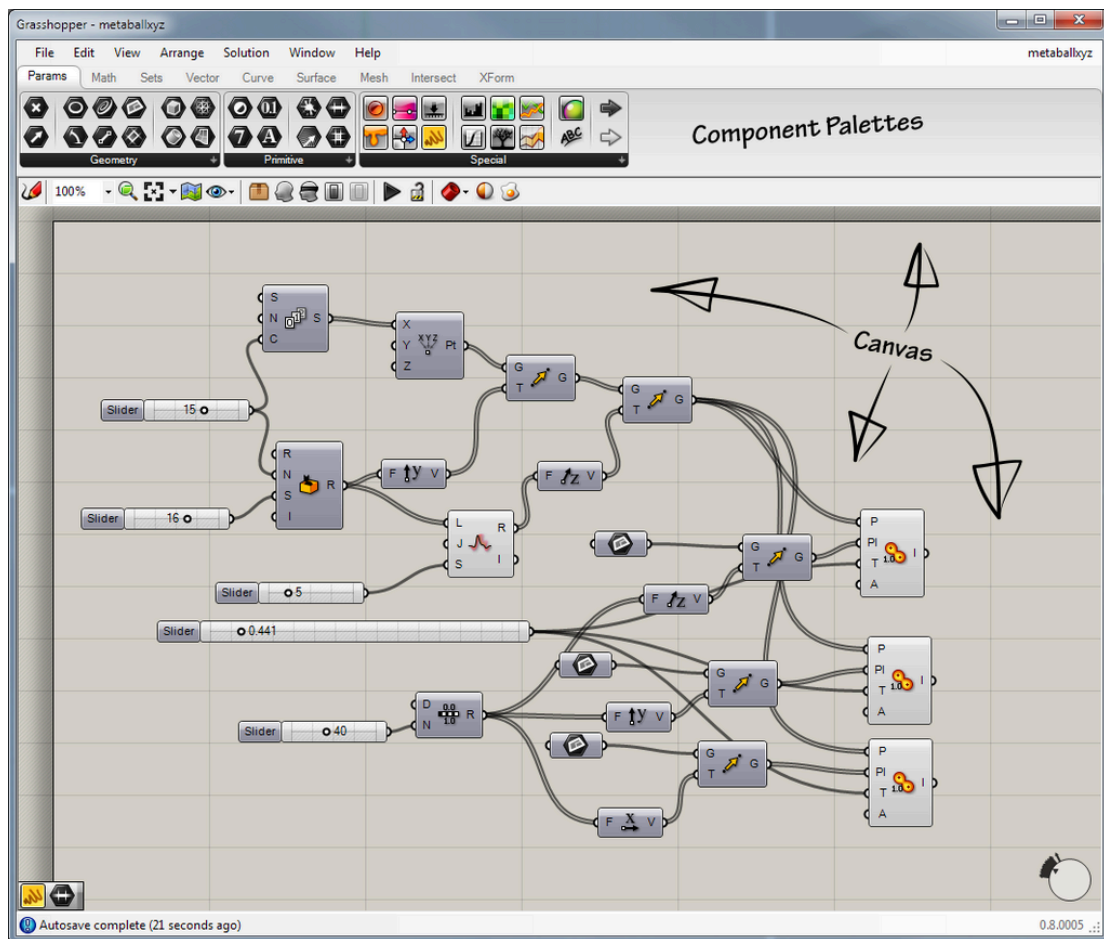


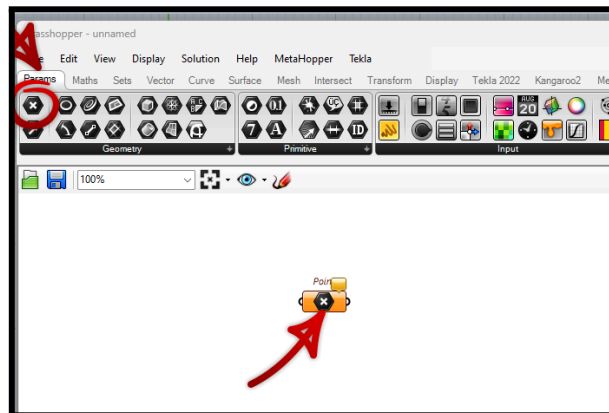
Figura 21. Ejemplo de trabajo en el lienzo (canvas) de Grasshopper. Los componentes dentro del lienzo se encuentran conectados de acuerdo a un orden lógico.

Componentes más relevantes para los estudios de caso

A continuación, se presenta un listado de algunos de los componentes más relevantes utilizados para desarrollar los tres estudios de caso en esta tesis, junto con una breve explicación de su función.

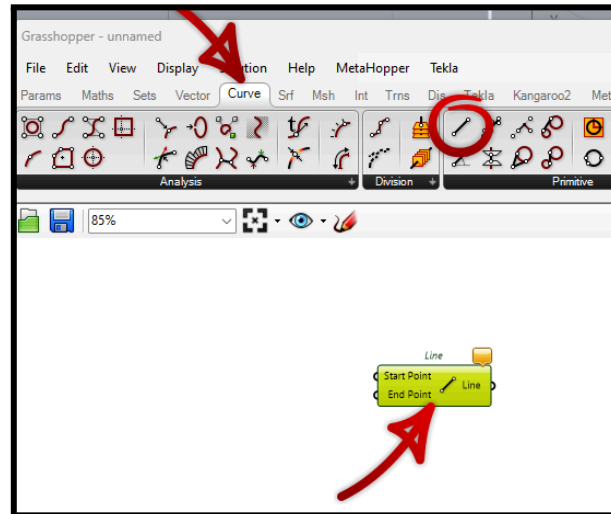
- **Point**

Define coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) que sirven como puntos de referencia iniciales para la creación de geometrías.



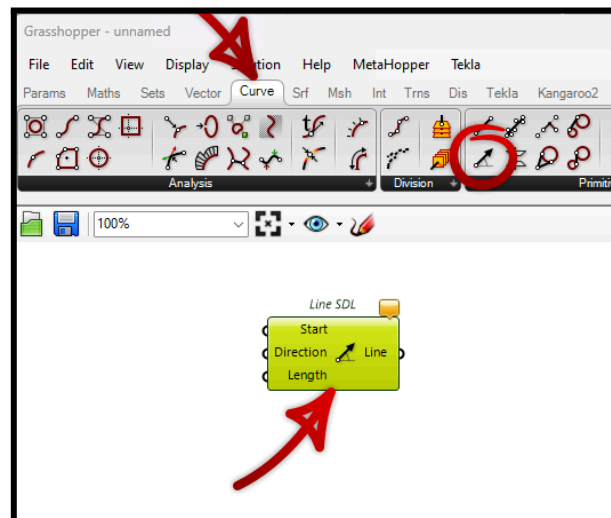
- **Line**

Genera una línea directamente conectando dos puntos definidos. Es esencial para modelar conexiones lineales simples entre puntos en el espacio.



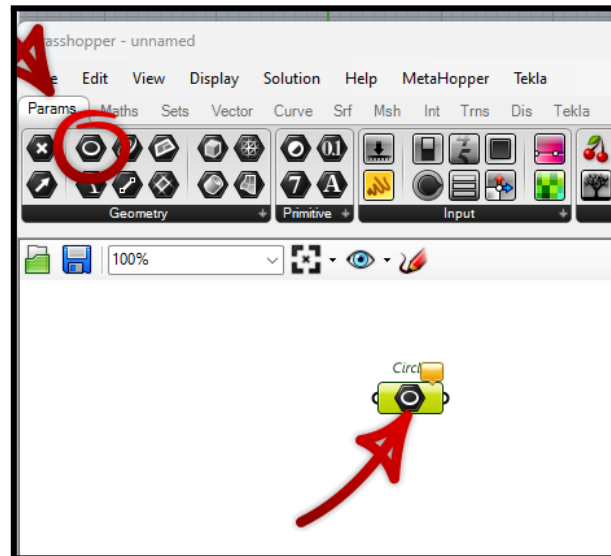
- Line SDL (Start, Direction, Length)

Genera una línea partiendo de un punto inicial, en una dirección específica, con una longitud definida. Es fundamental para modelar elementos lineales como columnas, vigas y cordones.



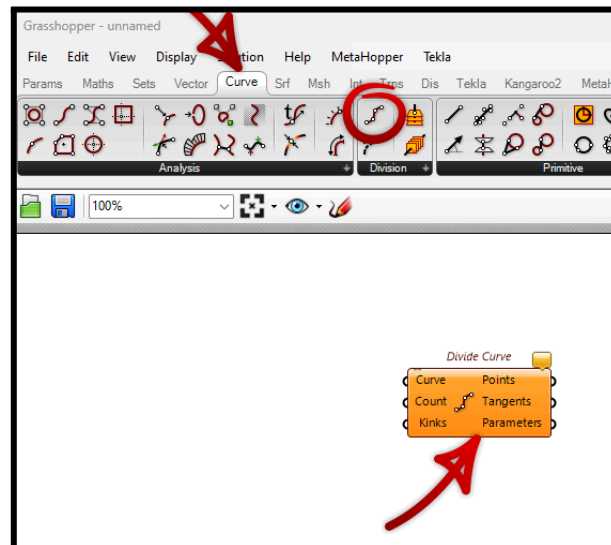
- Circle

Crea una geometría circular definida por un punto central y un radio. Ideal para representar distribuciones uniformes de pernos en placas.



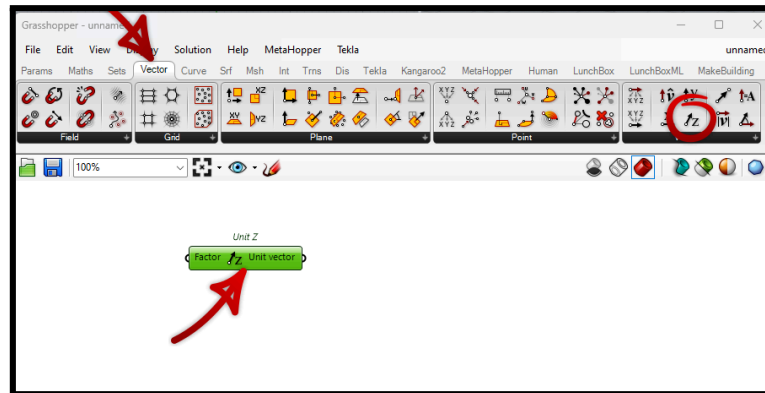
- Divide Curve

Divide una curva en segmentos iguales o personalizados, generando puntos equidistantes. Útil para distribuir elementos de manera uniforme, como nodos o correas.



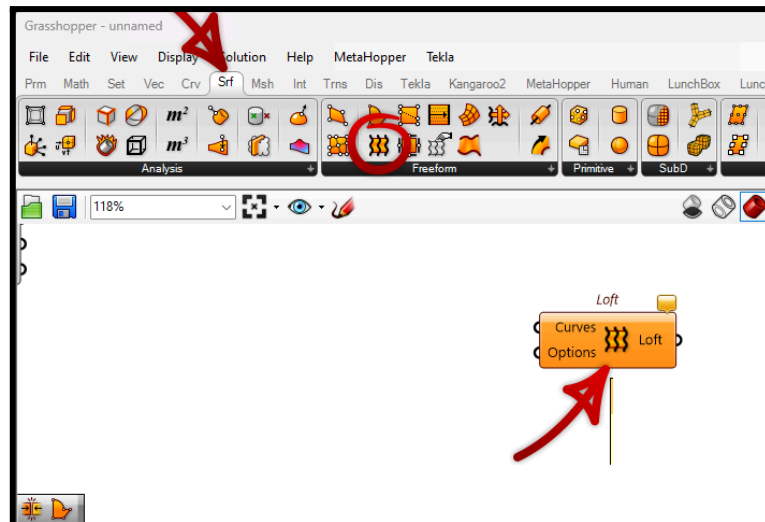
- Factor Z

Permite ajustar la altura o la posición vertical de un elemento al manipular la coordenada Z. Es crucial para modificar alturas de columnas, cumbreras y otros elementos estructurales.



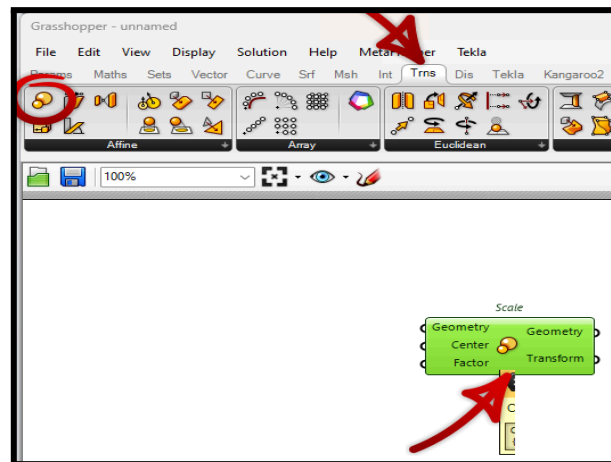
- Loft

Genera superficies continuas entre un conjunto de curvas o líneas, ideal para modelar cubiertas inclinadas o cerramientos estructurales.



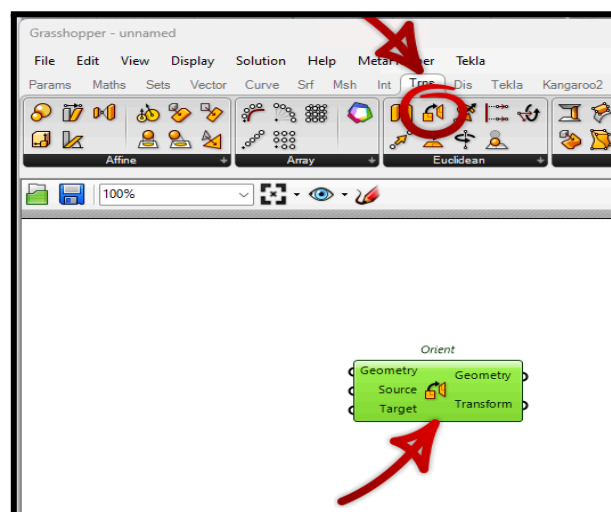
- Scale

Escala geometrías en relación con un punto base, útil para ajustar dimensiones específicas de elementos secundarios como correas o placas.



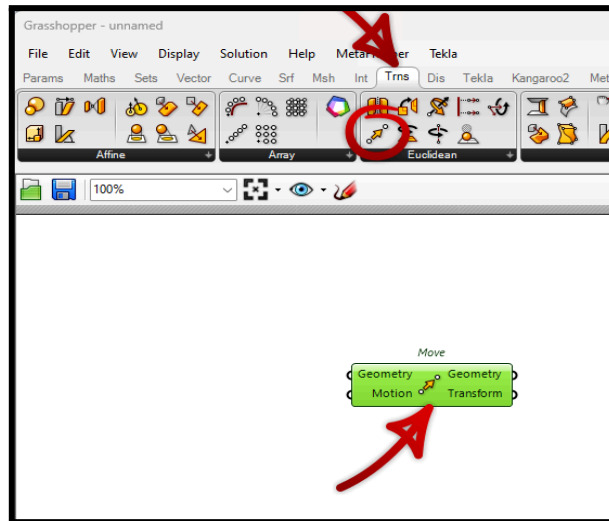
- Orient

Reubica y alinea geometrías en nuevos puntos o planos de referencia. Garantiza el posicionamiento adecuado de elementos como placas de anclaje y conexiones estructurales.



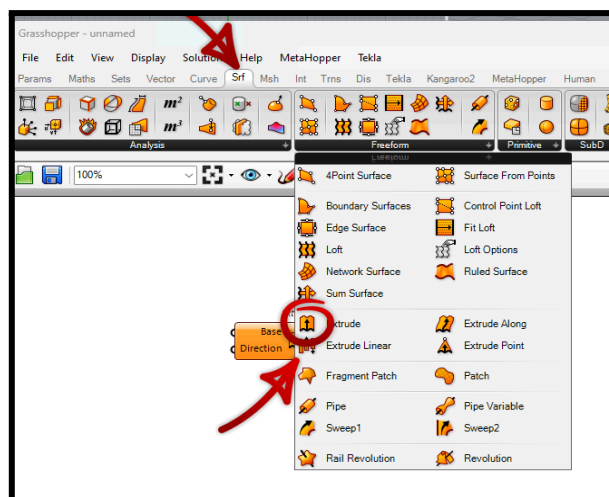
- Move

Desplaza una geometría o punto a una nueva ubicación basándose en un vector de movimiento. Es útil para ajustar posiciones de componentes estructurales.



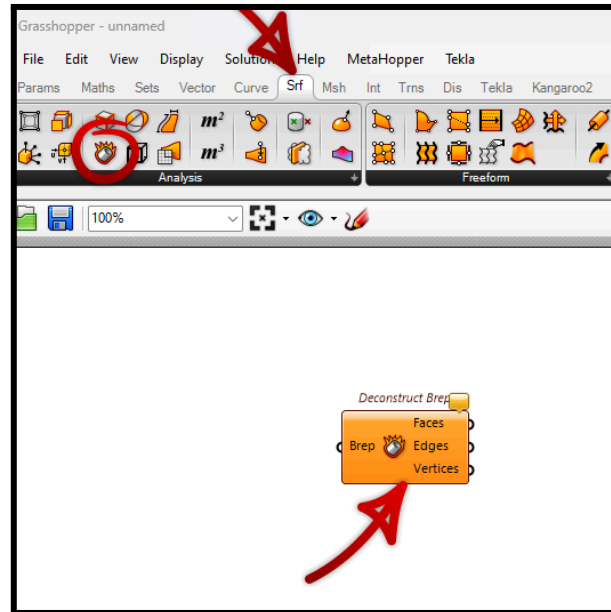
- Extrude

Extiende una curva en una dirección definida, creando un volumen sólido. Ideal para modelar elementos como vigas, columnas o placas.



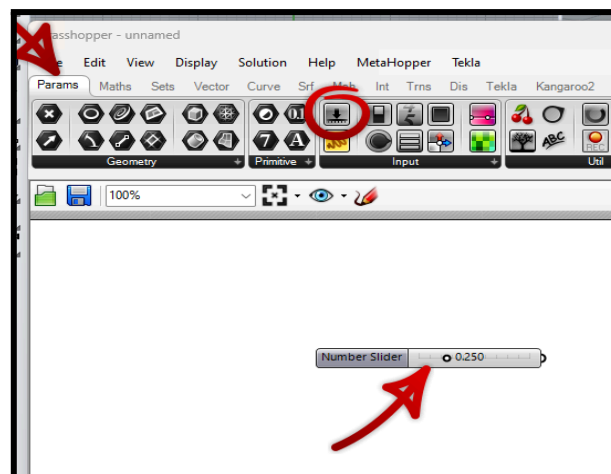
- Deconstruct Brep

Extrae las caras, bordes y vértices de un modelo sólido, permitiendo su análisis y modificación detallada.



- Slider

Controla valores numéricos de manera interactiva para ajustar parámetros como longitud, radio o posición, proporcionando un control preciso y dinámico del modelo.



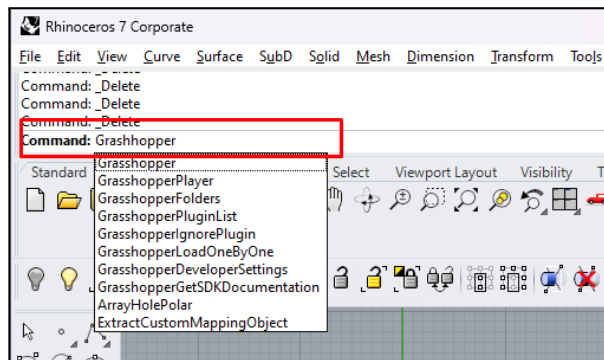
Ejemplo de aplicación de componentes.

A continuación se mostrará un ejemplo de aplicación de componentes con un instructivo guía que muestra el paso a paso sobre cómo crear una línea entre dos puntos en Grasshopper, controlarla mediante un Slider y dividirla en un número parametrizable de partes.

Este instructivo sirve como guía paso a paso sobre cómo crear una línea entre dos puntos en Grasshopper, controlarla mediante un **Slider** y dividirla en un número parametrizable de partes. Servirá como base para poner en práctica los criterios de modelado básico.

Paso 1: Configurar el Entorno de Trabajo

1. Abrir **Rhino** y asegurar iniciar Grasshopper (comando: **Grasshopper**).

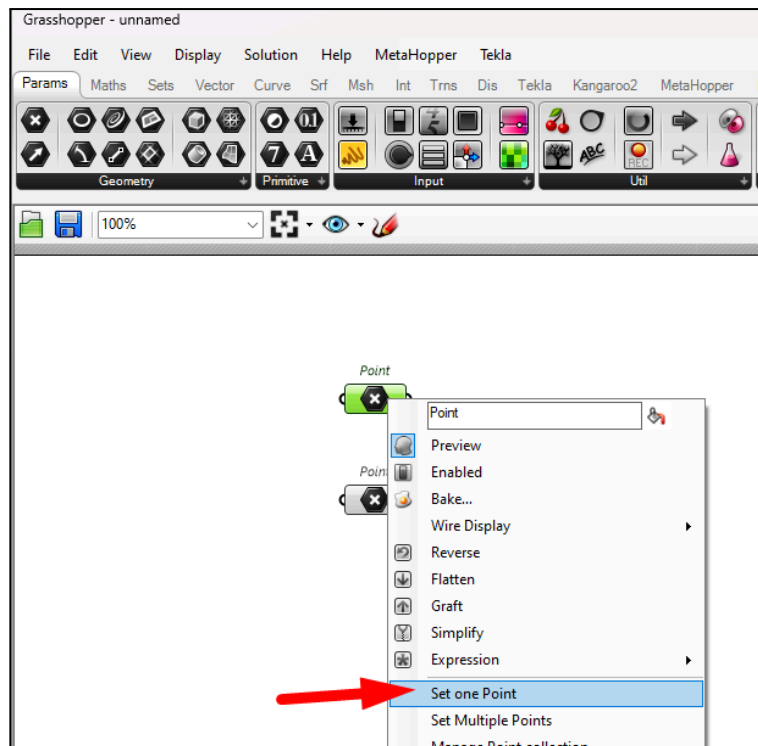


2. Limpiar cualquier configuración previa en el lienzo de Grasshopper para empezar desde cero.

Paso 2: Crear los Puntos Iniciales y Finales de la Línea

1. Buscar el componente **Point** en Grasshopper:

- Hacer doble clic en el lienzo y escribir **Point**.
 - Arrastrar dos componentes **Point** al lienzo.
2. Asignar valores a los puntos:
- Hacer clic derecho en el componente **Point**.
 - Seleccionar **Set One Point**.
 - Definir el primer punto en $(0, 0, 0)$ y el segundo en $(10, 0, 0)$ dentro de Rhino.

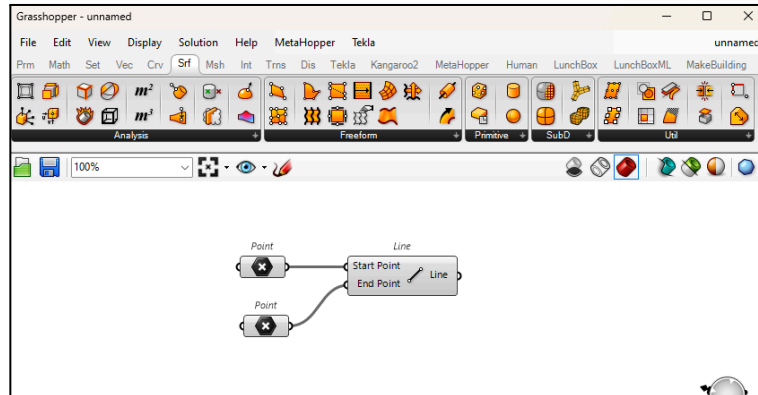


Paso 3: Generar la Línea entre los Puntos

1. Buscar el componente **Line**:
- Hacer doble clic en el lienzo y escribir **Line**.
 - Arrastrar el componente **Line** al lienzo.
2. Conectar los puntos al componente **Line**:
- Conectar la salida del primer **Point** (inicio) a la entrada **Start** del

componente **Line**.

- Conectar la salida del segundo **Point** (fin) a la entrada **End** del componente **Line**.



Paso 4: Dividir la Línea en Partes Parametrizables

1. Añadir un **Divide Curve**:

- Hacer doble clic en el lienzo y escribir **Divide Curve**.
- Arrastrar el componente **Divide Curve** al lienzo.

2. Conectar la línea al divisor:

- Conectar la salida del componente **Line** a la entrada **C** (Curve) del componente **Divide Curve**.

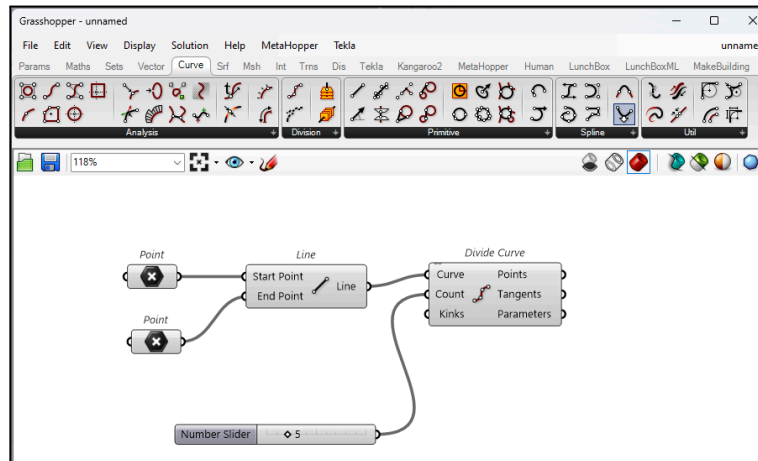
3. Agregar un **Slider** para parametrizar el número de divisiones:

- Hacer doble clic en el lienzo y escribir **Slider**.
- Arrastrar un componente **Slider** al lienzo.
- Hacer clic derecho en el **Slider** y seleccionar **Edit Number Slider**. Ajustar:

- **Min:** 1.
- **Max:** 20.
- **Value:** 5.

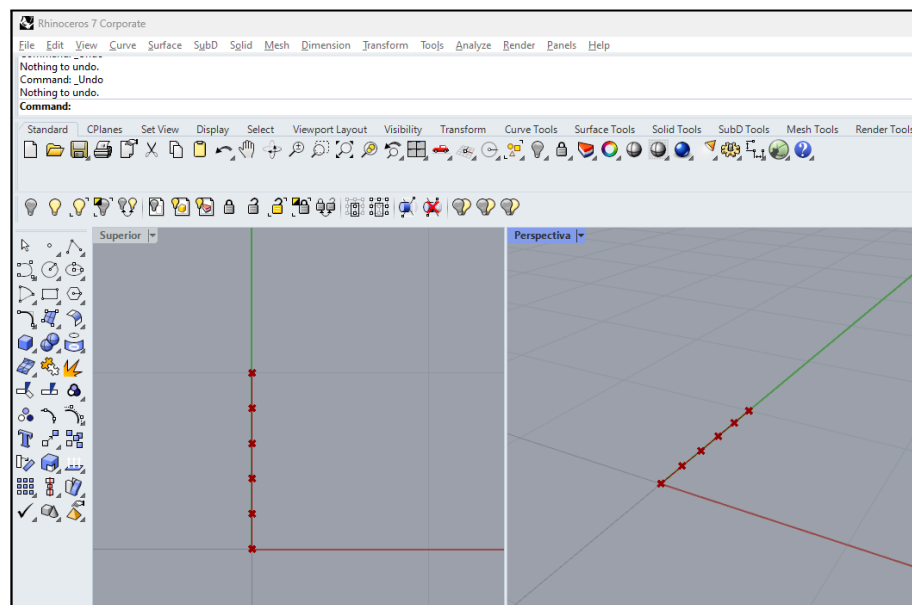
- Conectar el **Slider** a la entrada **N** (Number) del componente

Divide Curve.



Paso 5: Visualizar el Modelo en Rhino

1. Observar cómo se genera la línea entre los puntos en Rhino.
2. Ajustar el **Slider** para cambiar dinámicamente la cantidad de divisiones en la línea.



Resultado Final

Obtener una línea parametrizable que se divide dinámicamente en el número de partes definidas con el **Slider**. Los cambios se reflejarán en tiempo real en Rhino, demostrando el poder del modelado paramétrico para adaptarse a variaciones rápidas.

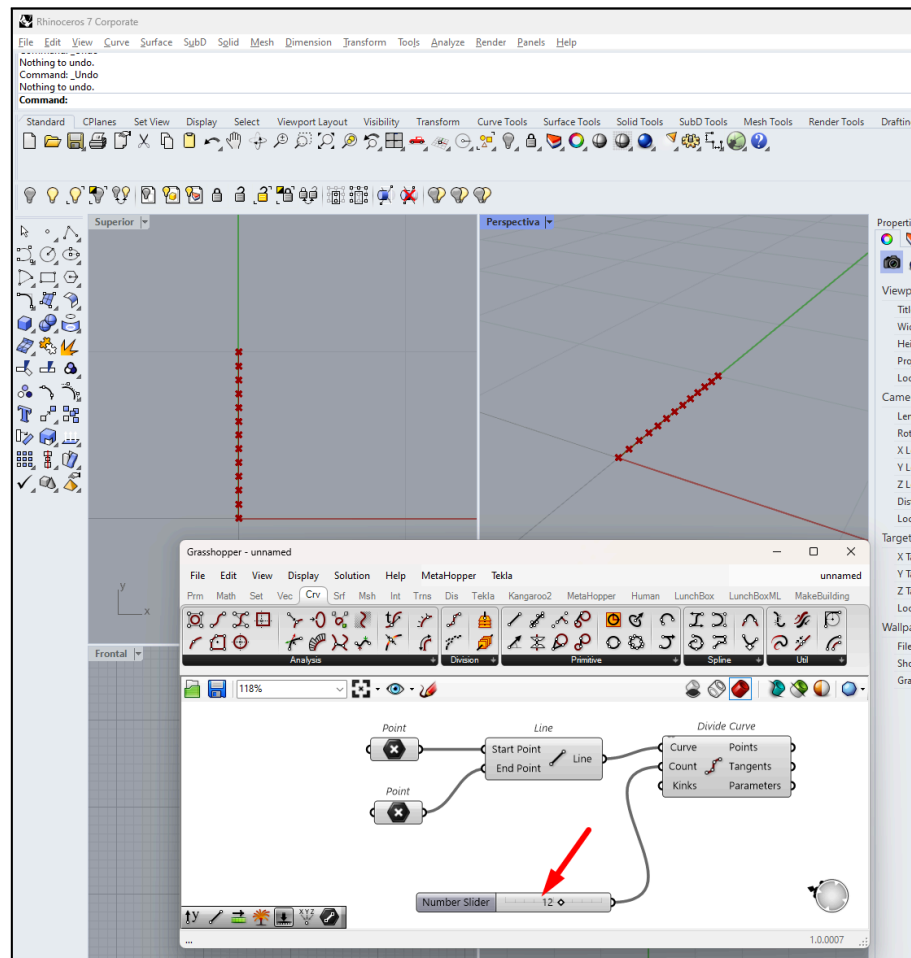


Figura 22. La ventana de Grasshopper muestra el script para generar una línea con divisiones paramétricas y Rhino para visualizar los cambios en tiempo real.

2.4. Tekla Structures como Herramienta de Modelado BIM.

Tekla Structures es un software de modelado de información de construcción (BIM) desarrollado por Trimble, ampliamente reconocido en la industria de la construcción por su capacidad para manejar modelos detallados y precisos en proyectos arquitectónicos, estructurales y de ingeniería. Diseñado para integrar múltiples disciplinas, Tekla Structures se especializa en la creación de modelos tridimensionales que contienen información constructiva y analítica, permitiendo una colaboración eficaz entre los diferentes actores de un proyecto.

Su fortaleza radica en su capacidad para modelar desde pequeños componentes hasta proyectos de gran envergadura con una precisión excepcional, adaptándose tanto a estructuras metálicas como de concreto y otros materiales. Además, Tekla permite gestionar proyectos desde la etapa de diseño conceptual hasta la construcción, optimizando tiempos y recursos.

2.4.1. Características Principales de Tekla Structures.

Tekla Structures destaca por su capacidad para modelar estructuras con un nivel de detalle excepcional, abarcando componentes específicos como conexiones, refuerzos y ensamblajes. Esto permite generar modelos precisos que optimizan tanto la fabricación como la construcción, reduciendo errores y desperdicios.

El software se integra con una amplia gama de herramientas y formatos BIM, lo que facilita la colaboración interdisciplinaria y la comunicación entre equipos de diseño y construcción. Además, ofrece compatibilidad con análisis estructural, permitiendo verificar la estabilidad y resistencia de las estructuras directamente desde el modelo.

Otra de sus características clave es la automatización de tareas repetitivas, como la generación de planos y listas de materiales, lo que ahorra tiempo y mejora la eficiencia en los flujos de trabajo. Tekla también es una herramienta valiosa para proyectos de construcción modular, asegurando una planificación y ejecución precisas en cada etapa del proyecto.

2.4.2. Ventajas de Tekla en la Ingeniería Estructural.

Tekla Structures ofrece múltiples ventajas en la ingeniería estructural, comenzando por su precisión y capacidad para modelar con un nivel de detalle que incluye conexiones, refuerzos y ensamblajes complejos. Esto garantiza que todos los elementos del modelo sean funcionales y listos para su construcción.

El software optimiza recursos al generar automáticamente listas de materiales y datos de fabricación, lo que minimiza el desperdicio y reduce costos. Además, su interoperabilidad permite la integración con herramientas de diseño y análisis, mejorando la coordinación entre disciplinas como arquitectura, ingeniería y construcción.

Tekla reduce significativamente los errores en proyectos gracias a su capacidad para simular condiciones reales y detectar conflictos antes de llegar al sitio de obra. Su versatilidad lo hace ideal para una amplia variedad de proyectos, desde estructuras industriales hasta infraestructuras complejas, convirtiéndolo en una herramienta imprescindible para ingenieros estructurales.

2.4.3. Interacción entre Tekla y Grasshopper.

La integración entre Tekla Structures y Grasshopper combina la flexibilidad del diseño paramétrico con la precisión constructiva del entorno BIM. Esta conexión permite automatizar y estandarizar modelos detallados, optimizando el flujo de trabajo al reducir errores y mejorar la eficiencia.

La capacidad de ajustar parámetros en tiempo real en Grasshopper, reflejándose automáticamente en Tekla, facilita la exploración de alternativas de diseño y la resolución de geometrías complejas. Además, esta interoperabilidad mejora la colaboración entre equipos multidisciplinarios al garantizar actualizaciones dinámicas en los modelos.

La integración se ha aplicado exitosamente en proyectos de alta precisión como puentes y estructuras industriales, consolidándose como una herramienta clave para optimizar recursos y garantizar la exactitud en el diseño y la construcción.

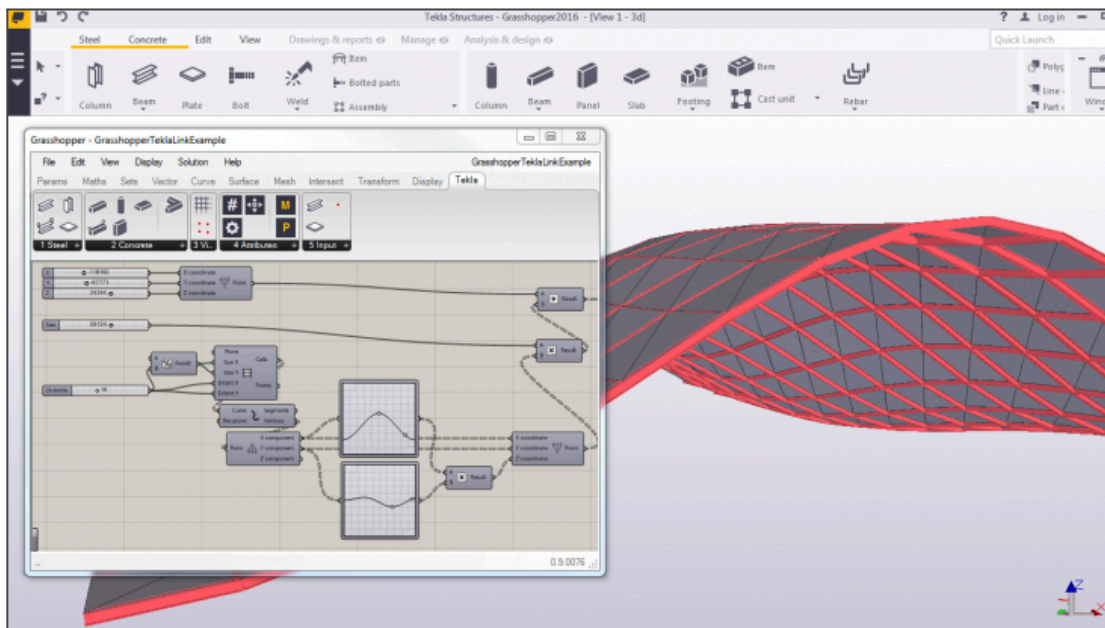


Figura 23. Modelo paramétrico trabajando en conjunto con Tekla Structures.

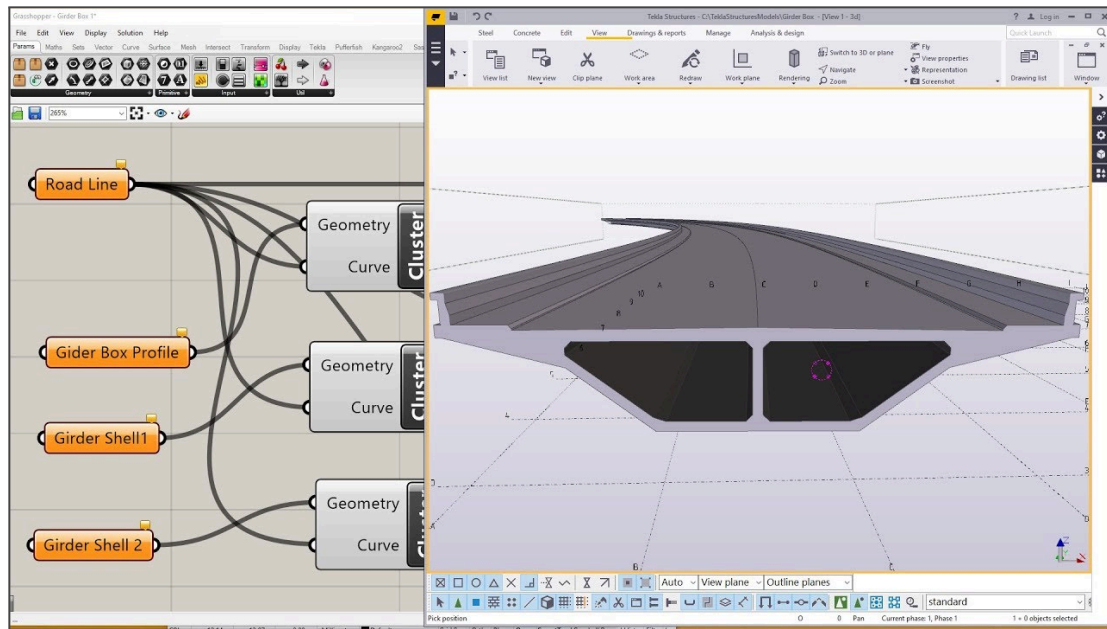


Figura 24. Ejemplo de un puente modelado en Tekla y modificado en Grasshopper mediante parámetros visuales.

La interoperabilidad entre Tekla Structures y Grasshopper es intuitiva y eficiente, diseñada para facilitar su uso incluso a quienes no poseen conocimientos avanzados en programación. La herramienta de enlace entre ambos programas permite una conexión directa y dinámica, donde los elementos modelados en Tekla pueden ser gestionados y parametrizados a través de Grasshopper, proporcionando una integración fluida.

En la paleta de herramientas de Grasshopper para Tekla, se encuentran botones específicos que habilitan la creación y manipulación de distintos componentes del modelo. Por ejemplo, los botones para crear partes, atributos y componentes estructurales permiten trasladar directamente los datos de Tekla a Grasshopper y viceversa, asegurando una sincronización continua entre ambos entornos. Además, incluye botones para modificaciones geométricas y adiciones personalizadas, que amplían las

capacidades de diseño y automatización.

Esta integración mejora la productividad, y también optimiza la precisión y la capacidad de ajustar el diseño en tiempo real, permitiendo iteraciones rápidas y la exploración de múltiples variantes. Gracias a estas herramientas, trabajar entre Tekla y Grasshopper se convierte en un proceso eficiente y colaborativo, ideal para proyectos complejos que demandan adaptabilidad y precisión.

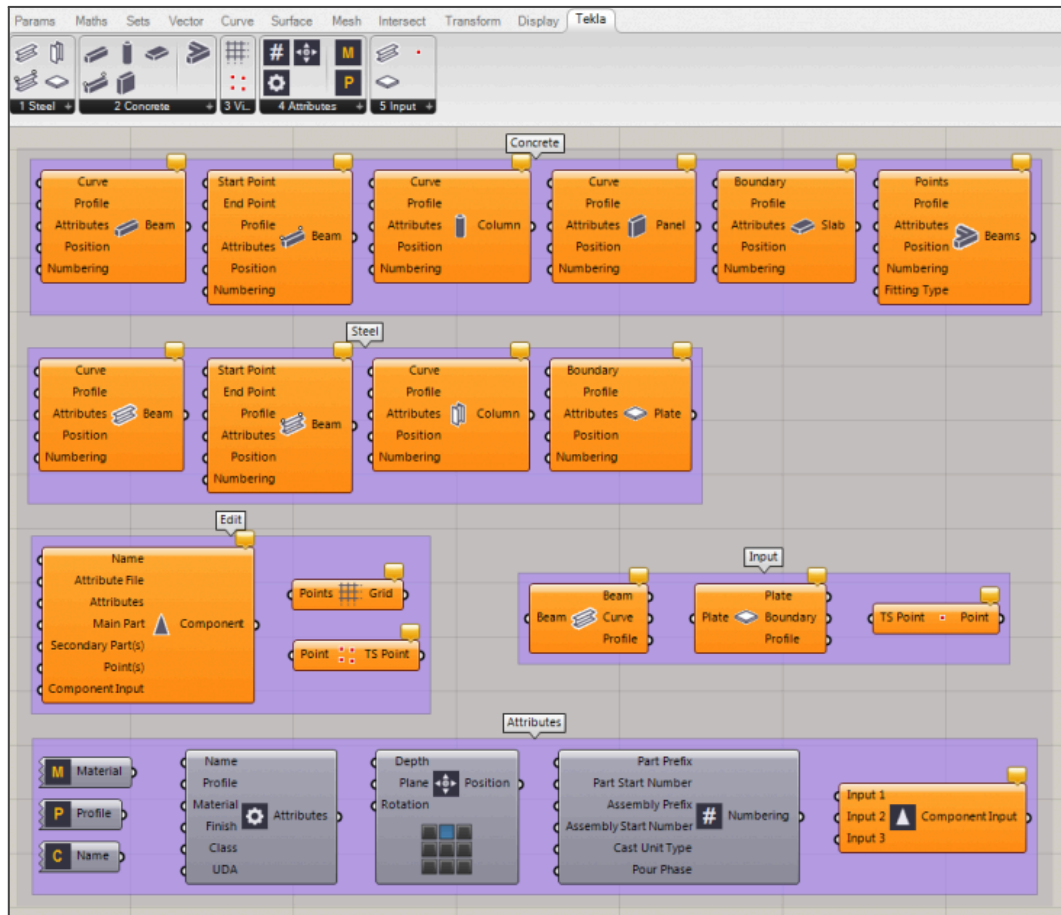


Figura 25. Plugin de Grasshopper para Tekla. Esta aplicación permite la comunicación bilateral entre ambos softwares para la modelación y atributos de parte.

2.5. Impacto del Modelado Paramétrico: Eficiencia y Adaptabilidad.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el modelado paramétrico ha redefinido los procesos de diseño y construcción, consolidándose como una herramienta clave en la mejora de la eficiencia y la adaptabilidad en proyectos arquitectónicos y de ingeniería estructural. Gracias a su capacidad para automatizar tareas, optimizar recursos y permitir ajustes dinámicos, el modelado paramétrico ha transformado los flujos de trabajo tradicionales, adaptándose a los requisitos complejos y cambiantes de los entornos modernos.

2.5.1. Eficiencia en el Diseño Estructural.

La eficiencia es uno de los beneficios más notables del modelado paramétrico, ya que permite optimizar el uso de tiempo, materiales y recursos. Mediante la creación de relaciones lógicas entre los componentes de un modelo, se pueden realizar ajustes globales en el diseño sin necesidad de modificar cada elemento manualmente.

- Automatización de Procesos:

El modelado paramétrico elimina la repetición de tareas al automatizar modificaciones en todos los elementos relacionados. Por ejemplo, al cambiar la altura de un edificio, todos los elementos conectados, como columnas y vigas, se actualizan automáticamente para mantener la coherencia estructural.

Según Autodesk, la automatización en el modelado paramétrico permite reducir significativamente los errores humanos, mejorando la

precisión y velocidad del diseño ([Autodesk](#)⁸).

- Optimización de Materiales y Costos:

Las herramientas paramétricas permiten simular distintas configuraciones de diseño para seleccionar las que ofrecen el mejor rendimiento en términos de costos y sostenibilidad. Esto se traduce en un uso más eficiente de los materiales y una reducción de los residuos. Un artículo de Valbric destaca que el diseño paramétrico contribuye a la sostenibilidad al minimizar el impacto ambiental mediante el uso inteligente de recursos ([Valbric](#)⁹).

- Generación de Variantes Rápidas:

La capacidad de crear y evaluar múltiples variantes de diseño en poco tiempo fomenta la innovación y asegura que las decisiones estén respaldadas por análisis exhaustivos. Repower Fashion menciona que el modelado paramétrico permite explorar soluciones adaptativas y optimizadas para cualquier proyecto ([Parametriks - Repower Fashion Collective](#)¹⁰).

2.5.2. Adaptabilidad ante Cambios de Diseño.

La adaptabilidad del modelado paramétrico lo convierte en una herramienta esencial para gestionar cambios en proyectos complejos,

⁸ Ver más en <https://www.autodesk.com>

⁹ Ver artículos en <https://valbric.com>

¹⁰ Ver experiencia en <https://repowerfashion.org/recurso/parametriks/>

respondiendo de manera eficiente a nuevas condiciones o requerimientos.

→ Respuestas Dinámicas a Modificaciones:

Los parámetros definidos en un modelo permiten realizar cambios globales que se reflejan de manera inmediata en todo el diseño. Por ejemplo, si un cliente solicita un cambio en la distribución de una planta, el modelo se ajusta automáticamente para reflejar los nuevos requerimientos.

Según Arquitectura Elena Argilés, la adaptabilidad es una de las características clave del modelado paramétrico, permitiendo soluciones personalizadas y flexibles ([Elena Argilés](#)¹¹).

→ Escalabilidad y Flexibilidad:

El modelado paramétrico se adapta tanto a proyectos pequeños como a desarrollos de gran escala. Esta flexibilidad lo hace ideal para gestionar estructuras complejas como puentes, estadios o edificios multifuncionales.

Estoense enfatiza que el parametricismo facilita la creación de formas fluidas y dinámicas que pueden escalarse y ajustarse según las necesidades del proyecto ([Estoense](#)¹²).

¹¹ Ver blog en

<https://www.arquitecturaelenaargiles.com/blog/arquitectura-parametrica-un-diseno-innovador/>

¹² Ver más comentarios en <https://estoense.com>

→ Colaboración Multidisciplinaria:

La integración de modelos paramétricos en entornos BIM permite que equipos multidisciplinarios trabajen de manera sincronizada, adaptándose a cambios en tiempo real y asegurando una comunicación eficaz entre disciplinas.

Un artículo de Autodesk resalta cómo las herramientas BIM y paramétricas mejoran la colaboración al centralizar la información y coordinar cambios de manera eficiente ([Autodesk](#)¹³).

2.6. Relevancia del Modelado Paramétrico en la Formación de Dibujantes Proyectistas.

El modelado paramétrico se ha convertido en un componente esencial para enfrentar los desafíos contemporáneos en la ingeniería estructural y la construcción. Esta metodología no solo transforma la manera en que se diseñan proyectos, sino que también redefine el rol del Dibujante Proyectista al capacitarlo para manejar herramientas avanzadas que mejoran la eficiencia, la adaptabilidad y la precisión en el diseño. En la formación de Dibujantes Proyectistas de la Universidad de Playa Ancha, la incorporación del modelado paramétrico responde directamente a las demandas del mercado laboral y prepara a los estudiantes para integrarse a una industria altamente competitiva.

¹³ Ver en <https://www.autodesk.com>

2.6.1. Importancia en la Educación del Dibujante Proyectista.

El desarrollo de habilidades técnicas avanzadas es crucial para enfrentar la realidad laboral actual, donde la mayoría de los Dibujantes Proyectistas trabaja en el área de ingeniería, especialmente en proyectos de estructuras metálicas (Referencias tesis Johan). Este sector requiere un manejo experto de herramientas como Tekla Structures, que es ampliamente utilizada para crear modelos detallados y adaptativos que facilitan la proyección y ejecución de proyectos complejos.

Además, las empresas de ingeniería, que constantemente enfrentan cambios en los diseños debido a requisitos específicos del cliente o modificaciones de última hora, dependen de profesionales capacitados para gestionar estos ajustes con rapidez y precisión. El modelado paramétrico, integrado en herramientas como Grasshopper y Tekla Structures, permite automatizar estas modificaciones, lo que reduce el tiempo empleado en iteraciones y minimiza los errores. Esto posiciona al Dibujante Proyectista como un actor clave en la eficiencia de los proyectos.

2.6.2. Ventajas Competitivas en el Mercado Laboral.

El modelado paramétrico ofrece diversas ventajas competitivas para los Dibujantes Proyectistas, alineándose con las demandas del mercado laboral y potenciando su relevancia en la industria.

- Demanda por Especialización:

La adopción de herramientas paramétricas y metodologías BIM ha incrementado la demanda por profesionales capacitados en Tekla Structures, brindando mejores oportunidades de empleo y desarrollo.

- Optimización de Procesos:

La automatización y los ajustes en tiempo real permiten reducir tiempos de diseño y mejorar la eficiencia en proyectos complejos, aumentando la productividad de las empresas.

- Adaptabilidad a Proyectos Complejos:

La capacitación en modelado paramétrico permite enfrentar diseños complejos y variables, ofreciendo soluciones innovadoras y prácticas.

- Inserción Laboral:

Los Dibujantes Proyectistas egresados logran incorporarse al mercado en menos de seis meses, y gran porcentaje de ellos utiliza herramientas como Tekla Structures durante su vida profesional.
(Referencia Tesis Johan)

3. CAPÍTULO III: MARCO OPERACIONAL

3.1. Diseño de investigación y tipo de estudio.

El presente estudio adopta un enfoque cualitativo mediante el método de Estudio de Casos, reconocido como una estrategia de investigación eficaz para explorar fenómenos dentro de su contexto específico (Yin, 2018). Este método es particularmente valioso cuando se busca comprender a profundidad procesos y dinámicas en escenarios reales, como la implementación del modelado paramétrico en proyectos estructurales. Según Stake (1995), el Estudio de Casos es ideal para investigaciones que requieren un análisis detallado de sistemas complejos y permiten evaluar el impacto de herramientas como Grasshopper y Tekla Structures en la práctica profesional del Dibujante Proyectista. Este enfoque, al centrarse en proyectos específicos, proporciona datos significativos y relevantes para responder a las preguntas de investigación.

3.2. Universo de estudio.

El universo de estudio incluye proyectos de diseño estructural donde se puedan aplicar herramientas de modelado paramétrico. Dado el alcance de esta investigación, se seleccionarán proyectos de pequeña escala que sean representativos de las actividades que realiza un Dibujante Proyectista en el ámbito de la ingeniería estructural.

3.3. Tipo de Muestra.

La muestra estará conformada por tres proyectos de diseño estructural que cumplan los siguientes criterios: modelos desarrollados o adaptables

para su parametrización en Grasshopper; modelos implementables en Tekla Structures para la documentación constructiva; y proyectos que permitan analizar parámetros clave como eficiencia en el uso de recursos, reducción de errores y capacidad de adaptación a cambios. Ejemplos de posibles proyectos incluyen el modelo paramétrico de una nave industrial pequeña, el diseño de una viga personalizada con refuerzos optimizados y el modelado de una fachada compleja adaptada a condiciones climáticas específicas.

3.4. Método de recogida de datos.

Para la recolección de datos, se utilizarán técnicas como el modelado paramétrico y BIM, que consistirá en la creación de modelos en Grasshopper y su exportación a Tekla Structures, así como iteraciones de diseño para analizar eficiencia y adaptabilidad. Se realizarán comparaciones cualitativas entre el método paramétrico y métodos tradicionales de modelado, observando tiempos de diseño, recursos utilizados y calidad del modelo final. Además, se evaluarán documentos generados en Tekla Structures, como planos, reportes y listas de materiales, registrando cambios realizados durante las iteraciones. Finalmente, se documentará el flujo de trabajo y los desafíos encontrados durante el proceso de modelado.

3.5. Instrumento utilizado.

El principal instrumento de análisis será un esquema de evaluación que incluirá métricas de eficiencia, como tiempo empleado en el diseño, cantidad de iteraciones necesarias y optimización de recursos. También se considerarán métricas de adaptabilidad, como tiempo requerido para

implementar cambios y número de ajustes realizados sin errores. Por último, se incluirán métricas de precisión, en términos de consistencia y calidad del modelo generado, registrando errores generados.

A continuación, se muestra un ejemplo de métrica de eficiencia que se utilizará en el estudio de casos.

Métrica	Indicador Principal	Qué Mide	Objetivo
Eficiencia	Tiempo total empleado	Tiempo requerido para completar el diseño inicial o tareas específicas.	Identificar el método más rápido y eficiente en términos de tiempo.
Adaptabilidad	Cantidad de iteraciones necesarias	Número de ajustes realizados para implementar cambios exitosamente.	Determinar qué método permite adaptarse más fácilmente a las modificaciones.
Precisión	Cantidad de errores cometidos	Número de inconsistencias o fallos detectados en el modelo.	Evaluar qué método produce resultados más exactos y consistentes.

Tabla 4: Este método muestra las métricas y su propósito de manera flexible, para que puedan aplicarse a diferentes escenarios sin depender de un caso específico.

4. CAPÍTULO IV: PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1. Introducción

El presente capítulo detalla el procesamiento y análisis de los datos obtenidos mediante la aplicación de herramientas de modelado paramétrico y métodos tradicionales. Se presentan los criterios de selección de los proyectos, la metodología empleada para el análisis, los indicadores utilizados para evaluar los resultados y un análisis comparativo de los datos recolectados. El objetivo es demostrar las ventajas del modelado paramétrico en términos de eficiencia, adaptabilidad y precisión en entornos BIM.

4.1.1. Criterios de Selección de Proyectos

Los criterios utilizados para la selección de proyectos aseguran que estos sean relevantes y reflejen problemas reales que enfrentan los Dibujantes Projectistas en su práctica profesional. Se busca que los ejemplos sean útiles y sean manejables dentro de las limitaciones de tiempo, recursos y herramientas disponibles, como Grasshopper y Tekla Structures. Asimismo, los proyectos permiten aprovechar las ventajas del modelado paramétrico en un entorno BIM.

1. Escala del Proyecto.

Se eligieron proyectos de pequeña escala y de aplicación simplificada debido a su facilidad de manejo dentro de los límites de tiempo y recursos disponibles para esta investigación. Esto permite centrarse en los aspectos técnicos del modelado paramétrico sin complicaciones innecesarias asociadas con proyectos de mayor envergadura.

2. Aplicabilidad del Modelado Paramétrico.

Los proyectos seleccionados deben ser lo suficientemente simples como para permitir la parametrización mediante Grasshopper, pero a la vez desafiantes para demostrar las ventajas del enfoque paramétrico frente al tradicional. Esto incluye:

- Configuración de parámetros geométricos (por ejemplo, altura, ancho, dimensiones de elementos conectados).
- Distribución y ajustes automáticos de elementos asociados, como por ejemplo, elementos de anclaje.

3. Relevancia Profesional.

Se priorizan proyectos que reflejen tareas comunes en la práctica profesional de los Dibujantes Proyectistas enfocado en el campo de la ingeniería civil para proyectos estructurales que sean usuales y repetitivos. Esto incluye casos donde se requiera realizar ajustes frecuentes en el diseño, como cambios de dimensiones o redistribución de elementos.

4. Factibilidad Técnica.

Se consideraron únicamente proyectos que pueden ser modelados utilizando Grasshopper y Tekla Structures, herramientas disponibles para esta investigación. Además, los proyectos seleccionados no requieren hardware adicional ni licencias específicas más allá de las ya adquiridas.

Justificación de los Criterios.

Los criterios seleccionados permiten mantener un enfoque práctico y aplicable al contexto profesional del Dibujante Projectista. Además, aseguran que los resultados obtenidos sean significativos para evaluar las ventajas del modelado paramétrico y su comparación con métodos tradicionales.

4.1.2. Metodología de Análisis

La metodología de análisis propuesta está diseñada para aplicarse de manera general a distintos casos de estudio, permitiendo evaluar proyectos que varían en escala y complejidad. El enfoque principal es comparar los resultados obtenidos -por una parte- mediante el modelado tradicional, utilizando herramientas no paramétricas en Tekla Structures y -por otra parte- el modelado paramétrico, utilizando Grasshopper conectado con Tekla Structures. Los proyectos serán analizados en orden de complejidad, comenzando con un caso simplificado y avanzando hacia diseños más complejos, asegurando una evaluación progresiva y estructurada.

1. Proceso General

El análisis de cada caso de estudio incluye los siguientes pasos:

→ Definición del Proyecto

- ◆ Se establecen los parámetros iniciales del diseño, como dimensiones, elementos estructurales y condiciones específicas.
- ◆ Se definen los cambios a implementar en el modelo (por

ejemplo, ajustes en dimensiones o configuraciones) para medir la capacidad de respuesta del enfoque utilizado.

→ **Modelado Tradicional**

- ◆ El modelo inicial se construye manualmente utilizando herramientas no paramétricas de Tekla Structures.
- ◆ Los ajustes definidos se realizan manualmente, registrando el tiempo empleado y documentando los errores o inconsistencias detectadas.

→ **Modelado Paramétrico**

- ◆ El modelo se parametriza utilizando Grasshopper, estableciendo relaciones dinámicas entre los elementos del diseño.
- ◆ Los cambios se implementan ajustando los parámetros definidos, evaluando la eficiencia y precisión del proceso.

→ **Comparación de Resultados**

- ◆ Los datos recolectados en ambos enfoques se analizan para identificar diferencias en eficiencia, adaptabilidad y precisión.

2. Orden de Análisis por Complejidad

Para garantizar un enfoque progresivo, los casos de estudio se analizarán en el siguiente orden:

- A. **Caso Simplificado:** Proyectos de pequeña escala y geometría básica, como una columna con placa de anclaje.

B. **Caso Intermedio:** Proyectos con elementos adicionales, como vigas con refuerzos o conexiones complejas.

C. **Caso Complejo:** Proyectos de mayor escala que incluyan múltiples elementos interconectados.

Esta progresión permite validar la metodología en distintos niveles de complejidad y generar resultados comparativos relevantes.

Plantilla General de Metodología

Fase	Modelado Tradicional	Modelado Paramétrico
Definición del Proyecto	Establecer parámetros iniciales y objetivos.	Establecer parámetros iniciales y objetivos.
Construcción inicial	Creación manual del modelo en Tekla Structures.	Parametrización de geometrías en Grasshopper.
Implementación de cambios	Cambios realizados manualmente.	Cambios reflejados automáticamente.
Validación	Validación en Tekla con ajustes manuales.	Validación en Tekla con ajustes automáticos.

4.1.3. Indicadores de Evaluación

Los indicadores de evaluación permiten medir de manera objetiva el desempeño del modelado paramétrico y tradicional, asegurando una comparación clara entre ambos enfoques. Estos indicadores están diseñados para capturar aspectos clave del proceso de diseño, como la eficiencia, la adaptabilidad y la precisión, aplicándolos a cada caso de estudio definido.

1. Indicador: Eficiencia

La eficiencia mide el tiempo requerido para completar el diseño inicial y realizar los cambios especificados en cada caso de estudio.

Aspectos a evaluar:

- Tiempo total invertido en la construcción del modelo inicial.
- Tiempo empleado en realizar ajustes o cambios en las especificaciones del diseño.

Criterios de medición:

- **Modelado tradicional:** Se mide el tiempo empleado en realizar manualmente cada cambio.
- **Modelado paramétrico:** Se mide el tiempo necesario para ajustar los parámetros definidos y verificar los resultados.

2. Indicador: Adaptabilidad

La adaptabilidad evalúa la facilidad y rapidez con la que cada enfoque responde a los cambios solicitados en el diseño.

Aspectos a evaluar:

- Número de iteraciones necesarias para implementar cambios en el diseño.
- Capacidad para realizar ajustes dinámicos sin necesidad de redibujar el modelo desde cero.

Criterios de medición:

- **Modelado tradicional:** Cada cambio se realiza de manera manual, lo que puede incrementar el número de iteraciones necesarias.
- **Modelado paramétrico:** Los ajustes dinámicos permiten implementar cambios rápidamente con menos iteraciones.

3. Indicador: Precisión

La precisión mide la calidad del modelo generado, considerando errores detectados y correcciones necesarias durante el proceso.

Aspectos a evaluar:

- Número de errores detectados en cada iteración.
- Calidad final del modelo en términos de cumplimiento de parámetros definidos y especificaciones técnicas.

Criterios de medición:

- **Modelado tradicional:** La falta de automatización puede generar inconsistencias al realizar ajustes manuales.
- **Modelado paramétrico:** La vinculación de parámetros reduce el margen de error al realizar cambios.

La siguiente tabla resume los indicadores de evaluación que se aplicarán a cada caso de estudio

Indicador	Aspecto Evaluado	Método de Medición	Criterios
Eficiencia	Tiempo empleado en el diseño	Registro del tiempo total de modelado y ajustes	Menor tiempo implica mayor eficiencia.
Adaptabilidad	Número de iteraciones	Conteo de iteraciones necesarias para cambios	Menos iteraciones reflejan mayor adaptabilidad.
Precisión	Calidad y errores del modelo	Documentación de errores detectados	Menos errores indican mayor precisión del modelo.

4.2. Análisis de Proyectos

4.2.1. Proyecto 1: Diseño Paramétrico de una Columna con Placa de Anclaje

Descripción del Proyecto

El primer caso de estudio consiste en modelar una columna estructural de 3 metros de altura con una placa de anclaje y 4 pernos distribuidos uniformemente. Este diseño fue desarrollado mediante dos enfoques:

1. **Modelado Tradicional:** Utilizando herramientas no paramétricas en Tekla Structures.
2. **Modelado Paramétrico:** Utilizando Grasshopper conectado con Tekla Structures para parametrizar el modelo.

El análisis se realizó evaluando la eficiencia, adaptabilidad y precisión de cada enfoque al realizar ajustes iterativos en el modelo.

Parámetros iniciales:

- Altura de la columna: 3 metros.
- Dimensiones de la placa de anclaje: 400 mm x 400 mm con un espesor de 20 mm.
- Pernos: 4 pernos distribuidos uniformemente.

Cambios definidos para el análisis:

1. Aumentar la altura de la columna de 3 m a 4.5 m.
2. Reducir las dimensiones de la placa de anclaje a 350 mm x 350 mm.
3. Redistribuir automáticamente los pernos según las nuevas dimensiones de la placa.

Resultados del Análisis

El siguiente análisis compara los tiempos y errores registrados en cada enfoque:

Indicador 1: Eficiencia

Actividad	Modelado Tradicional (minutos)	Modelado Paramétrico (minutos)
Diseño inicial	15	7.5
Ajuste de altura de columna	5	2.5
Reducción de dimensiones de placa	5	2.5
Redistribución de pernos	6	3
Total	31	15.5

Observación: El modelado paramétrico fue aproximadamente un 50% más eficiente, especialmente en actividades que involucraron ajustes repetitivos.

Indicador 2: Adaptabilidad

Cambio Realizado	Modelado Tradicional (iteraciones)	Modelado Paramétrico (iteraciones)
Aumento de altura de columna	2	1
Reducción de dimensiones de placa	2	1
Redistribución de pernos	3	1

Observación: La automatización en el enfoque paramétrico permitió que cada cambio se implementara con menos iteraciones, reduciendo significativamente el tiempo y esfuerzo necesario.

Indicador 3: Precisión

Errores en Modelado Tradicional	Errores en Modelado Paramétrico	Errores en Modelado Tradicional
1	0	1
1	0	1
2	1	2

Observación: El modelado paramétrico redujo los errores gracias a la capacidad de vincular parámetros dinámicamente, mientras que el enfoque tradicional mostró inconsistencias en ajustes manuales.

4.2.2. Proyecto 2: Diseño Paramétrico de una Cercha Reticulada

Descripción del Proyecto

Este proyecto se enfoca en el diseño de una cercha reticulada, una estructura comúnmente utilizada en cubiertas de grandes espacios, donde cada modificación puede generar muchas tareas repetitivas. Se utilizaron dos enfoques para realizar el diseño:

1. **Modelado Tradicional:** Creación de la cercha de manera manual, definiendo cada elemento de forma independiente en Tekla Structures.
2. **Modelado Paramétrico:** Generación de un modelo parametrizado mediante Grasshopper, conectado a Tekla Structures, con relaciones dinámicas entre los elementos.

Especificaciones iniciales del diseño:

- Luz: 20 metros.
- Altura máxima: 2 metros.
- Distancia entre nodos: 1.5 metros.
- Componentes estructurales:
 - Cuerda superior e inferior.
 - Diagonales y montantes.
- Perfiles iniciales: HSS (secciones tubulares de acero).

Cambios definidos para el análisis:

1. Incrementar la luz de la cercha de 20 metros a 30 metros.
2. Ajustar la altura máxima de 2 metros a 4 metros.
3. Redistribuir nodos a un máximo de 2.5 metros.
4. Cambiar la sección de los perfiles de HSS a perfiles IPE.

Resultados del Análisis

Indicador 1: Eficiencia

Actividad	Modelado Tradicional (minutos)	Modelado Paramétrico (minutos)
Diseño inicial	8	8
Incremento de luz	2	0.1
Ajuste de altura máxima	1	0.1
Redistribución de nodos	5	0.1
Cambio de perfiles	1	0.1
Total	17	8.4

Observación: El modelado paramétrico permitió reducir el tiempo total en aproximadamente un 50.6%, destacando su eficacia al implementar cambios de forma rápida y automatizada.

Indicador 2: Adaptabilidad

Cambio Realizado	Modelado Tradicional (iteraciones)	Modelado Paramétrico (iteraciones)
Incremento de luz	3	1
Ajuste de altura máxima	3	1
Redistribución de nodos	36	1
Cambio de perfiles	2	1

Observación: La redistribución de nodos en el modelado tradicional requirió 36 iteraciones, lo que evidencia la falta de automatización y el esfuerzo significativo en las modificaciones manuales. Por el contrario, el modelado paramétrico realizó todos los ajustes en una sola iteración, gracias a las relaciones previamente definidas entre los elementos.

Indicador 3: Precisión

Elemento Analizado	Errores en Modelado Tradicional	Errores en Modelado Paramétrico
Cuerda superior e inferior	0	0
Diagonales y montantes	3	1

Observación: En el modelado tradicional, los errores se concentraron en las diagonales y montantes debido a ajustes manuales durante la redistribución de nodos y cambios en las dimensiones. El modelado paramétrico mantuvo una precisión superior gracias a la automatización de las relaciones geométricas entre los elementos.

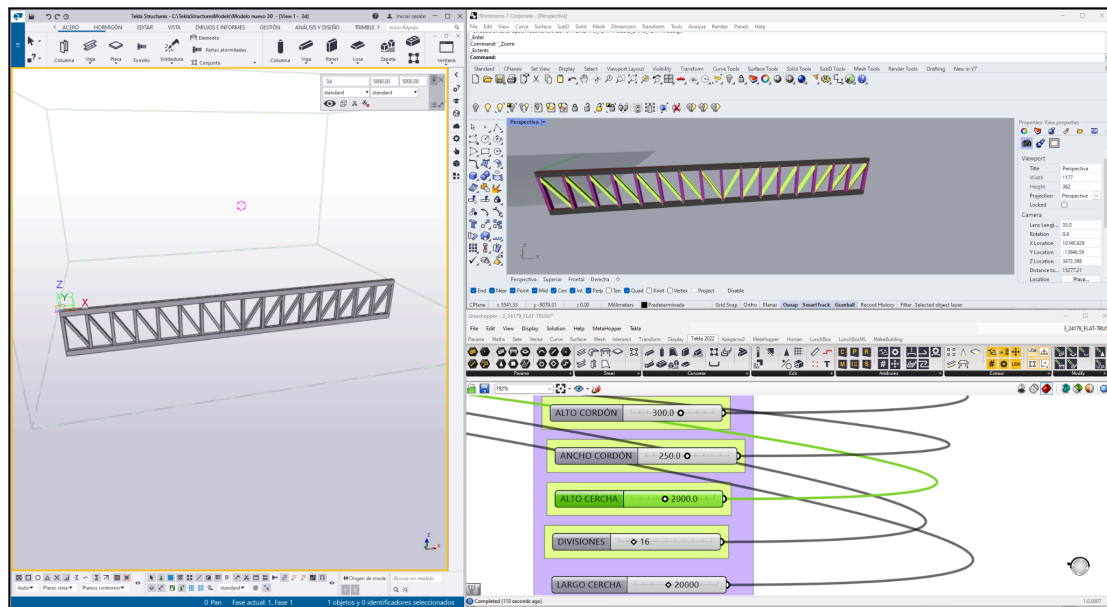


Figura 26. Cercha reticulada parametrizada en Grasshopper, visualizada en Rhino y exportada a Tekla en tiempo real con parámetros iniciales.

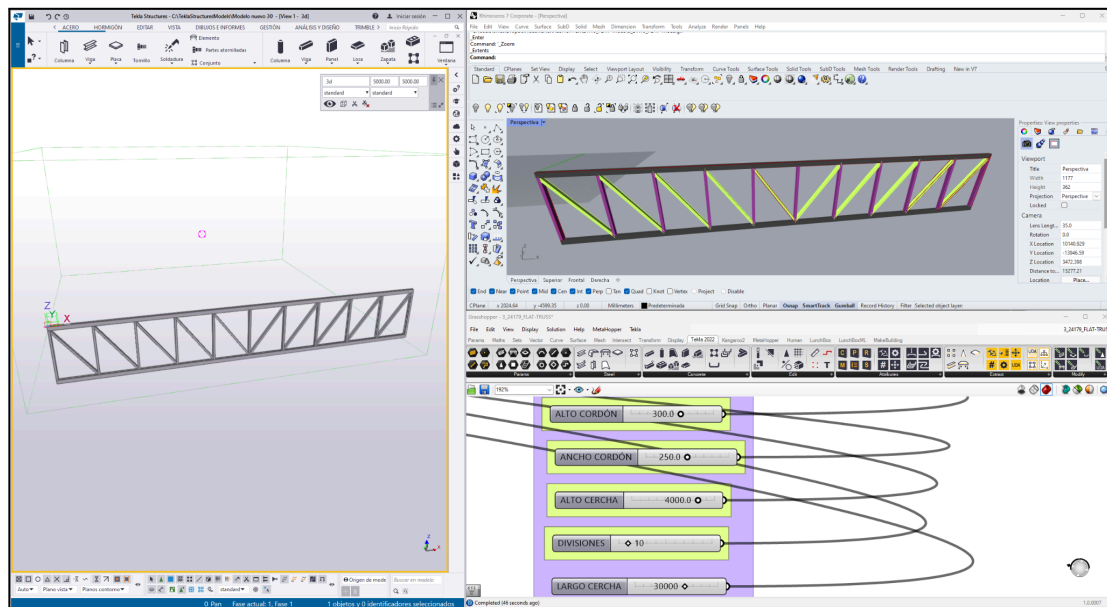


Figura 26. Cercha reticulada parametrizada en Grasshopper, visualizada en Rhino y exportada a Tekla en tiempo real con parámetros modificados.

4.2.3. Proyecto 3: Diseño Paramétrico de una Nave Industrial de Dos Aguas

Descripción del Proyecto

El segundo caso de estudio se centra en el diseño de una nave industrial con estructura metálica de cubierta a dos aguas, común en proyectos de mediana escala. Este diseño fue desarrollado utilizando dos enfoques:

1. **Modelado Tradicional:** Creación de la estructura manualmente utilizando herramientas no paramétricas de Tekla Structures.
2. **Modelado Paramétrico:** Generación de un modelo parametrizado utilizando Grasshopper conectado con Tekla Structures.

Especificaciones iniciales del diseño:

- Dimensiones: 25 m de ancho, 36 m de largo y 10 m de altura hasta la cumbrera.
- Pendiente de la cubierta: 10%.
- Estructura: Pórticos a intervalos de 6 m, conformados por columnas y vigas metálicas IPE 300.
- Elementos adicionales: Correas metálicas para soportar la cubierta a intervalos de 1,5 m.

Cambios definidos para el análisis:

1. Incrementar la altura total a la cumbrera de 10 m a 12 m.
2. Ajustar el intervalo de los pórticos de 6 m a 5 m.
3. Cambiar la distribución de las correas de techo a 1,2 m.

4. Cambiar la pendiente de la cubierta a 15%.
5. Cambiar las dimensiones de ancho a 35 m.

Resultados del Análisis

Indicador 1: Eficiencia

Actividad	Modelado Tradicional (minutos)	Modelado Paramétrico (minutos)
Diseño inicial	30	5
Ajuste de altura de la cumbrera	12	1
Ajuste del intervalo de pórticos	8	1
Cambio en la distribución de correas	12	1
Cambio de dimensiones de ancho	10	1
Total	72	9

Observación: El modelado paramétrico permitió reducir el tiempo total en un 87%, destacando su capacidad para realizar ajustes complejos de manera rápida y eficiente.

Indicador 2: Adaptabilidad

Cambio Realizado	Modelado Tradicional (iteraciones)	Modelado Paramétrico (iteraciones)
Incremento de altura a la cumbrera	3	1
Ajuste del intervalo de pórticos	4	1
Cambio en la distribución de correas	4	1
Cambio de pendiente de	3	1

la cubierta		
Cambio de dimensiones de ancho	4	1

Observación: Los ajustes manuales en el enfoque tradicional incrementaron el número de iteraciones, mientras que en el modelado paramétrico los cambios se implementaron en una sola iteración debido a la vinculación automática de parámetros.

Indicador 3: Precisión

Elemento Analizado	Errores en Modelado Tradicional	Errores en Modelado Paramétrico
Estructura principal	2	0
Correas	3	1
Conexiones	2	1
Pendiente de cubierta	1	0
Dimensiones de ancho	2	0

Observación: El modelado paramétrico redujo significativamente los errores, especialmente en elementos asociados con cambios geométricos como la pendiente y las dimensiones de la nave.

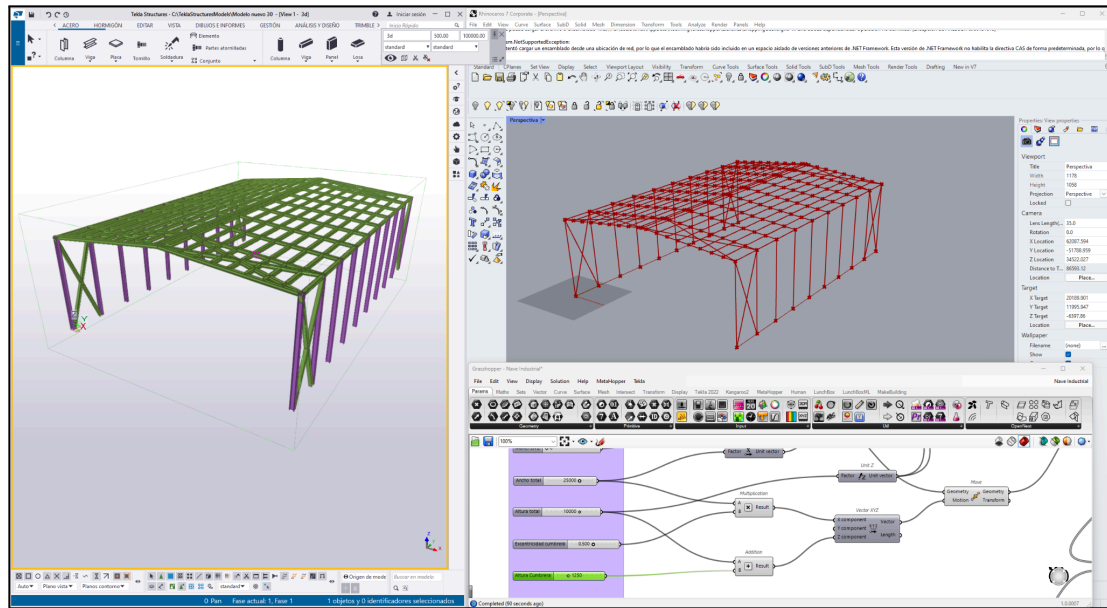


Figura 28. Nave industrial parametrizada en Grasshopper, visualizada en Rhino y exportada a Tekla en tiempo real con parámetros iniciales.

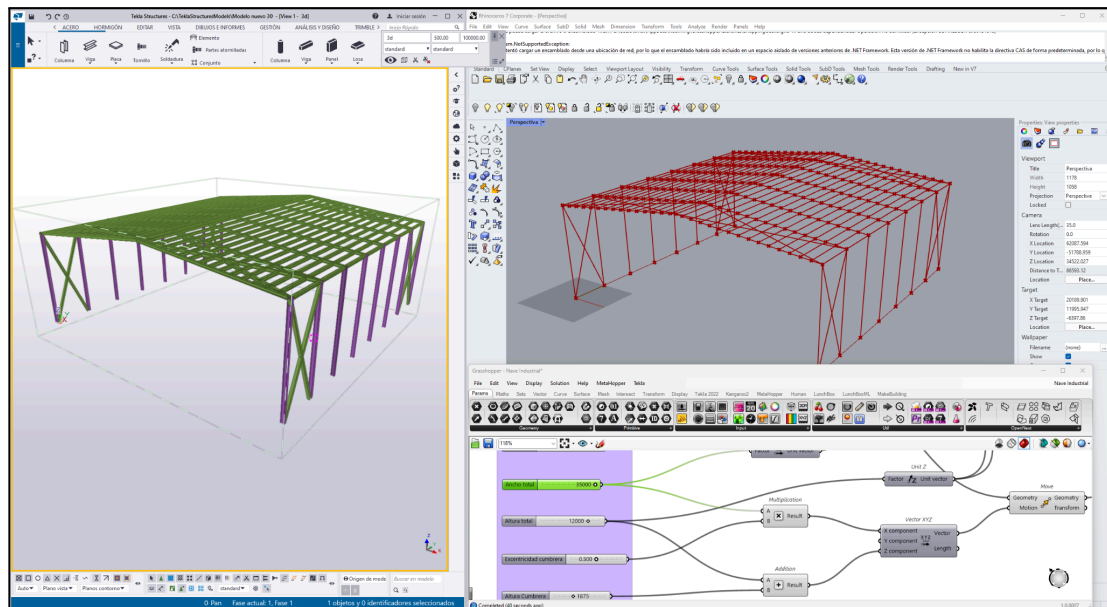


Figura 29. Nave industrial parametrizada en Grasshopper, visualizada en Rhino y exportada a Tekla en tiempo real con parámetros modificados.

4.3 Comparación de Resultados

4.3.1 Resultados del Modelado Paramétrico

El modelado paramétrico destacó como la solución más eficiente y precisa en todos los proyectos, permitiendo implementar cambios complejos de forma rápida y con un margen de error reducido.

- **Eficiencia:**

En el Proyecto 1 (columna con placa de anclaje), el tiempo total se redujo en un 58.7%. En el Proyecto 2 (cercha reticulada), la reducción fue del 50.6%, mientras que en el Proyecto 3 (nave industrial) alcanzó el 79%.

- **Adaptabilidad:**

Los ajustes realizados en el enfoque paramétrico requirieron una sola iteración por cambio en todos los proyectos, gracias a la automatización y vinculación dinámica de parámetros.

- **Precisión:**

Los errores fueron mínimos: 0 en el Proyecto 1, 1 en el Proyecto 2 y 1 en el Proyecto 3. Esto resalta la confiabilidad del modelado paramétrico incluso en escenarios más complejos.

4.3.2 Resultados del Modelado Tradicional

El enfoque tradicional cumplió con los objetivos de diseño, pero presentó limitaciones significativas en términos de tiempo, iteraciones y precisión.

- **Eficiencia:**

El tiempo total para completar las tareas fue mayor en todos los proyectos. Por ejemplo, en el Proyecto 3 (nave industrial), el modelado tradicional requirió 120 minutos frente a 25.2 minutos del paramétrico.

- **Adaptabilidad:**

Los cambios en el diseño requirieron múltiples iteraciones manuales, incrementando significativamente el esfuerzo y tiempo necesario, especialmente en el Proyecto 2, donde se necesitaron 36 iteraciones para redistribuir nodos.

- **Precisión:**

Se detectaron más errores: 3 en el Proyecto 1, 3 en el Proyecto 2 y 5 en el Proyecto 3. Esto destaca las limitaciones del enfoque tradicional en tareas complejas y repetitivas.

4.3.3 Evaluación Comparativa

La evaluación comparativa se basa en los resultados obtenidos en el estudio del caso y se resume a continuación:

Indicador	Proyecto 1: Columna con Placa de Anclaje (Tradicional)	Proyecto 1: Columna con Placa de Anclaje (Paramétrico)	Proyecto 2: Cercha Reticulada (Tradicional)	Proyecto 2: Cercha Reticulada (Paramétrico)	Proyecto 3: Nave Industrial (Tradicional)	Proyecto 3: Nave Industrial (Paramétrico)
Eficiencia (min)	15	6.2	17	8.4	120	25.2
Adaptabilidad	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta
Precisión (errores)	3	0	3	1	5	1

Interpretación de los Resultados:

- **Eficiencia:**

Proyecto 1: Columna con Placa de Anclaje

El modelado paramétrico permitió una reducción del tiempo total en un 58.7%, disminuyendo de **15 minutos** (tradicional) a **6.2 minutos**. Esto fue posible gracias a la automatización en la creación de la placa y los pernos, lo que evitó la repetición manual de tareas.

Proyecto 2: Cercha Reticulada

En este proyecto, el tiempo total se redujo en un **50.6%**, pasando de **17 minutos** (tradicional) a **8.4 minutos** (paramétrico). La ventaja radicó en la redistribución automática de nodos y ajustes geométricos, tareas que en el enfoque tradicional requirieron mayor esfuerzo manual.

Proyecto 3: Nave Industrial de Dos Aguas

El tiempo total requerido para este proyecto en el modelado tradicional fue de **72 minutos**, mientras que en el paramétrico fue de **9 minutos**, representando una reducción del **87.5%**. Esta mejora significativa se debe a la capacidad del modelado paramétrico para automatizar tareas como la redistribución de correas, ajustes en las dimensiones generales y cambios geométricos complejos.

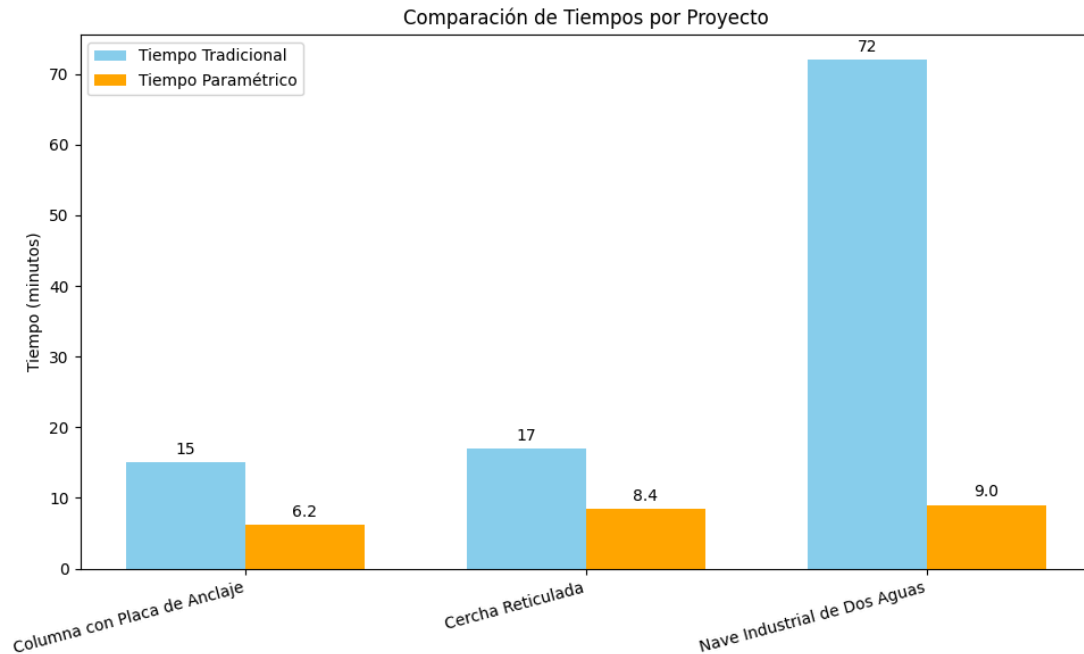
- **Adaptabilidad:**

El modelado paramétrico implementó cambios en una sola iteración en todos los proyectos, destacando su capacidad para gestionar modificaciones complejas con rapidez. En contraste, el enfoque

tradicional necesitó hasta **36 iteraciones** en el Proyecto 2, evidenciando sus limitaciones.

Precisión:

Los errores en el modelado tradicional fueron más frecuentes debido al ajuste manual de los elementos y su desconexión geométrica. En el enfoque paramétrico, los errores fueron mínimos o inexistentes gracias a la vinculación automática entre componentes.



Descripción de la Tabla: El gráfico muestra cómo el modelado paramétrico reduce significativamente el tiempo necesario para completar cada proyecto en comparación con el método tradicional. En el proyecto de la Columna con Placa de Anclaje, se logró una reducción del 58.7%. En el caso de la Cercha Reticulada, la reducción fue del 50.6%. Finalmente, en el proyecto de la Nave Industrial de Dos Aguas, se alcanzó la mayor reducción, con un 87.5%.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

5.1. Resumen de hallazgos

La investigación demostró que el modelado paramétrico ofrece ventajas claras en comparación con el método tradicional, especialmente en proyectos con mayor nivel de complejidad. En los casos analizados, se observó una notable reducción en los tiempos requeridos para completar los diseños, gracias a la automatización de tareas repetitivas y ajustes geométricos. Esto permitió simplificar procesos que, en el enfoque tradicional, implicarían un trabajo manual mucho más extenso y demandante.

Además, el modelado paramétrico mostró ser una herramienta eficiente para realizar cambios en los diseños. Mientras que el método tradicional requería múltiples intentos para realizar ajustes importantes, el enfoque paramétrico permitía implementar modificaciones de manera inmediata y sin complicaciones, lo que evidenció su capacidad para adaptarse rápidamente a las necesidades del proyecto.

Por otro lado, se detectó que el modelado paramétrico redujo significativamente los errores asociados al diseño, logrando modelos más consistentes y de mayor calidad. Esto se debe a la capacidad de establecer relaciones dinámicas entre los elementos, lo que elimina las inconsistencias que suelen surgir con los ajustes manuales.

A medida que los proyectos aumentan en complejidad, las ventajas del modelado paramétrico se hacen aún más evidentes, sin embargo esto puede significar un desarrollo muy extenso del script paramétrico. En modelos simples, como una columna con placa de anclaje, las diferencias no fueron tan pronunciadas; sin embargo, en diseños más avanzados, como una cercha reticulada o una nave industrial, el ahorro de tiempo y la precisión en los resultados confirmaron el potencial de este enfoque.

En efecto, si la complejidad del proyecto es mayor, también crece la ganancia en términos de eficiencia y ahorro de recursos. Además, es posible reutilizar los modelos paramétricos generados en otras situaciones similares, lo que refuerza la importancia de implementar herramientas paramétricas en proyectos estructurales. Esto es especialmente relevante para Dibujantes Proyectistas que buscan trabajar en proyectos desafiantes.

5.2. Recomendaciones para futuros estudios

A partir de los resultados obtenidos, se sugieren las siguientes recomendaciones para estudios futuros que busquen profundizar en el impacto del modelado paramétrico:

- Ampliar el alcance de los Casos de Estudio en proyectos más complejos, como puentes o edificaciones multipisos, los que permitirán explorar cómo las herramientas paramétricas se desempeñan en entornos con mayor nivel de complejidad técnica.
- Capacitación y formación propuestos en programas educativos que incluyan el uso de software paramétrico en el currículo de los Dibujantes Proyectistas, considerando que su implementación no solo mejora la eficiencia técnica, sino también la exploración crítica gracias a la experimentación en proyectos paramétricos.
- Análisis comparativo entre softwares evaluando el rendimiento de diferentes herramientas paramétricas, como Dynamo-Revit,

Rhino.Inside y Grasshopper, en proyectos similares para determinar cuál ofrece las mayores ventajas según el tipo de proyecto.

- Investigar cómo la implementación de herramientas paramétricas mejora la integración y coordinación entre diferentes disciplinas en entornos BIM colaborativos.
- Automatización Avanzada: Explorar la integración de algoritmos avanzados y diseño generativo con herramientas paramétricas, para optimizar los procesos de modelado.

5.3. Conclusiones finales

A partir del desarrollo de esta investigación, se consolidan las siguientes conclusiones finales, organizadas en torno al cumplimiento del objetivo general, los objetivos específicos y la interrogante de investigación, destacando los hallazgos clave y las implicancias de los resultados obtenidos.

Conclusión respecto al Objetivo General

Objetivo General: Desarrollar un modelo experimental para explorar los beneficios y desafíos de la implementación del modelado paramétrico en un entorno BIM, utilizando Tekla Structures para desarrollar proyectos pequeños y específicos, evaluando su impacto en la eficiencia, adaptabilidad y precisión en el diseño.

El objetivo general de esta investigación fue alcanzado mediante la aplicación de un modelo experimental que permitió analizar a profundidad las ventajas y limitaciones del modelado paramétrico en proyectos estructurales pequeños. Los estudios de caso realizados demostraron que esta metodología es una solución eficiente y precisa para optimizar procesos en entornos BIM. Esto se cuantificó en las tablas de indicadores de evaluación. Además, la implementación de herramientas como Tekla Structures y Grasshopper permitió evidenciar el potencial de esta técnica para adaptarse a cambios de diseño y reducir errores, mejorando significativamente los resultados del diseño estructural en comparación con métodos tradicionales.

También se concluyó que, los modelos paramétricos pueden programarse para funcionar por sí solos (por ejemplo, para desarrollos de prototipos, como galpones modulares) o como apoyo para el modelado tradicional, en donde se desarrollen scripts para modelados repetitivos, tales

como las cerchas reticuladas aplicables a un modelo existente. Esta conclusión cualitativa resulta de la experimentación del alumno tesista.

Respuesta a la Interrogante de Investigación

Interrogante de Investigación: ¿Cómo puede el uso del modelado paramétrico en un entorno BIM, mediante Tekla Structures y Grasshopper de Rhino, potenciar al dibujante proyectista en términos de eficiencia, adaptabilidad y precisión en su trabajo?

El modelado paramétrico, como se evidenció en esta investigación, mejora los procesos de diseño estructural al automatizar tareas repetitivas, reducir errores y optimizar tiempos. Además, su implementación fomenta el desarrollo de competencias avanzadas en los Dibujantes Proyectistas, alineándolos con las demandas tecnológicas actuales del sector de la construcción. La investigación confirma que la incorporación de estas herramientas en la formación académica es crucial para preparar profesionales capaces de afrontar los retos de un mercado laboral cada vez más competitivo.

Conclusiones en Base a los Objetivos Específicos

- **Objetivo Específico N°1:**

Caracterizar la eficiencia de la metodología de modelado paramétrico en proyectos de pequeña escala en Tekla Structures y Grasshopper de Rhino.

Se caracterizó la eficiencia mediante el análisis que confirmó que el modelado paramétrico es altamente eficiente en proyectos pequeños.

La automatización permitió una reducción notable en comparación con el enfoque tradicional. Las herramientas, como Tekla Structures y Grasshopper, utilizadas demostraron ser prácticas y funcionales para optimizar tareas repetitivas y gestionar cambios con rapidez.

- **Objetivo Específico N°2:**

Identificar criterios de adaptabilidad de modelos paramétricos en proyectos individuales frente a cambios simulados.

En el análisis comparativo de cambios se mostró una adaptabilidad superior al implementar modificaciones de diseño con una sola iteración por ajuste en el modelo paramétrico, a diferencia de los cambios manuales que ocurren en el modelado tradicional. La capacidad de actualizar automáticamente todos los elementos relacionados en el modelo ahorró tiempo y minimizó errores, demostrando su utilidad en proyectos con cambios recurrentes.

- **Objetivo Específico N°3:**

Describir criterios de precisión en el modelado de proyectos pequeños creados con modelos paramétricos.

El objetivo se cumplió al describir los criterios de precisión en los modelos generados con herramientas paramétricas. El análisis confirmó que el modelado paramétrico ofrece una mayor coherencia geométrica, exactitud dimensional y reducción de errores manuales.

- **Objetivo Específico N°4:**

Identificar los principales desafíos y limitaciones personales al aprender la metodología del modelado paramétrico en Tekla Structures y Grasshopper.

Mediante el análisis reflexivo de las experiencias personales durante

el desarrollo de esta investigación se encontraron limitaciones como la curva de aprendizaje y la familiarización con herramientas técnicas, especialmente en Grasshopper. También, cambiar el enfoque tradicional a uno paramétrico requirió una reconfiguración en la manera de abordar el modelado estructural. Sin embargo, la experiencia obtenida durante los estudios de caso evidenció que estos desafíos pueden ser superados con capacitación práctica y progresiva, implementando proyectos en casos reales.

Reflexión Final.

El modelado paramétrico demostró ser eficaz al ser capaz de modificar grandes volúmenes de información, realizar ajustes dinámicos y mantener un alto nivel de precisión, tanto en proyectos simples como en escenarios de mayor envergadura. Esto refuerza su importancia como un recurso esencial para el diseño estructural moderno en entornos BIM.

Además, el modelado paramétrico se presenta como una metodología innovadora que redefine los estándares del diseño estructural y la formación profesional. Los resultados de esta investigación confirman que su integración en la enseñanza y en la práctica laboral puede mejorar y preparar a los Dibujantes Proyectistas para enfrentar los desafíos tecnológicos presentes y futuros del sector. La implementación de esta metodología en proyectos reales y en programas educativos son pasos fundamentales para impulsar una evolución en el desarrollo de la profesión del Dibujante Proyectista como un profesional fuertemente ligado a la tecnología.

Por último, cabe acotar que la implementación de la técnica paramétrica dentro de las actividades del proyectista abre un campo de oportunidades en donde es posible desarrollar habilidades tecnológicas

competitivas enfocadas en dar soluciones prácticas que aporten al desarrollo de los proyectos, ampliando la utilización de recursos informáticos y vinculado al profesional con otras áreas como la programación visual y la programación basada en texto.

6. CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA

6.1. Bibliografía

- 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. M. (2014). *Building Information Modeling*. Routledge.
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Taylor & Francis.
- Sacks, R., Eastman, C. M., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Smith, D. K., & Tardif, M. (2009). *Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers*. John Wiley & Sons.
- Manríquez Bugueño, J. R. (2014). Diagnóstico del perfil profesional del Dibujante Proyectista de la Universidad de Playa Ancha, entre los años 2000 al 2013 (Trabajo de título). Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, Chile.
- Figueroa Lizarzaburu, A. E., Lizarzaburu Mora, A. S., & Valarezo Sánchez, A. (2015). *Validez interna y externa de la investigación cualitativa. Contribuciones a las Ciencias Sociales*.

6.2. Linkografía

1. Adobe. (s.f.). *Parametric modeling: Discover the power of procedural creation*. Recuperado de <https://www.adobe.com/mx/products/substance3d/discover/parametric-modeling.html>
2. Autodesk. (s.f.). *Parametric modeling: Revolutionary solutions for design and engineering*. Recuperado de <https://www.autodesk.com/es/solutions/parametric-modeling>
3. ESdesign Barcelona. (s.f.). *¿Qué es el modelado paramétrico?*. Recuperado de <https://www.esdesignbarcelona.com/actualidad/disenio-producto/modelado-parametrico>
4. ArchDaily. (2018). *Torre Generali / Zaha Hadid Architects*. Recuperado de <https://www.archdaily.cl/cl/893324/torre-generalizaha-hadid-architects>
5. Bosch Arquitectura. (s.f.). *Arquitectura paramétrica: Algoritmos y programación al servicio de estructuras complejas*. Recuperado de <https://bosch.com.uy/blog-posts/view/512/arquitectura-parametrica-algoritmos-y-programacion-al-servicio-de-estructuras-complejas?blog=true>
6. Nervous System. (s.f.). *Explorations in generative design and parametric structures*. Recuperado de <https://n-e-r-v-o-u-s.com/>
7. Proving Ground. (2009). *Parametric strategies in design of complex*

forms. Recuperado de

<http://www.theprovingground.org/2009/12/parametric-strategies-in-design-of.html>

8. Successful Software. (2024). *Visual vs text-based programming: Which is better?*. Recuperado de <https://successfulsoftware.net/2024/01/16/visual-vs-text-based-programming-which-is-better>
9. Catálogo Arquitectura. (s.f.). *¿Cuál es el rol de BIM en la cubierta del nuevo Aeropuerto de Santiago?*. Recuperado de <https://www.catalogoarquitectura.cl/cl/bim/cual-es-el-rol-de-bim-en-la-cubierta-del-nuevo-aeropuerto-de-santiago-cl-1577150740>
10. Rhino. (s.f.). *Rhino for architecture: Advanced tools for innovative design*. Recuperado de <https://www.rhino3d.com/es/for/architecture/>
11. Parametric Architecture. (s.f.). *Exploring the future of parametric design*. Recuperado de <https://parametric-architecture.com/>