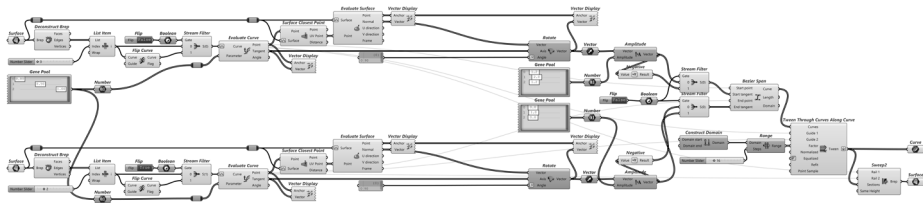
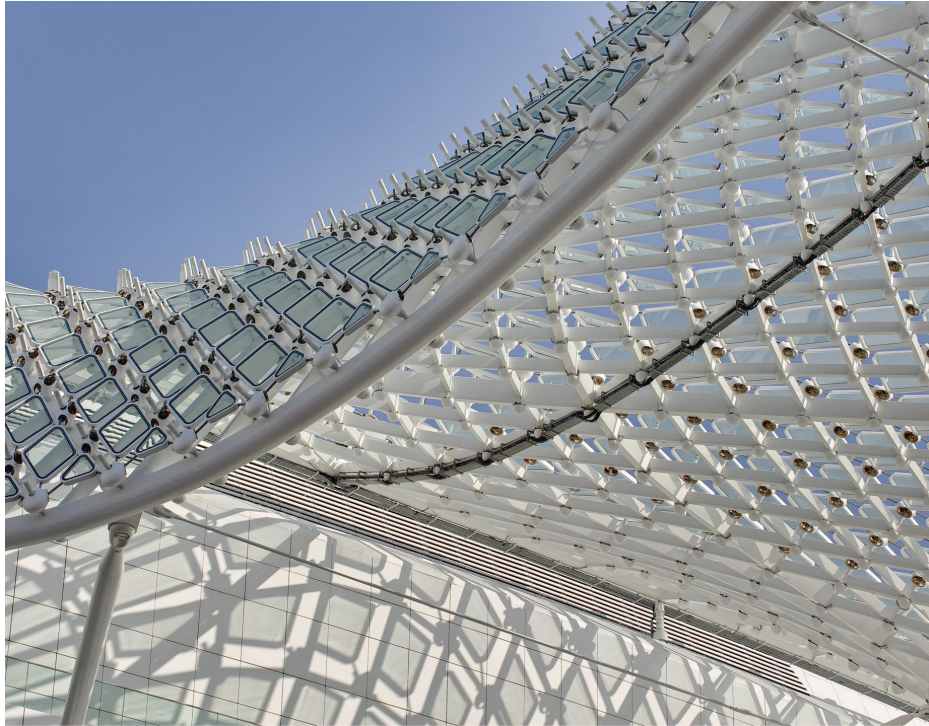


BLENDING

FUSIÓN DE CUBIERTAS ARQUITECTÓNICAS



José María Calderón Busto
Tutora: Sonia Luisa Rueda Pérez

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

BLENDING

FUSIÓN DE CUBIERTAS ARQUITECTÓNICAS

Estudiante

José María Calderón Busto

Tutora

Sonia Luisa Rueda Pérez

Departamento de Matemática Aplicada

Aula TFG 5

María Barbero Liñán, *coordinadora*

José Antonio Flores Soto, *adjunto*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

Índice

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1. FUSIÓN DE CUBIERTAS EN ARQUITECTURA

- 1.1. Evolución de la arquitectura de forma libre
- 1.2. Cuestiones abiertas
- 1.3. Blending

2. HERRAMIENTAS EN CAGD

- 2.1. Programas
- 2.2. Superficies NURBS
- 2.3. Operaciones en Rhinoceros
- 2.4. Algoritmos en Grasshopper
- 2.5. Comparativa de herramientas

3. ALGORITMO DE BLENDING EN GRASSHOPPER

4. MODELIZACIÓN ARQUITECTÓNICA

- 4.1. Galaxy Soho / Zaha Hadid Architects
- 4.2. The Yas Hotel / Asymptote Architecture

CONCLUSIONES

ANEXO: ALGORITMOS GRASSHOPPER

FUENTES

- Bibliografía y recursos digitales
- Procedencia de las ilustraciones

Resumen

Este trabajo tiene como objeto investigar y analizar la fusión de superficies mediante el uso de herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD, *Computer Aided Design*), destacando su uso en el ámbito de la arquitectura. Este proceso, que resulta clave en el diseño avanzado, permite integrar formas complejas y fluidas, ampliando las posibilidades creativas y funcionales del diseño arquitectónico.

Se estudia la evolución de la arquitectura de formas libres y se introduce el problema de la fusión de superficies como una necesidad clave para diseñar y conectar formas complejas.

Se analizan detalladamente las herramientas de diseño geométrico asistido por ordenador (CAGD, *Computer Aided Geometric Design*) en el ámbito de la fusión de superficies, utilizando Rhinoceros y Grasshopper, dos programas de gran importancia en el diseño arquitectónico actual. Se concluye que hay margen de mejora, por lo que se propone desarrollar un nuevo componente para la fusión de superficies en Grasshopper.

Para comprobar lo analizado y estudiado, como la efectividad del nuevo componente propuesto, se realiza una evaluación en dos casos de estudio. A través de estos casos, se busca demostrar cómo la integración de las herramientas y metodologías desarrolladas pueden mejorar el proceso de diseño arquitectónico, optimizando la creación de formas complejas y fluidas.

PALABRAS CLAVE

Arquitectura de forma libre, Superficies NURBS, Fusión de superficies, Blending, Rhinoceros, Grasshopper.

Introducción

En la actualidad, se observa un creciente número de edificios emblemáticos que incorporan pieles y estructuras con formas geométricas complejas. Ante la necesidad de liberar al diseño arquitectónico de las restricciones geométricas, surgen propuestas más flexibles y creativas que adoptan formas irregulares y dinámicas. Las denominadas superficies de forma libre (*Freeform surfaces*) [1], resultan una herramienta fundamental para llevar a cabo este tipo de diseños.

El uso de la geometría de forma libre se ha convertido en una de las características distintivas de la arquitectura moderna [2]. Gracias a los constantes avances en los sistemas constructivos y en las herramientas de Diseño Asistido por Ordenador, es posible crear obras arquitectónicas innovadoras con un estilo único.

Durante las décadas de 1940 y 1950, las necesidades de nuevos diseños en diversas industrias impulsaron el desarrollo de descripciones matemáticas para la geometría de forma libre, curvas y superficies de forma libre o su nombre técnico NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*). Para abordar los problemas que surgieron, fue necesario desarrollar algoritmos matemáticos que pudieran ser implementados y utilizados eficazmente por ordenadores[1].

Con la aparición de las formas libres en la geometría, surgen nuevas cuestiones geométricas y algorítmicas, muchas de estas han sido resueltas con el paso del tiempo. Sin embargo, uno de los principales desafíos que aún no se encuentra completamente resuelto, es la fusión entre superficies, mejor conocida como *blending*. Este proceso sigue siendo un área de investigación activa en el ámbito del diseño arquitectónico, ya que la transición suave entre superficies complejas resulta fundamental para la creación de formas fluidas y continuas.

Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado (TFG) es estudiar y comprender la fusión de superficies en el contexto de la arquitectura, destacando las maneras en las que esta operación puede influir tanto en el diseño final como en la resolución de formas complejas mediante herramientas de CAGD.

Se establecen los siguientes objetivos principales que estructuran el cuerpo del trabajo:

1. Estudiar y comprender la fusión de superficies en el ámbito de la arquitectura.
2. Investigar el estado actual de la operación *blending* en CAGD.
3. Desarrollar un componente de fusión de superficies *\it{blending}* en Grasshopper.
4. Aplicar el nuevo componente a dos casos de estudio reales, modelando y resolviendo problemas reales de fusión de superficies en arquitectura.

Metodología

Los objetivos parciales enunciados en el apartado anterior estructuran los distintos capítulos del trabajo, desde un análisis teórico hasta la aplicación práctica de las herramientas y técnicas estudiadas.

El trabajo empieza con un estudio teórico sobre la evolución de la arquitectura de formas libres, analizando cómo las herramientas de CAD han impulsado el diseño de geometrías complejas y las nuevas posibilidades en el diseño. Se introduce la cuestión de la fusión de superficies como una necesidad clave para conectar formas complejas, destacando su relevancia en proyectos arquitectónicos que exigen transiciones suaves y continuas. Como cierre del marco teórico, que servirá como base fundamental para el desarrollo práctico de los siguientes capítulos, se aporta un primer avance sobre el *blending*, estableciendo así un marco teórico para su implementación en las siguientes fases.

A continuación, se realiza una explicación de las superficies NURBS, ya que estas constituyen la base geométrica de las herramientas de CAGD, empleadas en este trabajo. Los programas utilizados son, Rhinoceros 3D y su complemento Grasshopper, con el apoyo del plugin Flexibility.

Una vez comprendidas las bases, se realiza un análisis y comparación de los comandos y nodos utilizados para la fusión de superficies.

Este análisis proporcionó la información necesaria para desarrollar un componente en Grasshopper para mejorar la fusión de superficies. Específicamente, este componente fue diseñado para automatizar y optimizar el proceso de fusión de superficies.

Creado el componente, se aplicaron las técnicas de fusión de superficies a dos casos de estudio arquitectónicos, con el objetivo de evaluar su aplicabilidad en proyectos reales. Además, se implementaron métodos de panelización sobre las superficies fusionadas, analizando cómo esta técnica influye en el diseño final.

El enfoque metodológico adoptado fue progresivo y conectado, partiendo desde el estudio teórico hasta la implementación práctica. Todo el proceso estuvo respaldado por documentación gráfica, elaborada a partir de modelos 3D y algoritmos, lo que facilitó una comprensión clara de los resultados obtenidos y de la evolución del trabajo.

Para la creación de figuras, que queda reflejado en las capturas de los modelos, se utilizaron las siguientes herramientas específicas en Rhinoceros 3D y Grasshopper:

- En Rhinoceros, se empleó el comando `ViewCaptureToFile` para generar imágenes de alta calidad.
- En Grasshopper, se utilizaron los plugins SunGlasses (para visualizar los nombres de los nodos en la interfaz) y Palette (para personalizar los colores de la interfaz). Las capturas de alta resolución se obtuvieron utilizando la opción Export High-Resolution Image desde el menú de archivo.

1. Fusión de cubiertas arquitectónicas

En este primer apartado se realiza un estudio sobre la evolución de la arquitectura de forma libre, desde sus inicios con el arquitecto catalán modernista Antoni Gaudí, hasta la actualidad, con la arquitecta Zaha Hadid como referente.

1.1. Evolución de la arquitectura de forma libre

En el siglo XIX, la industrialización y los avances en materiales de construcción como el hierro, el acero y el hormigón armado, otorgaron a los arquitectos una libertad sin precedentes para explorar nuevas formas y estilos. Además, la industrialización introdujo técnicas de producción en masa, que abarataron costos y aceleraron los tiempos de construcción, haciendo posibles proyectos de mayor envergadura [1].



Figura 1.1: Modelo físico, Antoni Gaudí.

Uno de los primeros arquitectos en explorar las formas libres fue Antoni Gaudí (1852-1926), quien alcanzó una profunda comprensión de la estática y la forma de las superficies mediante el desarrollo de técnicas innovadoras de búsqueda de formas (*form-finding techniques*) y el uso de modelos físicos (Figura 1.1). Estas técnicas le permitieron diseñar estructuras que combinaban funcionalidad, estética y estabilidad estructural de manera pionera.

Dos de sus obras más emblemáticas que ejemplifican este enfoque son la Basílica de la Sagrada Familia, 1882-Actualidad (Figura 1.2) y la Casa Milà, 1905-1907 (Figura 1.3). En la Sagrada Familia, Gaudí utilizó modelos colgantes invertidos como se observa en la Figura 1.1, para calcular las formas óptimas de los arcos y bóvedas, mientras que en la Casa Milà exploró el potencial plástico del hierro y la piedra para crear formas ondulantes y orgánicas que desafiaban las convenciones arquitectónicas de la época.



Figura 1.2 : Basílica de la Sagrada Familia, Antoni Gaudí.



Figura 1.3: Casa Milà, Antoni Gaudí.

Uno de los aspectos que marcó un cambio significativo en la arquitectura de superficies de forma libre fue el uso del hormigón armado. Este material permitió la construcción de formas innovadoras y desafiantes, alcanzando su mayor auge durante la década de 1960. Su capacidad para moldearse en casi cualquier forma y su resistencia estructural lo convirtieron en una herramienta esencial para los arquitectos de la época.

Entre los ejemplos más icónicos de esta tendencia se encuentran Notre Dame du Haut, 1950-1955 (Figura 1.4) de Le Corbusier, y el Terminal TWA, 1956-1962 (Figura 1.5) de Eero Saarinen. Ambos proyectos reflejan cómo el hormigón armado posibilitó la materialización de geometrías libres que habrían sido impensables con materiales tradicionales.



Figura 1.4: Notre Dame du Haut, Le Corbusier.

Figura 1.5: Terminal TWA, Eero Saarinen.

No obstante, pese a las numerosas ventajas que presentaba este material, el hormigón armado presentó también limitaciones significativas, como su elevado peso, altos costos de producción y una gran demanda de mano de obra especializada para su colocación y acabado. Estas desventajas impulsaron la búsqueda de materiales más ligeros y eficientes que permitieran seguir explorando la libertad formal.

Un ejemplo exitoso de prefabricación es el de las cáscaras esféricas que conforman el icónico techo de la Ópera de Sídney, 1957-1973 (Figura 1.6), diseñada por Jørn Utzon. Este proyecto no solo se convirtió en un símbolo de innovación arquitectónica, sino que también marcó un hito en el uso de formas complejas gracias a la aplicación de técnicas de prefabricación avanzadas.



Figura 1.6: Ópera de Sídney, Jørn Utzon.

La construcción de este edificio demostró que las formas libres complejas requieren técnicas sofisticadas tanto para su descripción geométrica, basada en cálculos matemáticos avanzados, como para la integración de principios estructurales y de fabricación.

Uno de los primeros arquitectos en utilizar herramientas de CAGD para construir formas libres fue el arquitecto Frank O. Gehry. Reconocido por su estilo vanguardista y su enfoque experimental, Gehry empleó estas herramientas para diseñar formas que se aproximan a superficies desarrollables.

Un ejemplo destacado de esta técnica es el Museo Guggenheim de Bilbao, 1991-1997 (Figura 1.7), una obra maestra de la arquitectura contemporánea. En este proyecto, Gehry utilizó software especializado para modelar las formas curvas y complejas del edificio, lo que facilitó no solo su diseño, sino también la planificación de su construcción mediante paneles de titanio prefabricados.

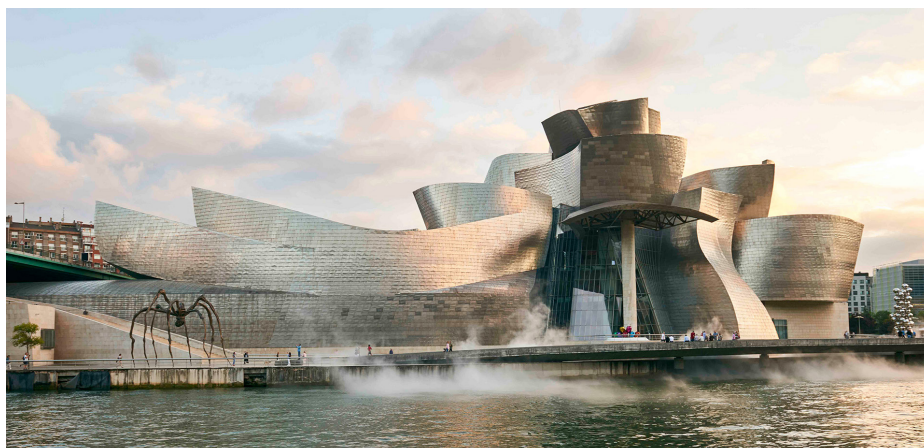


Figura 1.7: Museo Guggenheim de Bilbao, Frank O.Gehry.

En la actualidad, al pensar en la arquitectura de forma libre, uno de los indiscutibles exponentes del movimiento es la arquitecta iraquí Zaha Hadid (1950-2016)[2]. Reconocida como una de las arquitectas más influyentes y revolucionarias del siglo XXI, Hadid redefinió los límites de lo posible en el diseño arquitectónico. Su obra es famosa por su enfoque futurista, que se caracteriza por geometrías complejas, líneas curvas y un profundo interés por la interacción entre los edificios y su entorno.

Para desarrollar estos innovadores diseños, el equipo de Zaha Hadid emplea programas avanzados de modelado y diseño paramétrico. Estas herramientas digitales permiten explorar formas orgánicas y complejas que desafían las limitaciones tradicionales de la arquitectura.

Uno de los ejemplos más icónicos del legado de Zaha Hadid es el centro cultural Heydar Aliyev Centre (Figura 1.8) en Bakú, Azerbaiyán. Este edificio es famoso por su diseño fluido y futurista, que elimina las líneas rectas en favor de curvas que parecen fluir de manera natural en el paisaje circundante.

De manera similar, el Galaxy SOHO (Figura 1.9) en Beijing, China, es un complejo arquitectónico innovador compuesto por una serie de edificios interconectados que adoptan formas fluidas y orgánicas. La cubierta que une dos edificios será analizada en el apartado 4.2 como caso estudio para la fusión de cubiertas arquitectónicas.



Figura 1.8: Heydar Aliyev Centre, Zaha Hadid.

Figura 1.9 : Galaxy SOHO, Zaha Hadid.

1.2. Cuestiones abiertas

Con la aparición de las superficies de forma libre, surgen cuestiones fundamentales relacionadas con el diseño estructural, la sostenibilidad económica y, de manera más general, el estilo arquitectónico. Estos desafíos exigen un enfoque renovado en el diseño arquitectónico, donde la forma se ve influenciada por la estética, la fabricación, el tipo de material y otros aspectos técnicos. Estos factores no solo suponen un impacto en la construcción y en los costes, sino que también deben integrarse sin comprometer el objetivo creativo del diseño [3].

La computación geométrica ha encontrado en la arquitectura un campo de aplicación clave para resolver los problemas geométricos que surgen en los procesos de diseño, racionalización y construcción de formas libres. Este enfoque permite equilibrar las necesidades estéticas con los requisitos prácticos de la construcción, abordando los desafíos asociados a estas geometrías complejas.

Uno de los aspectos más relevantes en el desarrollo de formas libres es la panelización, un paso crucial en la creación de envolventes arquitectónicas. Este proceso consiste en aproximar una superficie mediante piezas más pequeñas, denominadas paneles, con el objetivo de minimizar los costes de fabricación y manipulación. Además, debe cumplir con condiciones como mantener dimensiones adecuadas, garantizar la suavidad de la superficie y respetar el diseño original del arquitecto.

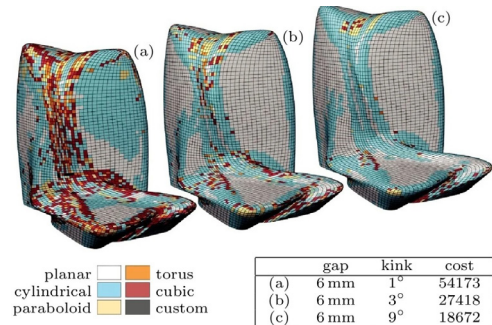
Aunque en este TFG no se profundiza en el tema de la panelización, este concepto resulta fundamental como introducción a la problemática del *blending*, ya que para conseguir una panelización óptima se requiere una superficie continua y fluida. La fusión entre superficies, conocida como *blending*, es uno de los principales desafíos actuales para lograr esta continuidad.

En la práctica, la panelización de una envolvente de forma libre suele generar paneles únicos y no repetitivos, lo que incrementa los costes. Para reducirlos, proponen un enfoque que combina optimización combinatoria y continua, basado en la reutilización de moldes. Este método busca descomponer la envolvente en piezas fáciles de fabricar utilizando un número limitado de moldes [3].

Un ejemplo destacado es el edificio de oficinas National Holding Headquarters en Abu Dhabi, diseñado por Zaha Hadid. Este proyecto emplea un sistema de paneles geométricos parametrizados que se adaptan a las formas fluidas del edificio. El objetivo principal es reemplazar los paneles originales por otros que puedan fabricarse con un número reducido de moldes, minimizando los costos de producción sin alterar la apariencia general de la superficie (Figura 1.10 y 1.11) [3].

Figura 1.10: National Holding Headquarters, Zaha Hadid.

Figura 1.11: Optimización de la panelización.



Para profundizar más en el tema de la panelización, recomendamos consultar el TFG titulado “Panelización de superficies de forma libre en arquitectura” [4], donde se aborda con mayor detalle este proceso.

1.3. Blending

La fusión de superficies, conocido como *blending*, es la transición suave y continua entre dos superficies o formas geométricas. Puede realizarse mediante la creación de una superficie unificada o mediante la creación de una superficie de transición que conecta dos superficies existentes. El objetivo principal es crear una unión fluida y estéticamente coherente entre formas geométricas, entre dos superficies de características distintas garantizando así una continuidad tanto visual como funcional.

Destacamos tres tipos de fusión de superficies:

- Chamfer: Genera una transición en forma de bisel que reemplaza los bordes agudos o los une por una superficie plana [6].

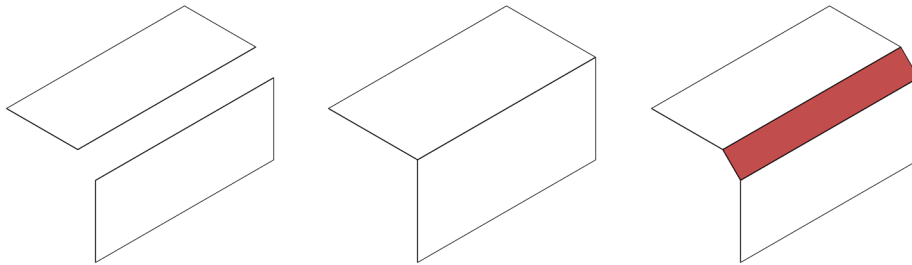


Figura 1.12: Operación chamfer.

- Fillet: Genera una transición curva que suaviza bordes agudos o los une mediante una superficie de radio constante o variable [6,2].

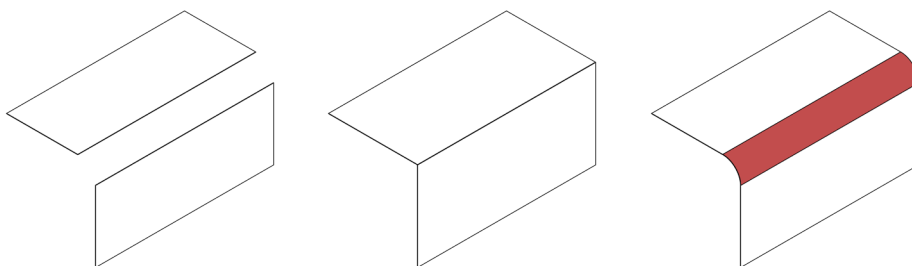


Figura 1.13: Operación fillet.

- Blend: Genera una transición más avanzada que permite combinar superficies mediante una superficie más compleja y variable, logrando una conexión más orgánica y adaptable [6,2].

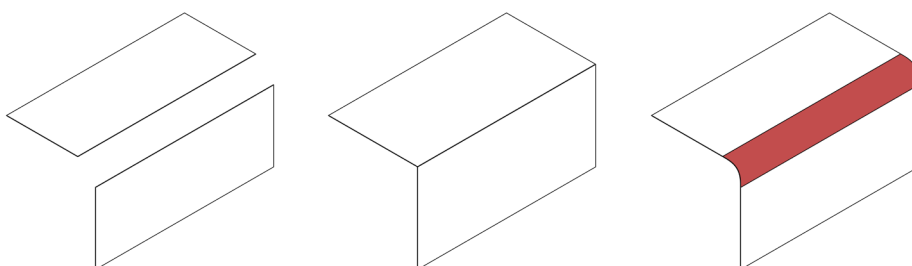


Figura 1.14: Operación blend.

Para comprender mejor el concepto de *blending*, en *Architectural Geometry* [2], se proporciona una descripción más general del proceso. Este enfoque explica que para lograr una transición suave entre dos superficies, se utiliza el movimiento de una esfera con un radio determinado a lo largo de la curva intersección de ambas superficies.

Durante todo el movimiento, la esfera mantiene contacto simultáneo con ambas superficies a lo largo de las curvas C_1 y C_2 , generando una parte de lo que se conoce como una superficie de tubería (*pipe surface*). El camino que sigue el centro de la esfera puede calcularse como la curva de intersección de dos superficies desplazadas (*offset surfaces*). Este cálculo asegura que la transición sea continua y geoméricamente precisa (Figura 1.15).

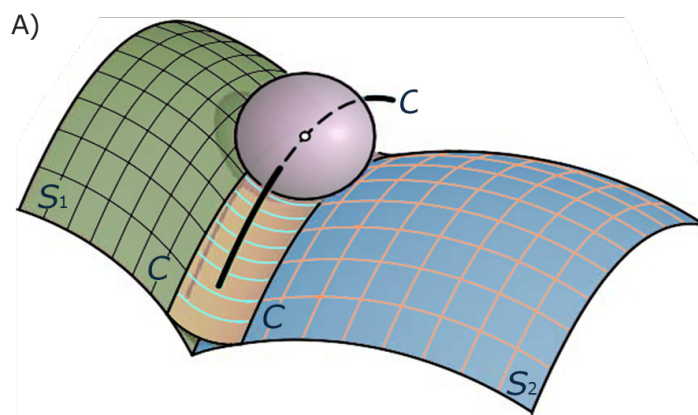


Figura 1.15: Representación *blending* radio constante.

Es importante destacar que, si en algún punto del movimiento la esfera no logra tocar ambas superficies, la superficie de *blending* no puede generarse. Este es un requisito indispensable para garantizar la continuidad de la transición.

De manera más general, es posible emplear un radio variable. En este caso, la esfera no mantiene un radio constante durante su movimiento, sino que su tamaño cambia de forma controlada a lo largo del trayecto. Este método permite crear transiciones más complejas y personalizadas, adaptándose mejor a las necesidades geométricas y estéticas del diseño (Figura 1.16).

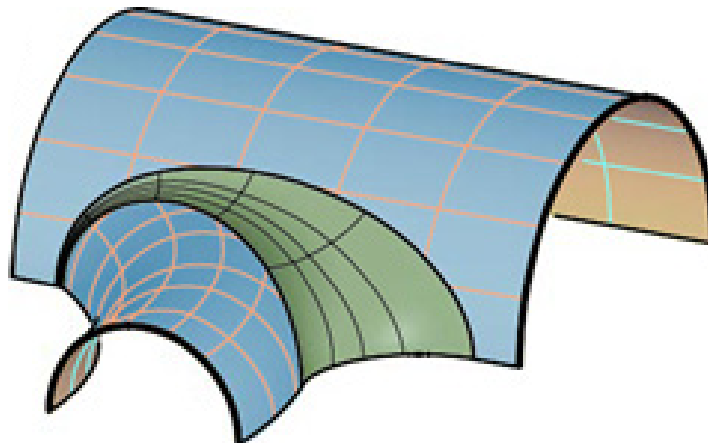


Figura 1.16: Representación *blending* radio variable.

2. Herramientas en CAGD

Los sistemas de diseño asistido por ordenador (CAD) son herramientas tecnológicas utilizadas para la creación, modificación, análisis y optimización de proyectos. Estas herramientas han transformado significativamente la forma en que se desarrollan productos en campos como la ingeniería, la industria automotriz, la arquitectura, la construcción y el diseño gráfico.

Desde sus inicios en las décadas de 1950 y 1960, el software de CAD ha evolucionado para integrar funciones avanzadas, incluyendo el modelado 3D, simulación y análisis estructural. Estos sistemas permiten a los diseñadores no solo visualizar sus ideas de manera precisa, sino también prever y solucionar problemas [6].

En la actualidad, existen numerosos programas de CAD que se adaptan a las diferentes necesidades según la disciplina a desarrollar, como la aeronáutica, industrial o arquitectura. Cada programa está orientado a desarrollar habilidades específicas, lo que influye directamente en la elección de la herramienta más adecuada para un determinado proyecto. Esto también abre la posibilidad de combinar diferentes aplicaciones para aprovechar sus fortalezas individuales y lograr un diseño más completo y eficiente.

2.1. Programas

A continuación, se describen los programas utilizados en la investigación de este trabajo, los cuales facilitan una explicación más clara y detallada sobre la fusión de superficies.

2.1.1. Rhinoceros 3D

Rhinoceros 3D, conocido como *Rhino*, es un software de CAD desarrollado por la empresa Robert McNeel & Associates que destaca por su flexibilidad, precisión y versatilidad en el modelado tridimensional [7].

Tiene capacidad para crear, editar, analizar, documentar, renderizar, animar y traducir curvas NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*), superficies y sólidos, geometría de subdivisión (*SubD*), nubes de puntos y mallas poligonales. Esto lo hace ideal para proyectos que requieren acabados detallados y formas orgánicas.

Su capacidad para integrar una amplia gama de complementos (*add-on*) amplía sus funciones, siendo Grasshopper uno de los más conocidos como herramienta de diseño paramétrico. En la figura 2.2 podemos ver la interfaz de Rhinoceros. La mayoría de los comandos que vamos a utilizar se encuentran en el panel de herramientas para manejo de superficies (*Surface Tools*) y sólidos (*Solid Tools*). Para facilitar su uso, se han agrupado los comandos en el panel *blending*.



Figura 2.1: Icono Rhinoceros.

2.1.2. Grasshopper

Grasshopper es una extensión integrada en Rhinoceros 3D diseñada para el modelado paramétrico y la programación visual [8]. Su principal característica es permitir a los usuarios generar geometrías complejas mediante la creación de algoritmos gráficos, sin necesidad de escribir código de programación tradicional. Grasshopper se utiliza ampliamente en arquitectu-

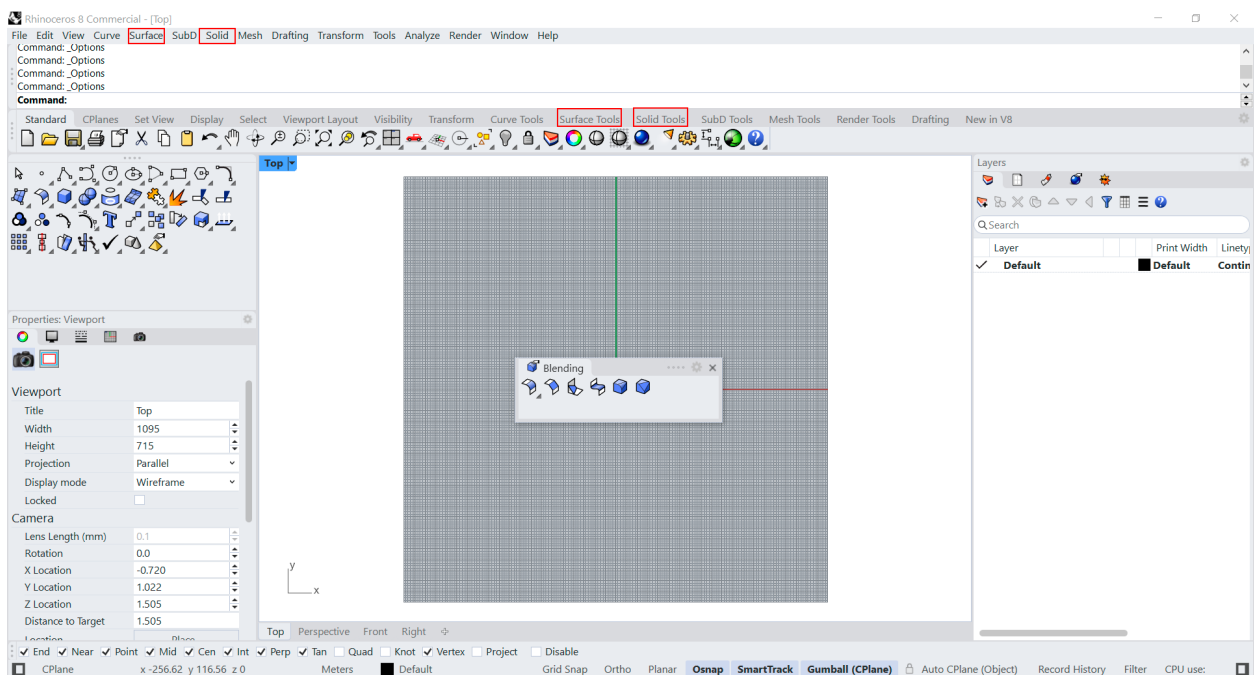


Figura 2.2: Área de Trabajo, Rhinoceros.



Figura 2.3: Icono Grasshopper.

ra, diseño industrial e ingeniería, debido a su capacidad para automatizar tareas de diseño y explorar soluciones innovadoras.

Gracias a su interfaz intuitiva basada en nodos, que contienen entradas y salidas que se interconectan con las entradas de los siguientes elementos (figura 2.4), Grasshopper es accesible incluso para quienes no tienen experiencia en programación pero buscan explorar métodos avanzados de diseño. Una de sus mayores ventajas es la flexibilidad para repetir rápidamente diseños y realizar modificaciones dinámicas mediante ajustes en los parámetros del algoritmo.

Además, Grasshopper es compatible con una amplia variedad de plugins (*add-on*), especializadas en un ámbito. Esta herramienta se ha convertido en un referente en el diseño generativo y paramétrico, marcando una diferencia significativa en proyectos que requieren precisión, personalización y optimización de recursos.

2.1.3. Flexibility

Flexibility es un plugin (*add-on*) de Grasshopper que amplía sus capacidades en el ámbito del diseño paramétrico, especialmente enfocado en la creación y manipulación de formas flexibles y adaptativas. Fue lanzado en diciembre de 2023, por lo que es un complemento actual que responde a las necesidades más recientes de los diseñadores. Para la investigación realizada en este TFG, utilizaremos los nuevos nodos que se añaden a Grasshopper: *Fillet Chamfer*, *Fillet Surface* y *Blend Surface* (figura 2.4). Facilitan la creación de uniones suaves y transiciones entre superficies, permitiendo a los diseñadores desarrollar modelos más complejos y avanzados [9].

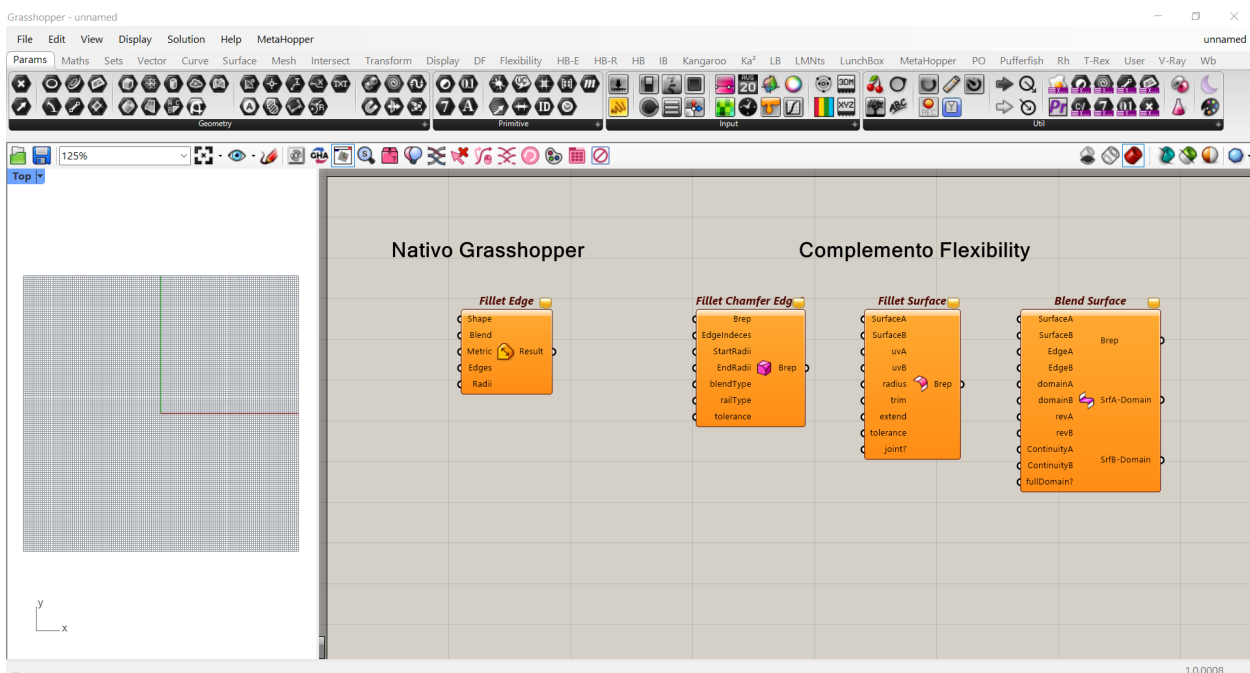


Figura 2.4: Área de Trabajo, Grasshopper.

2.2. Superficies NURBS

Los programas de CAD se basan en curvas y superficies NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*), conocidas como curvas y superficies de forma libre, para representar formas complejas y precisas en el diseño computacional. Esto es debido a que hay muchas superficies que no admiten parametrizaciones polinomiales, apareciendo las formas racionales de las superficies B-spline. Las superficies B-spline racionales no uniformes, NURBS, permiten definir muchas de las superficies comunes en CAD, cuádricas y toda clase de superficies para el diseño de automóviles, aviones y barcos. Cada vez tienen más importancia en la arquitectura, dada la complejidad del diseño arquitectónico actual [10].

Las superficies NURBS son una generalización de las superficies de Bézier y B-spline. Estas últimas sirven como base para comprender las NURBS.

2.2.1. Superficies de Bézier

Una superficie de Bézier (figura 2.5) es una representación paramétrica definida por un conjunto de puntos de control combinado con unos pesos específicos, que están determinados por las funciones de Bernstein.

Matemáticamente, es una superficie parametrizada cuya parametrización $P(u, v)$, se define a partir una malla de control, que está determinada por un conjunto de $(m+1) \times (n+1)$ puntos o vértices de control espaciales ordenados. La superficie de Bézier S de bigrado (n, m) con puntos de control $B_{i,j}$, está parametrizada por:

$$\mathcal{P}(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n J_{m,i}(v) J_{n,j}(u) B_{i,j}, \quad 0 \leq u, v \leq 1.$$

Siendo sus polinomios de Bernstein:

$$J_{m,i}(v) = \binom{m}{i} v^i (1-v)^{m-i},$$

$$J_{n,j}(u) = \binom{n}{j} u^j (1-u)^{n-j}.$$

Las superficies de Bézier tienen limitaciones en términos de flexibilidad y localización del control, lo que llevó al desarrollo de las B-spline [10, 11].

2.2.2. Superficies B-spline

Las superficies B-Spline amplían las de Bézier introduciendo control sobre la continuidad, el grado y la distribución de los nudos. Una superficie B-Spline S está definida también a partir de una malla de control, aunque

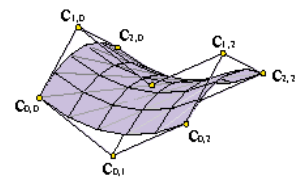


Figura 2.5: Superficie de Bézier.

se flexibiliza la elección del bigrado y de la elección de la base de funciones utilizadas para definir la parametrización [10, 11]. De forma más precisa, la parametrización $P(u, v)$ de una superficie B-Spline se construye utilizando los siguientes parámetros:

- Una malla de control determinada por una matriz B de $(m+1) \times (n+1)$ puntos de control.
- El bigrado (h, k) de S , con $1 \leq h \leq n$, $1 \leq k \leq m$. Dicha elección influye en la superficie y en la aproximación de la forma de la malla de control.
- Dos vectores de nudos X e Y .

La elección del bigrado juega un papel muy importante:

- $(h, k) = (1, 1)$ La superficie contiene todos los vértices de control y está formada por trozos de superficies de Bézier de grado $(1,1)$, es decir, trozos de paraboloides hiperbólicos.
- $(h, k) = (n, m)$ En este caso la superficie B-spline es una superficie de Bézier de grado (n, m) .
- $(0 \leq h \leq n$ y $0 \leq k \leq m)$ La superficie B-spline está formada por varios trozos de superficies de Bézier de bigrado (h, k) .

2.2.3. Superficies NURBS

Las superficies NURBS son superficies B-spline que asignan pesos a los vértices del polígono de control. Estas superficies se caracterizan por su flexibilidad y precisión, permitiendo una representación matemática eficiente de geometrías complejas. Las superficies NURBS se definen por dos parámetros clave: el grado de la curva o superficie y el conjunto de control de vértices.

El grado (h, k) de la superficie indica la complejidad de las funciones que definen la superficie en términos de los parámetros u y v (direcciones de las superficies). Además de poder elegir el grado de la superficie, podemos modificar los pesos asignados a los vértices para alterar la forma de la superficie, acercándola o alejándola de los vértices de la malla de control. Cuando los pesos son todos iguales, la superficie es polinómica, una B-spline no racional. Si los pesos no son iguales, la superficie es una B-spline racional [10, 11].

En Rhinoceros, las superficies y curvas pueden tener continuidad G_n , donde n es un número que indica el nivel de suavidad en la transición entre dos curvas o superficies [7]. A continuación se explican los diferentes niveles de continuidad:

- Posición (Go): La continuidad de posición mide la ubicación de los puntos finales de las curvas o superficies. Si las curvas se tocan en un punto en común, se dice que son continuas en posición (figura 2.6).

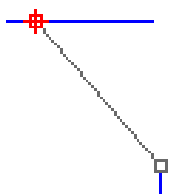
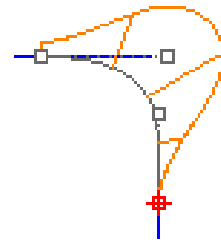
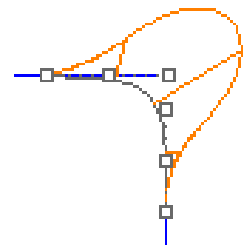
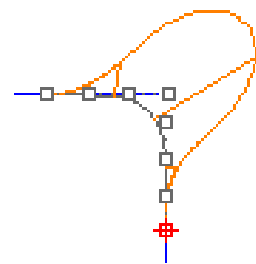
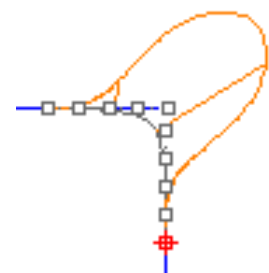


Figura 2.6: Posición (Go).

- Tangencia (G_1): La continuidad tangencial mide la posición y la dirección de la curva en los extremos. Si los dos puntos se encuentran en una línea, las dos curvas son tangentes en los extremos (figura 2.7).
- Curvatura (G_2): La continuidad de curvatura entre dos curvas mide la posición, la dirección y el radio de curvatura en los extremos. Si el radio de la curvatura es el mismo en el punto final común, las curvas tienen curvatura continua (G_2) (figura 2.8).
- G_3 : La continuidad G_3 añade un tercer requisito, la aceleración en el plano. Las curvas se tocan, van en la misma dirección, tienen el mismo radio y ese radio se acelera a la misma velocidad en un punto determinado (figura 2.9).
- G_4 : La continuidad G_4 se utiliza muy poco, tienen los mismos requisitos que las curvas G_3 , pero su aceleración de curvatura es igual en tres dimensiones (figura 2.10).

Figura 2.7: Tangencia (G_1).Figura 2.8: Curvatura (G_2).Figura 2.9: G_3 .Figura 2.10: G_4 .

2.2.4. Superficies NURBS en Grasshopper

En este apartado se desarrollará la creación de una superficie NURBS en Grasshopper, la cual servirá como base para el estudio de los comandos. El proceso será descrito paso a paso, con el objetivo de explicar el funcionamiento de Grasshopper y la interacción entre los diferentes nodos. Para encontrar los comandos en Grasshopper, se puede hacer doble clic en el área de trabajo, lo que abre un panel de búsqueda donde se introduce directamente el nombre del comando deseado (figura 2.11).

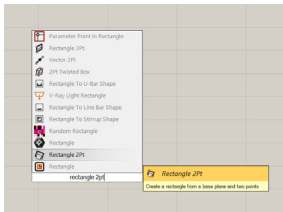


Figura 2.11: Panel de búsqueda.

Creación superficie base 1

Objetivo: Crear una superficie rectangular en el plano XY.

Para ello, utilizaremos el nodo **Rectangle 2Pt** para generar un rectángulo a partir de dos puntos que definen una diagonal. Estos dos puntos se crean mediante el nodo **Construct Point**, en el cual definiremos las coordenadas utilizando un **Slider** para controlar las dimensiones del rectángulo. Finalmente se utiliza **Boundary Surfaces** para generar la superficie a partir del rectángulo.

Proceso:

1. **Construct Point**: Definimos las coordenadas de los puntos de las esquinas. Utilizamos un **slider** para ajustar los valores de las coordenadas en el plano XY.
2. **Rectangle 2Pt**: genera el rectángulo utilizando los puntos definidos.
3. **Boundary Surfaces**: crea una superficie a partir de una curva cerrada que forma el contorno del rectángulo.

Resultado: Se obtiene una superficie rectangular de 10×4 unidades (Figura 2.12).

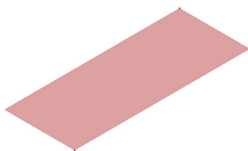


Figura 2.12: Superficie base 1.

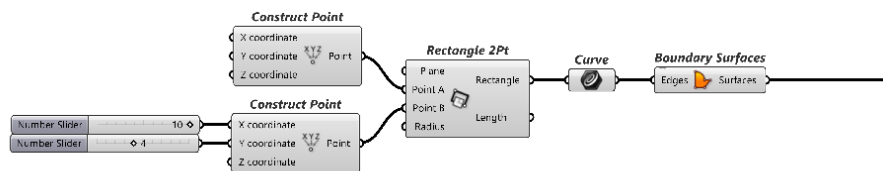


Figura 2.13: Algoritmo creación superficie base 1.

Creación superficie base 2

Objetivo: Crear una superficie a partir de la superficie base 1.

A partir de la superficie generada, seleccionamos los bordes utilizando **Deconstruct Brep** y **List Item**. Con los bordes seleccionados, vamos a modificarlos en el eje Z con el nodo **Move**, utilizando un **Graph Mapper**. Finalmente se utiliza **Extrude Along** para generar la superficie a partir de los bordes modificados.

Proceso:

1. **Deconstruct Brep**: Este nodo descompone un Brep. Brep es la abreviatura de *Boundary representation*. Está formada por una colección de superficies NURBS, que son las caras del Brep, las curvas de unión son las aristas o bordes y los puntos de intersección los vértices.
2. **List Item**: Utilizamos este nodo para seleccionar los bordes de la superficie (borde largo y el borde ancho) de acuerdo con su posición en la lista generada por **Deconstruct Brep**. El índice (*index*) se puede elegir con un **Slider**.
3. **Graph Mapper**: Este nodo permite mapear un conjunto de datos de una geometría específica. Para ello dividimos las curvas en puntos con **Divide Curve**. A este conjunto de puntos se aplican dos tipos de gráficas:
 - Para el borde largo, se utiliza la gráfica Seno para modificar su altura en el eje Z.
 - Para el borde ancho, se utiliza la gráfica de Bézier para modificar su altura en el eje Z.
4. **Move**: Este nodo desplaza los puntos de las curvas modificadas en el eje Z.
5. **Extrude Along**: Este nodo genera una superficie a partir de una curva base y una curva. En nuestro caso:
 - La base será el borde largo.
 - La curva será el borde ancho.



Figura 2.14: Curvas modificadas.

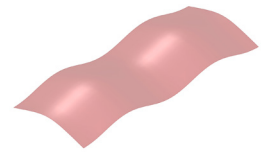


Figura 2.15: Superficie base 2.

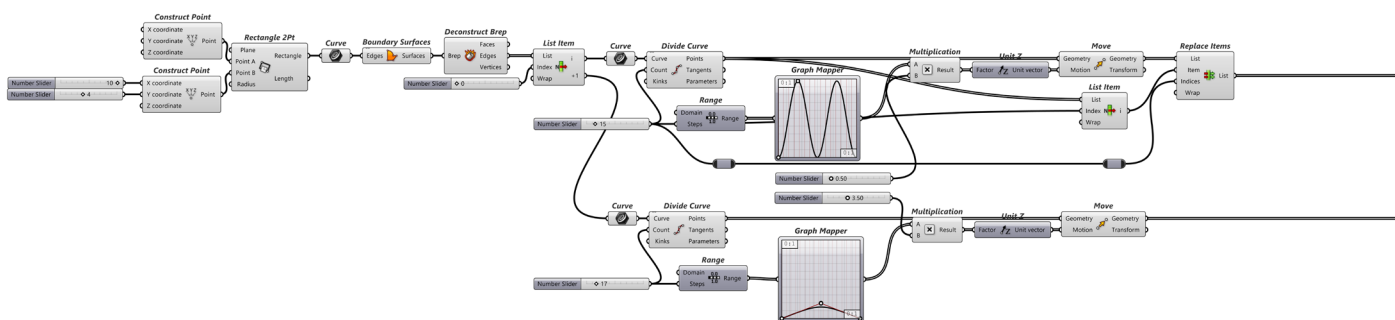


Figura 2.16: Algoritmo creación de superficies NURBS.

Resultado: Se obtiene una superficie tridimensional que tiene una forma más compleja debido a las modificaciones aplicadas en los bordes.

Preparación del modelo para el estudio.

Objetivo: Preparar el modelo para el estudio de comandos en los siguientes apartados.

Para simular una fusión de superficies entre una cubierta y una fachada, se utiliza el nodo **Move** y **Rotate** para posicionar y rotar la superficie base 2.

Proceso:

1. **Move**: Este nodo desplaza la geometría utilizando un **Slider**, en el eje seleccionado Y.
2. **Rotate**: Este nodo rota la geometría, utilizando como eje el lado largo. Con un **Slider** se rota 90 grados.

Resultado: Simulación para solucionar el encuentro entre una cubierta plana con una fachada de forma libre, utilizando la fusión de superficies.

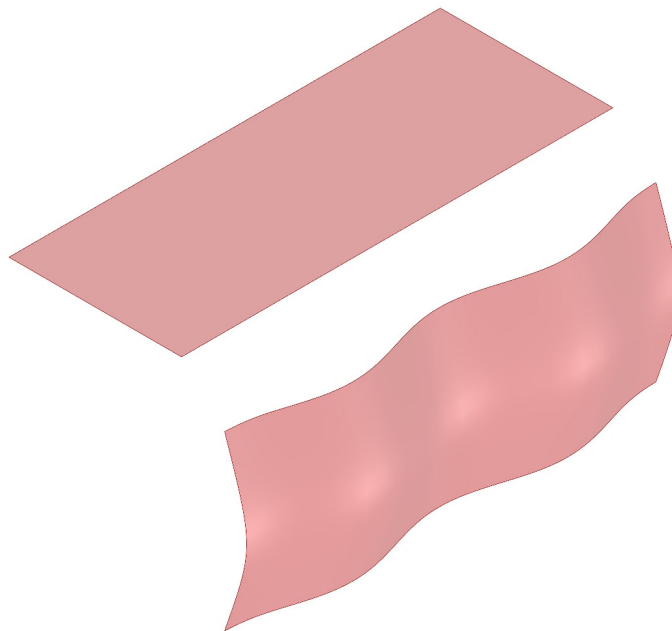
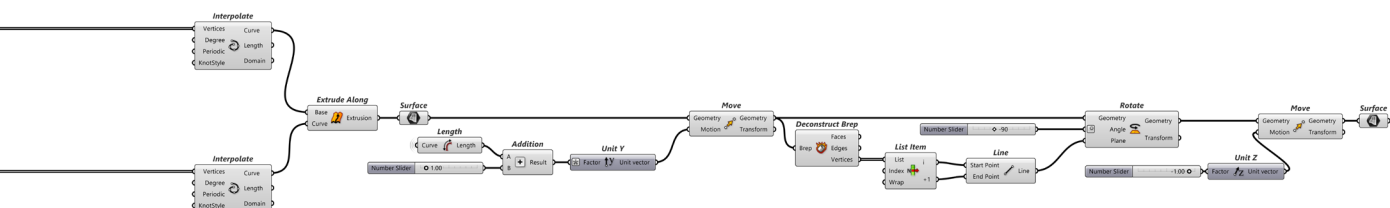


Figura 2.17: Preparación del modelo.



2.3. Operaciones Rhinoceros

En este apartado se analizan las operaciones actuales disponibles en Rhinoceros 8 para la fusión de superficies, tomando como base las superficies NURBS creadas previamente en el apartado 2.2.4. Superficies NURBS en Grasshopper. La principal diferencia a la hora de seleccionar los distintos comandos radica en la relación geométrica entre las superficies: si estas comparten un borde común o si están separadas. En el primer caso, el borde compartido actúa como una intersección explícita entre ambas superficies y se utiliza como rail guía para generar la superficie de fusión. Por otro lado, cuando las superficies iniciales están separadas, el software genera una intersección ficticia, calculada automáticamente, que sirve de referencia para crear la transición entre ambas. Este enfoque permite abordar de forma sistemática los distintos escenarios geométricos, facilitando el uso eficiente de las herramientas CAGD para operaciones avanzadas en el diseño arquitectónico. En los siguientes apartados, se explicarán los comandos específicos y sus configuraciones.

2.3.1. Fillet Edge

El comando `Fillet Edge` permite generar una superficie de transición tangente entre dos superficies que tengan un borde en común con valores de radio variables. A continuación, se explica su funcionamiento paso a paso:

1. Preparación del modelo
Es necesario disponer de dos superficies NURBS que tengan un borde en común, ya que actúa como el rail guía para generar la superficie.
2. Acceso al comando
El comando `Fillet Edge` puede activarse desde la barra de herramientas de sólidos (`Surface Tools`) o escribiendo directamente `FilletEdge` en la barra de comandos.
3. Selección de superficies
Una vez activado el comando hay que seleccionar el borde, es importante asegurarse de que el borde seleccionado corresponde a la intersección entre las superficies que se desean fusionar. Restricciones para tener en cuenta:
 - Las superficies deben de estar unidas (`Join`)
 - Si las superficies no están conectadas adecuadamente, el comando no funcionara.
4. Configuración principal
Tras seleccionar el borde, Rhinoceros solicitará definir un radio, que puede ser constante o variable. Para un radio variable, se añaden puntos clave con la opción `Add Handle`, colocándolos directamente sobre el borde. Los valores pueden introducirse numéricamente



Figura 2.18: Icono Fillet Edge.

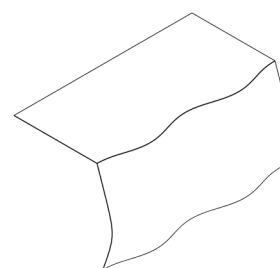


Figura 2.19: Superficies base.

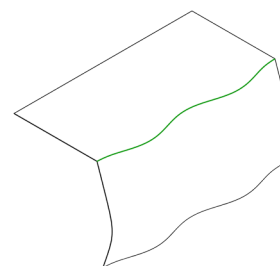


Figura 2.20: Selección borde.

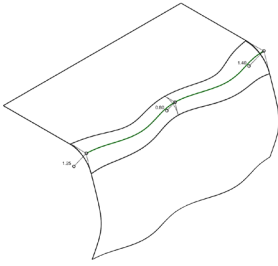


Figura 2.21: Previsualización.

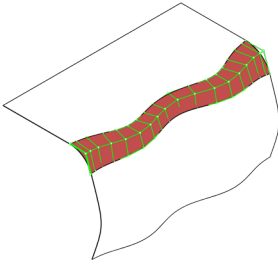


Figura 2.22: Malla de control de la superficie.

o ajustarse visualmente arrastrando los puntos desde la previsualización interactiva para mayor precisión.

Si el radio es excesivamente grande o pequeño, la previsualización se mostrará en rojo, indicando un error. En estos casos, el resultado no será válido para la geometría seleccionada.

5. Ajustes adicionales

- *RailType*: Define qué tipo de raíl se utiliza para la transición entre las superficies. Las opciones son:
 1. *DistFromEdge*: Genera una superficie manteniendo una distancia constante desde el borde de las superficies originales.
 2. *RollingBall*: Crea una superficie generada por una esfera rodante a través del borde.
 3. *DistBetweenRails*: Genera una superficie manteniendo una distancia uniforme entre los dos railes definidos por el borde.
- *TrimAndJoin*: Recorta las superficies originales para ajustarlas a la superficie de fusión y las une automáticamente con la superficie generada, creando una superficie continua.

El resultado es una superficie de fusión tangente entre las dos superficies seleccionadas a partir de la configuración elegida. Problemas encontrados durante su ejecución:

- Si las superficies originales tienen irregularidades o bordes no coincidentes, el comando puede generar errores o fallar en la creación de la superficie.
- Radios demasiado grandes o pequeños pueden provocar errores o resultados no deseados en la superficie de fusión.

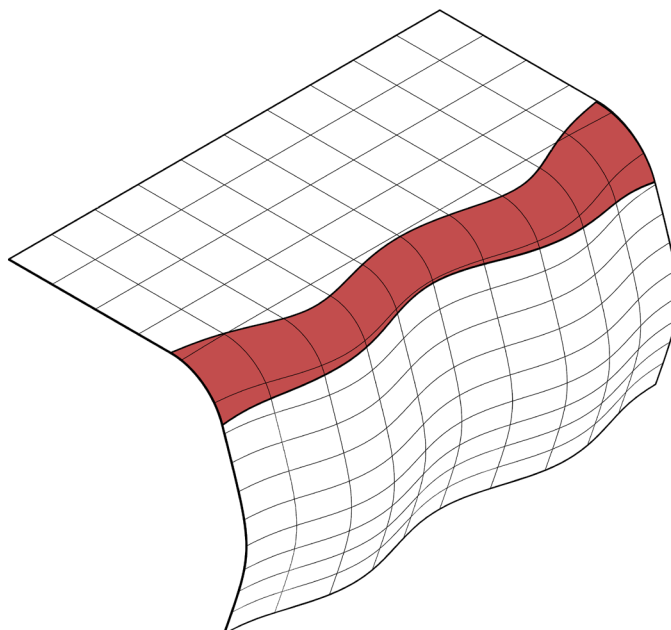


Figura 2.23: Resultado Fillet Edge.

2.3.2. Blend Edge

El comando `Blend Edge` permite generar una superficie de transición suave con continuidad de curvatura (G_2) entre dos superficies que tengan un borde en común, asegurando una conexión fluida y orgánica. A continuación, se explica su funcionamiento paso a paso:

1. Preparación del modelo

Es necesario disponer de dos superficies NURBS que tengan un borde en común y estén unidas (`join`), ya que actúa como el raíl guía para generar la superficie.

2. Acceso al comando

El comando `Blend Edge` puede activarse desde la barra de herramientas de sólidos (`Solid Tools`) o escribiendo directamente `Blend Edge` en la barra de comandos.

3. Selección de superficies

Una vez activado el comando hay que seleccionar el borde. Algunos puntos clave sobre la selección:

- Es importante asegurarse de que el borde seleccionado pertenece a las superficies que se desean unir.
- Las superficies deben estar conectadas previamente, de lo contrario, el comando no funcionara correctamente.
- Si seleccionas bordes discontinuos, puedes obtener transiciones con irregularidades.

4. Configuración principal

Tras seleccionar el borde, Rhinoceros solicitará definir un radio, que puede ser constante o variable. Para un radio variable, se añaden puntos clave con la opción `Add Handle`, colocándolos directamente sobre el borde. Los valores pueden introducirse numéricamente o ajustarse visualmente arrastrando los puntos desde la previsualización interactiva para mayor precisión. Si el radio es excesivamente grande o pequeño, la previsualización se mostrará en rojo, indicando un error. En estos casos, el resultado no será válido para la geometría seleccionada.

5. Ajustes adicionales

- *RailType*: Define que tipo de raíl se utiliza para la transición entre las superficies. Las opciones son:
 1. *DistFromEdge*: Genera una superficie manteniendo una distancia constante desde el borde de las superficies originales.
 2. *RollingBall*: Genera una superficie generada por una esfera rodante a través del borde.
 3. *DistBetweenRails*: Genera una superficie manteniendo una distancia uniforme entre los dos railes definidos por el borde.



Figura 2.24: Icono Blend Edge.

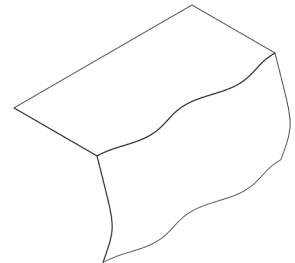


Figura 2.25: Superficies base.

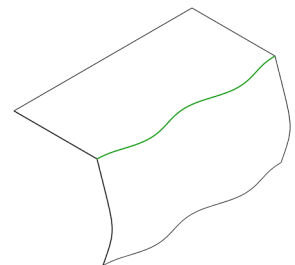


Figura 2.26: Selección borde.

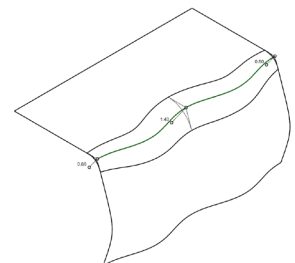


Figura 2.27: Previsualización.

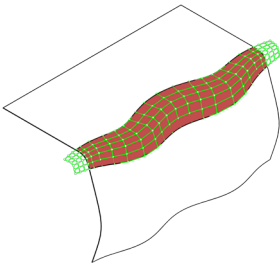


Figura 2.28: Malla de control de la superficie.

- *TrimAndJoin*: Recorta las superficies originales para ajustarlas a la superficie de fusión y las une automáticamente con la superficie generada, creando una superficie continua.

El resultado es una superficie de fusión suave con continuidad de curvatura (G_2) entre las dos superficies seleccionadas a partir de la configuración elegida. Problemas encontrados durante su ejecución:

- Si las superficies originales tienen irregularidades o bordes no coincidentes, el comando puede generar errores o fallar en la creación de la superficie.
- Radios demasiado grandes o pequeños pueden provocar errores o resultados no deseados en la superficie de fusión.

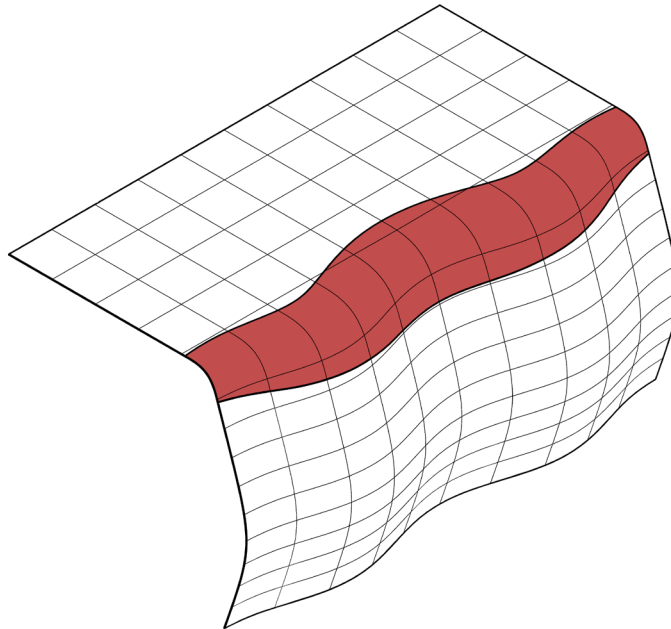


Figura 2.29: Resultado Blend Edge.

2.3.3. Fillet Surface

El comando `Fillet Surface` permite generar una superficie de transición suavizada de radio constante entre dos superficies. Este comando es flexible, ya que permite trabajar con superficies tanto unidas como separadas, calculando el borde de intersección automáticamente si no están unidas. A continuación, se explica su funcionamiento paso a paso:

1. Preparación del modelo

Es necesario disponer de dos superficies NURBS, que estén unidas o separadas. Si están unidas, el comando utiliza el borde en común como raíl guía. Si están separadas, el programa calcula un borde ficticio basado en la intersección entre las superficies.

2. Acceso al comando

El comando `Fillet Surface` puede activarse desde la barra de herramientas de superficies (`Surface Tools`) o escribiendo directamente `FilletSrf` en la barra de comandos.

3. Selección de superficies

Una vez activado el comando hay que seleccionar las superficies entre las que se desea crear la superficie de transición.

4. Configuración principal

Una vez seleccionadas las superficies, Rhinoceros solicitará el valor del radio. El valor puede introducirse numéricamente o mediante el deslizador en el panel. Si el radio es excesivamente grande o pequeño, Rhino podría generar un error o un resultado no deseado.

5. Ajustes adicionales

En el panel aparecen configuraciones avanzadas para el comando:

- **Range:** debajo del control del radio, aparecen valores predefinidos como 0.1, 1.0, 10 y 100, que facilitan el rango en el que se puede desplazar el deslizador para tener una mayor precisión.
- **Blend Type:** El comando ofrece tres tipos de suavizado diferentes:
 1. **Arc:** genera una superficie con una geometría basada en un arco circular.
 2. **Deformable:** genera una superficie más flexible basada en una curva de transición ajustable.
 3. **G2 Blend:** genera una superficie con continuidad de curvatura (G2) proporcionando un acabado más suave y orgánico entre las superficies.
- **Deformable Degree:** si selecciona la opción `Deformable`, se habilita la casilla `Deformable Degree`, que permite ajustar el grado de libertad (3, 4 o 5) de la superficie NURBS, para controlar la complejidad de la superficie generada.
- **Tangent y Bulge:** Estas opciones permiten realizar ajustes precisos en la tangencia (`Tangent`) y en el abultamiento (`Bulge`) de



Figura 2.30: Icono `Fillet Surface`.

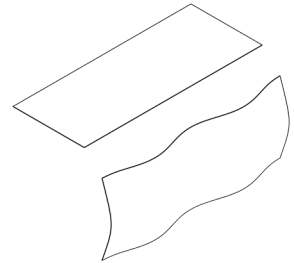


Figura 2.31: Superficies base.

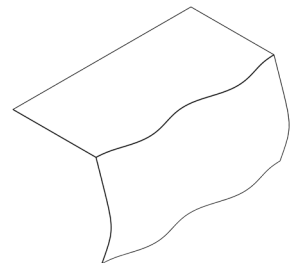


Figura 2.32: Superficies base.

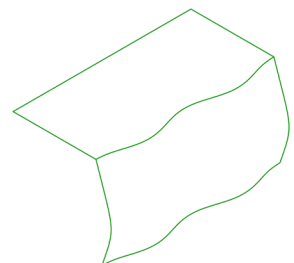


Figura 2.33: Selección superficies.

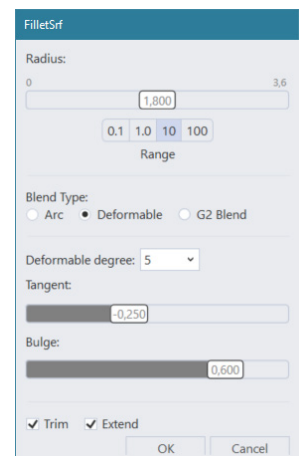


Figura 2.34: Panel control.

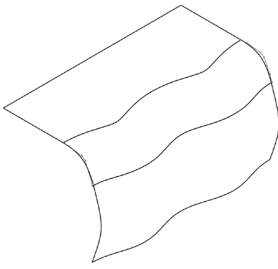


Figura 2.35: Previsualización.

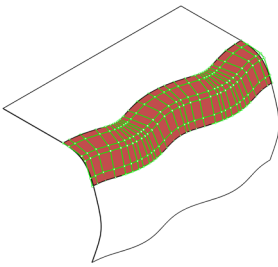


Figura 2.36: Malla de control de la superficie.

la superficie, controlando su forma y suavidad en la superficie resultante.

- *Trim*: Recorta las superficies originales para ajustarlas a la nueva superficie generada.
- *Extend*: Extiende automáticamente los bordes de las superficies seleccionadas para facilitar la creación de la transición, si es necesario.

El resultado es una superficie de fusión redondeada y suave que conecta las dos superficies seleccionadas a partir de la configuración elegida. Problemas encontrados durante su ejecución:

- Si las superficies tienen geometrías muy irregulares o bordes no coincidentes, el comando puede fallar en la creación de la superficie.
- Radios demasiado pequeños o grandes pueden causar errores o generar transiciones no deseadas para la geometría.
- Para las superficies separadas, el cálculo del borde ficticio puede no ser preciso en casos complejos, lo que puede afectar el resultado final.

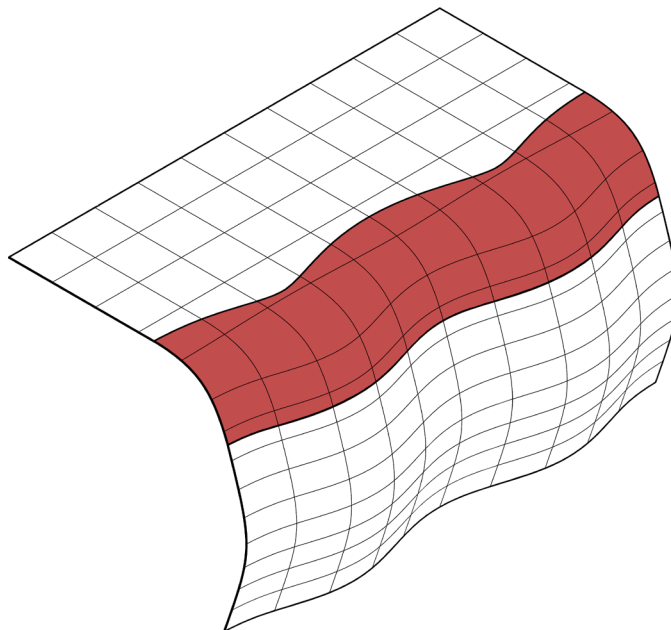


Figura 2.37: Resultado Fillet Surface.

2.3.4. Blend Surface

El comando `Blend Surface` permite generar una superficie de transición entre dos bordes de superficies, garantizando continuidad en posición, tangencia o curvatura entre ellas. Este comando es especialmente útil para suavizar la conexión entre superficies que no comparten una arista en común. A continuación, se explica su funcionamiento paso a paso:

1. Preparación del modelo

Es necesario disponer de dos superficies NURBS, estas superficies no deben tener bordes en común ya que no se podría realizar la operación.

2. Acceso al comando

El comando `Blend Surface` puede activarse desde la barra de herramientas de superficies (`Surface Tools`) o escribiendo directamente `BlendSrf` en la barra de comandos.

3. Selección de superficies

Una vez activado el comando hay que seleccionar los bordes de las superficies que se desean conectar. Es importante asegurarse de que las superficies seleccionadas sean compatibles para generar una transición fluida. La herramienta mostrará una previsualización interactiva de la superficie de fusión.

4. Configuración principal

Tras la selección de los bordes, se abrirá un panel de configuración, en el que el principal ajuste es elegir la continuidad de la superficie:

- *Position (G0)*: Genera una superficie básica sin continuidad en la tangencia.
- *Tangency (G1)*: Garantiza una continuidad en la tangencia entre las superficies.
- *Curvature (G2)*: Asegura una transición más suave, con continuidad en la curvatura.
- *G3 y G4*: Son curvaturas avanzadas para una mayor continuidad.

Además, los deslizadores permiten ajustar la influencia de la transición en cada una de las superficies, controlando la intensidad y el alcance de la mezcla. Se puede modificar directamente con los controles deslizantes ubicados en la parte superior del panel. Alternativamente, es posible ajustar la superficie de fusión de manera más precisa desplazando los puntos de control directamente en la previsualización interactiva, lo que permite una manipulación visual más intuitiva y rápida de la transición.

5. Ajustes adicionales

- *Add Shapes*: Permite añadir formas intermedias que controlan la sección transversal de la transición.
- *Remove Shapes*: Elimina las formas añadidas previamente.



Figura 2.38: Icono Blend Surface.

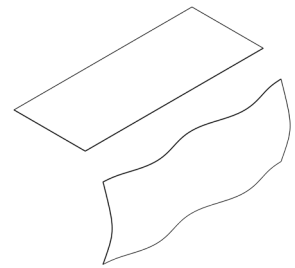


Figura 2.39: Superficies base.

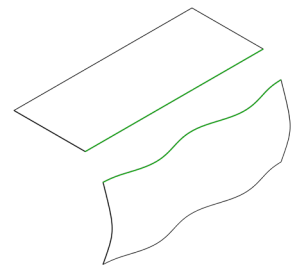


Figura 2.40: Selección borde.

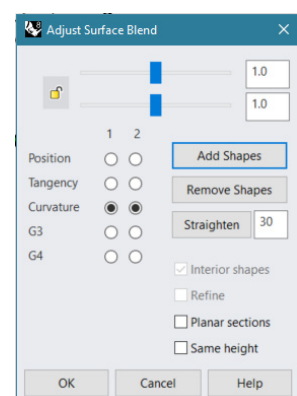


Figura 2.41: Panel control.

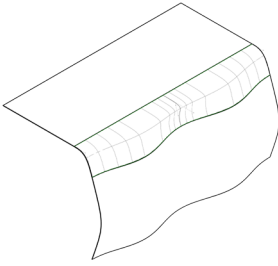


Figura 2.42: Previsualización.

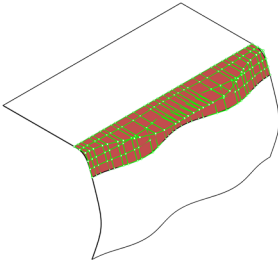


Figura 2.43: Malla de control de la superficie.

- *Straighten*: Ajusta la transición a una línea recta en un rango determinado (valor numérico).
- *Interior Shapes*: Activa o desactiva la inclusión en todas las formas en los puntos de *Greville* para combinaciones simples. El uso de formas interiores tiene en cuenta toda la selección de bordes de la superficie para lograr la continuidad.
- *Refine*: Evita crear una superficie de combinación más simple cuando es posible hacerlo. Se agregarán más curvas isométricas a la superficie de combinación.
Las casillas de verificación *Interior Shapes* y *Refine* no se pueden habilitar al mismo tiempo.
- *Planar Sections*: Hace que todas las curvas sean planas y paralelas a la dirección especificada.
- *Same Height*: Si los espacios entre las superficies varían, esta opción mantiene la altura de las curvas de forma en toda la mezcla.

El resultado es una superficie de fusión fluida entre las dos superficies seleccionadas a partir de la configuración elegida. Problemas encontrados durante su ejecución:

- Transiciones abruptas si las superficies originales tienen bordes muy complejos o configuraciones inadecuadas en la continuidad.

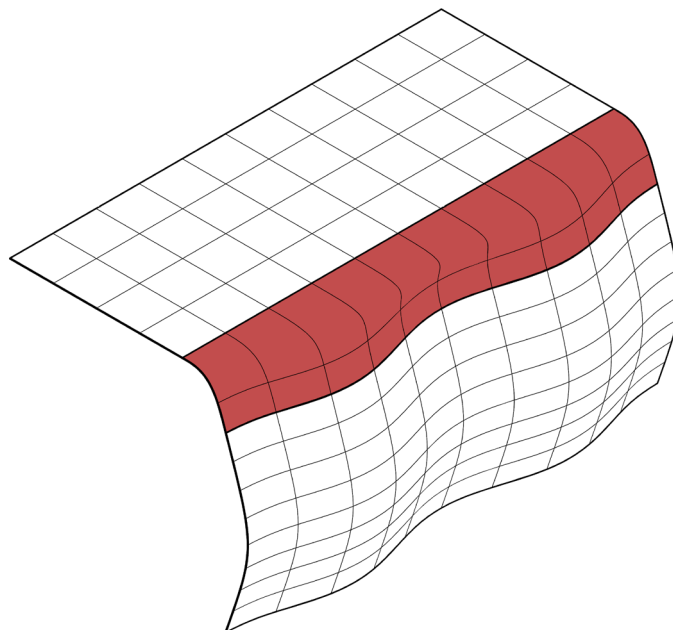


Figura 2.44: Resultado Blend Edge.

2.4. Algoritmos en Grasshopper

En este apartado se analizan las mismas operaciones estudiadas previamente en Rhinoceros, pero desde el entorno de Grasshopper, tomando como base las superficies NURBS creadas previamente en el apartado 2.2.4. Superficies NURBS en Grasshopper. Al igual que en los comandos analizados en Rhinoceros, la principal diferencia radica en la relación geométrica entre las superficies.

En el ámbito del Blending, Grasshopper no está tan desarrollado como Rhinoceros, ya que únicamente cuenta con el nodo *Fillet Edge*. Para complementar esta funcionalidad, se ha utilizado el plugin Flexibility, que incorpora nuevos nodos específicamente diseñados para la fusión de superficies.

2.4.1. Fillet Edge

El nodo *Fillet Edge* permite generar una superficie de transición tangente entre dos superficies que tengan un borde en común, de radio constante. Flexibility ofrece una versión más avanzada llamada *Fillet Chamfer Edge 1*, que permite definir radios variables, proporcionando mayor control y flexibilidad en el diseño. A continuación, se explica su funcionamiento paso a paso:

1. Preparación del modelo

Es necesario disponer dos superficies NURBS que tengan un borde en común, ya que actúa como el raíl guía para generar la superficie.

Es importante asegurarse de que las superficies estén unidas en una *Brep*. Si no están unidas, se puede utilizar el nodo *Solid Union* (*Intersect* → *Shape*) para unir las. Este borde compartido es el que actúa como guía para la transición.

2. Acceso al nodo

El nodo nativo *Fillet Edge*, se encuentra en la barra de herramientas de superficies en útil (*Surface* → *Útil*) o escribiendo directamente *Fillet Edge* en el buscador de nodos.

La versión mejorada de Flexibility, *Fillet Chamfer Edge 1*, se encuentra en la barra de herramientas de Flexibility en *Surface* (*Flexibility* → *Surface*) o escribiendo directamente *Fillet Chamfer Edge 1* en el buscador de nodos.

3. Selección de superficies

El nodo requiere como entrada principal una *Brep*, es decir, que las dos superficies previamente tienen que estar unidas. Si las superficies no están unidas, utiliza *Solid Union* (*Intersect* → *Shape*) para combinarlas. Para elegir el borde, se utiliza un *slider* o un *panel* que indique el número del borde deseado.

4. Configuración principal

El nodo permite configurar los siguientes parámetros principales:

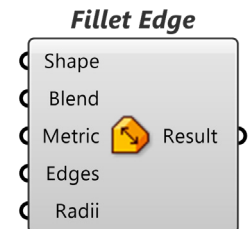


Figura 2.45: Icono Fillet Edge.

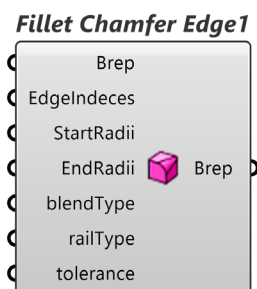


Figura 2.46: Icono Fillet Chamfer Edge 1.

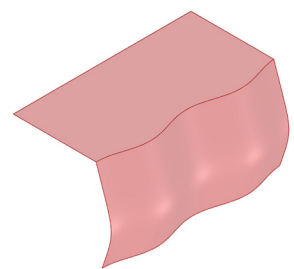


Figura 2.47: Superficies base.

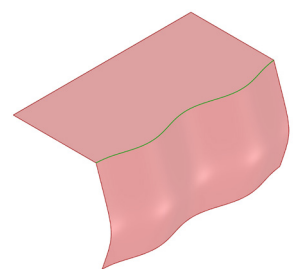


Figura 2.48: Selección borde.

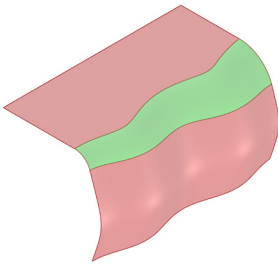


Figura 2.49: Previsualización.

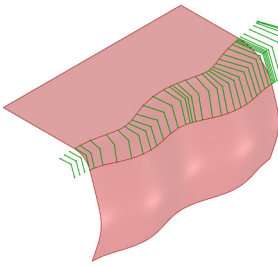


Figura 2.50: Malla de control de la superficie.

- Radio: En el caso del nodo *Fillet Edge* solo nos deja elegir un único radio, pero en el nodo *Fillet Chamfer Edge 1*, permite definir diferentes radios en ambos extremos del borde seleccionado. Estos valores se ajustan mediante un **slider**.
 - *Blend Type*: Nos permite elegir el tipo de transición a aplicar. Las opciones incluyen *Chamfer*, *Fillet* y *Blend*.
5. Ajustes adicionales
- *RailType*: Define qué tipo de raíl se utiliza para la transición entre las superficies. Las opciones son:
 1. *DistFromEdge*: Genera una superficie manteniendo una distancia constante desde el borde de las superficies originales.
 2. *RollingBall*: Genera una superficie generada por una esfera rodante a través del borde.
 3. *DistBetweenRails*: Genera una superficie manteniendo una distancia uniforme entre los dos raíles definidos por el borde.

El resultado es una superficie de fusión tangente que conecta las dos superficies seleccionadas a partir de la configuración elegida.

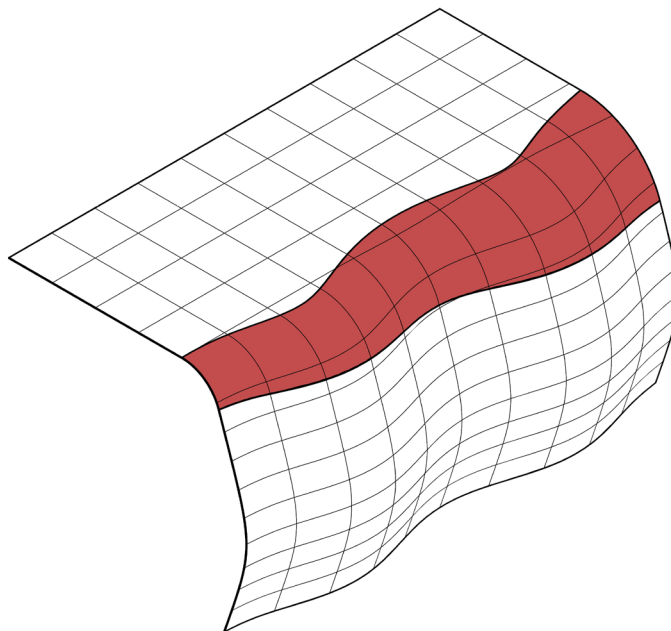


Figura 2.51: Resultado *Fillet Chamfer Edge 1*.

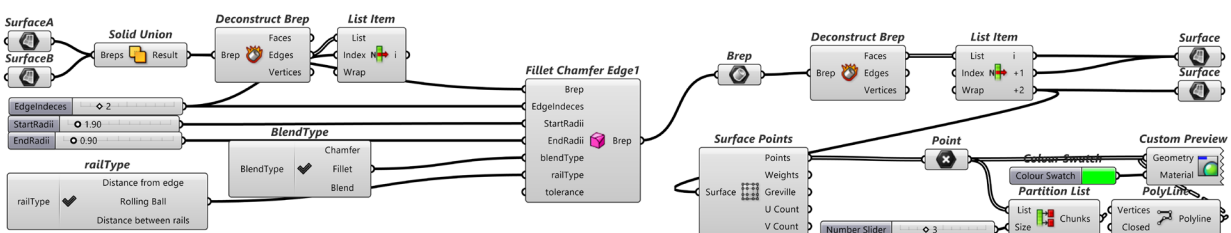


Figura 2.52: Algoritmo *Fillet Chamfer Edge 1*.

2.4.2. Fillet Surface

El nodo **Fillet Surface**, creado por Flexibility, permite generar una superficie de transición redondeada de radio constante. Este mismo proceso puede lograrse con los nodos analizados anteriormente, **Fillet Edge** o **Fillet Chamfer Edge 1**, configurando la opción *Fillet* en el parámetro *Type Blend*, sin embargo, estos nodos solo funcionan cuando las superficies están unidas. Este nuevo nodo, puede utilizarse tanto con superficies unidas como separadas, aunque tiene la limitación de admitir un radio constante. A continuación, se explica su funcionamiento paso a paso:

1. Preparación del modelo

Es necesario disponer de dos superficies NURBS, que estén unidas o separadas. Si están unidas, el comando utiliza el borde en común como raíl guía. Si están separadas, el programa calcula un borde ficticio basado en la intersección entre las superficies.

2. Acceso al nodo

El nodo *Fillet Surface*, se encuentra en la barra de herramientas Flexibility en superficies (*Flexibility* → *Surface*) o escribiendo directamente **Fillet Surface** en el buscador de nodos.

3. Selección de superficies

El nodo requiere como entradas principales dos superficies (*SurfaceA* y *SurfaceB*). Una de las ventajas de este nodo, como se mencionó anteriormente, es que permite trabajar tanto con superficies unidas como separadas.

4. Configuración principal

La configuración principal del nodo es el parámetro del radio, controla el tamaño de la transición entre las dos superficies. Para poder ajustarlo se utiliza un **slider** o un **panel** que indique el valor deseado.

5. Ajustes adicionales

El nodo ofrece ajustes adicionales, controladas mediante el nodo **Boolean Toggle** (*True/False*):

- *Trim*: Utiliza la superficie de salida para recortar las superficies de entrada cuando sea posible.
- *Extend*: Cuando una superficie de entrada es más larga que la otra, la superficie de salida se extiende a las superficies de entrada.
- *Joint?*: Establece si las superficies deben unirse tras aplicar el nodo.

El resultado es una superficie de transición redonda de radio constante entre las dos superficies seleccionadas. Problemas encontrados durante su ejecución:

- Si las superficies tienen geometrías muy irregulares, el comando puede fallar en la creación de la superficie.

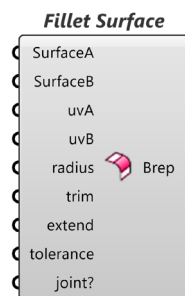


Figura 2.53: Icono Fillet Surface.

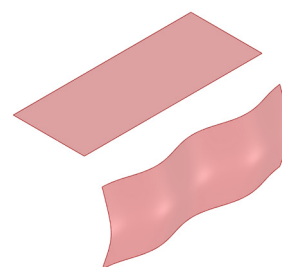


Figura 2.54: Superficies base.

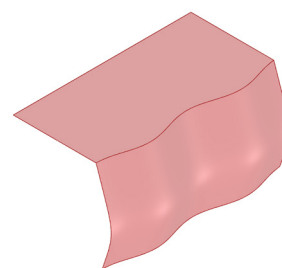


Figura 2.55: Selección borde.

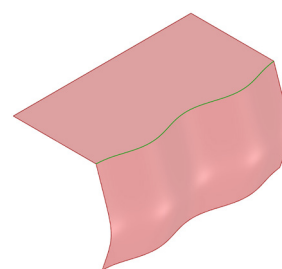


Figura 2.56: Selección borde.

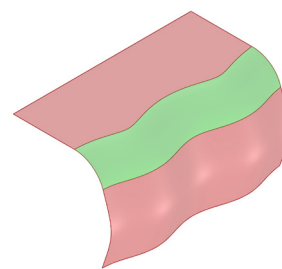


Figura 2.57: Previsualización.

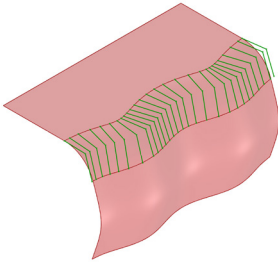


Figura 2.58: Malla de control de la superficie.

- Radios demasiado pequeños o grandes pueden causar errores o generar transiciones no deseadas para la geometría.
- Para las superficies separadas, el cálculo del borde ficticio puede no ser preciso en casos complejos, lo que puede afectar el resultado final.

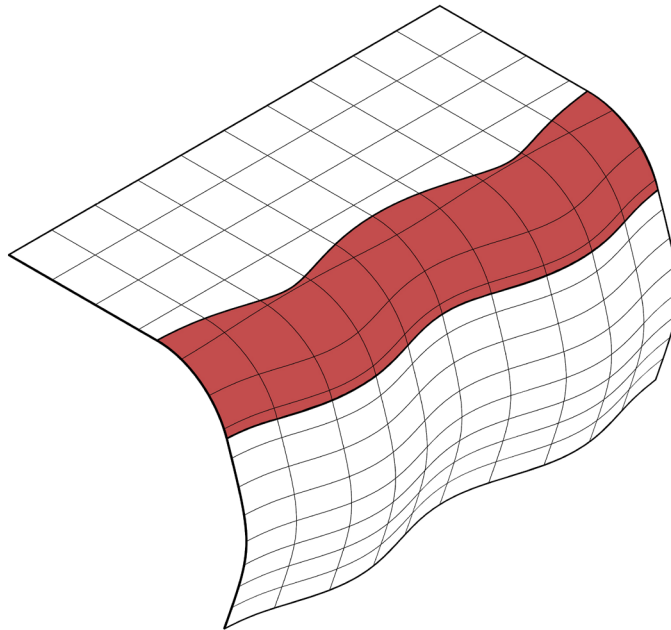


Figura 2.59: Resultado Fillet Surface.

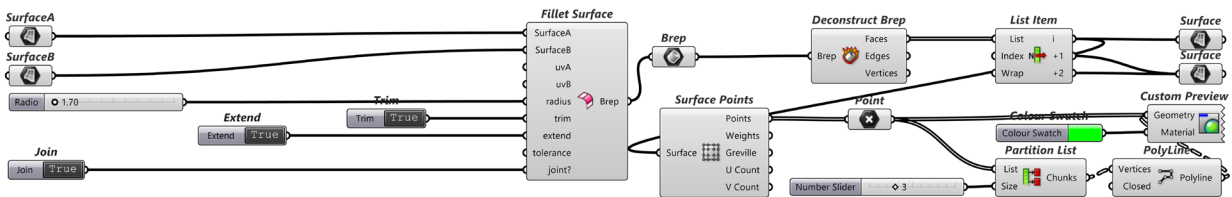


Figura 2.60: Algoritmo Fillet Surface.

2.4.3. Blend Surface

El nodo **Blend Surface**, creado por Flexibility, permite generar una superficie de transición entre dos bordes de superficies garantizando continuidad en posición, tangencia o curvatura entre ellas. Este proceso puede lograrse con los nodos analizados anteriormente, **Fillet Edge** o **Fillet Chamfer Edge 1**, configurando la opción *Blend* en el parámetro *Type Blend*. Sin embargo, estos nodos solo funcionan cuando las superficies están unidas. Este nuevo nodo se utiliza exclusivamente cuando las superficies están separadas y la superficie de fusión define automáticamente el parámetro de radio a partir de la distancia entre las superficies.

1. Preparación del modelo

Es necesario disponer de dos superficies NURBS, estas superficies tienen que estar separadas, ya que la distancia entre las superficies es el parámetro del radio que define la superficie de fusión.

2. Acceso al nodo

El nodo *Blend Surface*, se encuentra en la barra de herramientas Flexibility en superficie (*Flexibility* → *Surface*) o escribiendo directamente **Blend Surface** en el buscador de nodos.

3. Selección de superficies

El nodo requiere como entradas principales dos superficies (*SurfaceA* y *SurfaceB*). Una vez definidas las superficies, el siguiente paso es seleccionar los bordes que se desean fusionar. Para ello, se utiliza el nodo **slider** o un **panel** que indique el número correspondiente al borde deseado.

Es fundamental asegurarse de que los bordes tengan la dirección correcta. En caso de que no coincidan, se puede corregir utilizando el nodo **Boolean Toggle (True/False)**, asignándolo a las entradas *revA* y *revB* del nodo.

4. Configuración principal

La configuración principal del nodo es la elección del tipo de continuidad en cada uno de los bordes seleccionados:

- *Position (G0)*: Genera una superficie básica sin continuidad en la tangencia.
- *Tangency (G1)*: Garantiza una continuidad en la tangencia entre las superficies.
- *Curvature (G2)*: Asegura una transición más suave, con continuidad en la curvatura.

5. Ajustes adicionales

- *DomainA* y *DomainB*: estas entradas permiten especificar los dominios de los bordes seleccionados en las superficies *SurfaceA* y *SurfaceB*. Los dominios controlan qué parte del borde se utilizará para la generación de la superficie de fusión. Es útil cuando se quiere realizar la fusión de una sección específica. Los valores para estos dominios se especifican mediante un rango numérico como {0, 1} o una fracción del dominio total del borde.

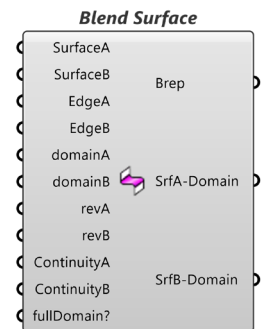


Figura 2.61: Icono Blend Surface.

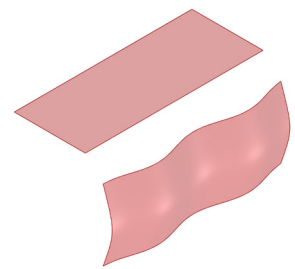


Figura 2.62: Superficies base.

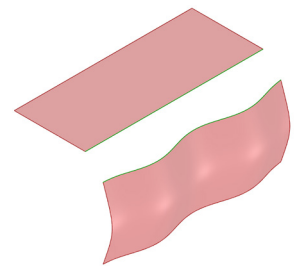


Figura 2.63: Selección borde.

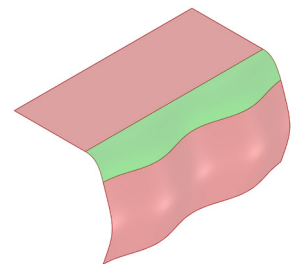


Figura 2.64: Previsualización.

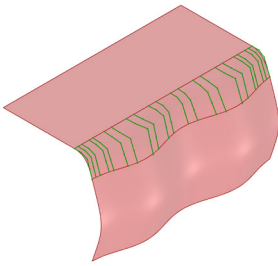


Figura 2.65: Malla de control de la superficie.

- *FullDomain*: Esta entrada es un **Boolean Toggle** (*True/False*) que define si se debe utilizar todo el dominio de los bordes seleccionados:
 - *True*: Se utiliza el dominio completo de ambos bordes para generar la superficie
 - *False*: Permite personalizar los dominios mediante las entradas *DomainA* y *DomainB*, lo que da más control sobre las áreas específicas a fusionar.

El resultado es una superficie de fusión que conecta las dos superficies seleccionadas de manera fluida a partir de la configuración elegida. Problemas encontrados durante su ejecución:

- Comprobar que la dirección de los bordes sea la misma, ya que una dirección incorrecta provocará errores en el resultado final de la superficie de fusión.

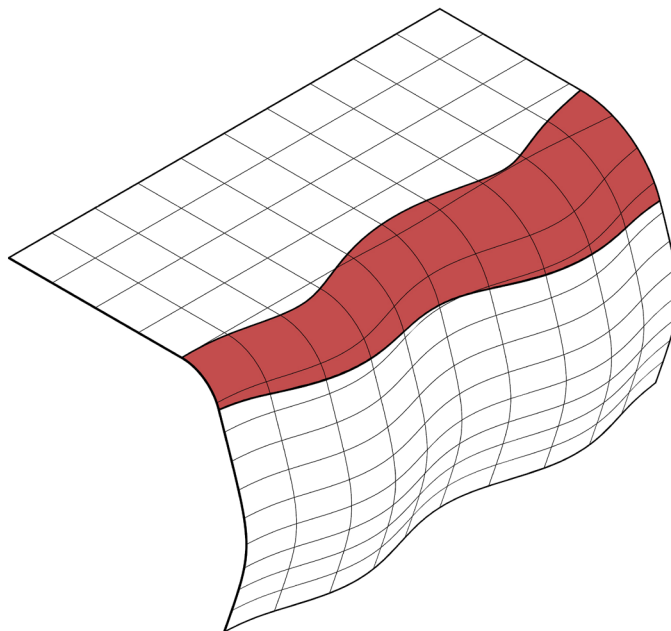


Figura 2.66: Resultado Blend Surface.

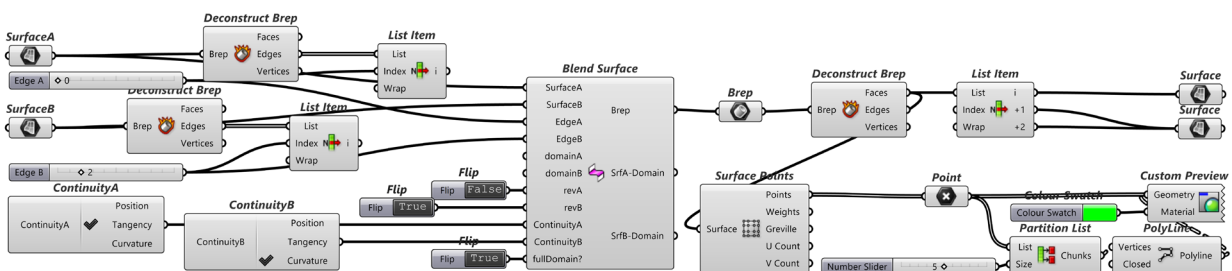


Figura 2.67: Algoritmo Blend Surface.

2.5. Conclusiones herramientas

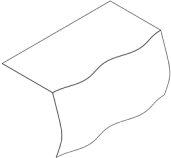
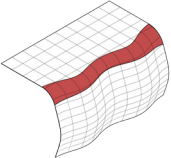
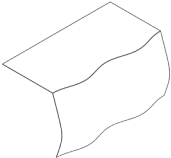
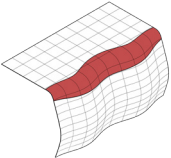
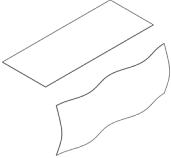
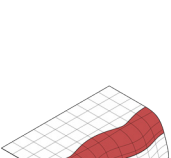
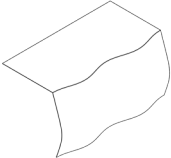
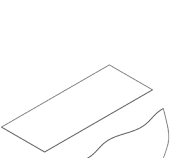
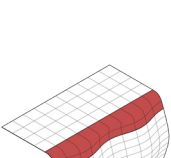
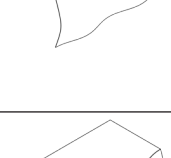
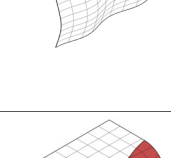
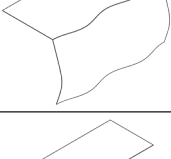
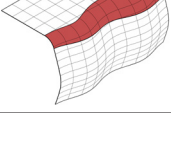
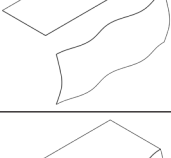
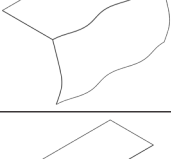
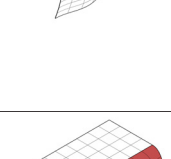
En este apartado se resumen las características y aplicaciones de los comandos analizados en Rhinoceros y Grasshopper, destacando sus fortalezas, limitaciones y casos de uso. Se comparan ambos programas para evaluar cuál es más avanzado en la fusión de superficies. Se incluye una tabla con un resumen de los comandos: el programa utilizado, la relación geométrica inicial de las superficies, la configuración principal, los ajustes adicionales y el resultado obtenido, ofreciendo así una visión comparativa de sus capacidades en la fusión de superficies.

A continuación, se resumen las funcionalidades y resultados obtenidos de los comandos analizados:

1. Rhinoceros:
 - *Fillet Edge*: Genera transiciones redondeadas con un radio variable entre superficies unidas.
 - *Blend Edge*: Genera transiciones suaves con continuidad G_2 (curvatura) entre superficies unidas.
 - *Fillet Surface*: Genera transiciones redondeadas entre superficies unidas o separadas.
 - *Blend Surface*: Genera transiciones entre superficies separadas con opciones avanzadas de continuidad (*Position (G0)*, *Tangency (G1)*, *Curvature (G2)*, G_3 y G_4).
2. Grasshopper:
 - *Fillet Chamfer Edge 1 (Flexibility)*: Una burbuja que incluye las funcionalidades Fillet, Chamfer y Blend, dependiendo de la configuración seleccionada.
 - *Fillet Surface (Flexibility)*: Genera transiciones redondeadas entre superficies separadas.
 - *Blend Surface (Flexibility)*: Fusión de superficies con continuidad limitada (*Position (G0)*, *Tangency (G1)* y *Curvature (G2)*).

Tras analizar las fortalezas y limitaciones de Rhinoceros y Grasshopper, se concluye que ambos programas presentan ventajas dependiendo de las necesidades del proyecto. Rhinoceros destaca por su flexibilidad en la configuración de transiciones, ofreciendo opciones avanzadas de continuidad (hasta G_4) y la posibilidad de agregar curvas intermedias para una mayor definición en las superficies de fusión, sus herramientas intuitivas permiten ajustes visuales rápidos mediante el ratón, aunque la edición visual de las curvas intermedias limita la precisión. En cambio, Grasshopper sobresale por su precisión y parametrización, permitiendo un control exacto de los ajustes y simplificando los flujos de trabajo mediante nodos unificados. Su capacidad de automatización es eficiente en diseños iterativos y complejos, pero carece de soporte para curvas intermedias en la transición de superficies y tiene opciones de continuidad limitadas a G_0 , G_1 y G_2 .

TABLA 1 : Resumen herramientas en CAGD

Operación	Programa	Superficies iniciales	Configuración principal	Ajuste Adicional	Resultado
Fillet Edge	Rhinoceros		Radio constante Añadir curvas Radio variable	RailType Trim Join	
Blend Edge	Rhinoceros		Radio constante Añadir curvas Radio variable	RailType Trim Join	
Fillet Surface	Rhinoceros		Radio constante	Range Blend Type Tangent Bulge Trim Extend	
					
Blend Surface	Rhinoceros		Continuidad de la superficie: Posición (Go) Tangencia (G1) Curvatura (G2) G3 G4	Add Shapes Straighten Interior Shapes Refine Planar sections Same Height	
Fillet Edge	Grasshopper + Flexibility		Radio inicial Radio final	Blend Type RailType	
Fillet Surface	Grasshopper + Flexibility		Radio constante	Trim Extend Joint?	
					
Blend Surface	Grasshopper + Flexibility		Continuidad de la superficie: Posición (Go) Tangencia (G1) Curvatura (G2)	Domain A Domain B FullDomain	

Podemos concluir que Rhinoceros es más adecuado para proyectos que requieren flexibilidad y opciones avanzadas de configuración, especialmente cuando la definición de curvas intermedias es esencial. Sin embargo, su falta de precisión en los ajustes visuales puede ser una limitación en proyectos que demandan exactitud. Grasshopper es ideal para tareas que priorizan la precisión y la automatización, aunque su capacidad en la fusión de superficies es más limitada en comparación con Rhinoceros.

Para combinar las fortalezas de ambos programas, se propone el desarrollo de un nuevo componente en Grasshopper que permita incorporar curvas intermedias. De esta forma, se lograría una herramienta más completa y versátil para la fusión de superficies, aprovechando tanto la precisión y parametrización de Grasshopper como las capacidades avanzadas de configuración de Rhinoceros.

3. Algoritmo de blending en Grasshopper

El desarrollo del nodo `Blending` en Grasshopper surge como respuesta a las limitaciones detectadas en las herramientas nativas y complementarias del programa para la fusión de superficies. Su objetivo principal es permitir la creación de una superficie de transición entre dos superficies separadas, integrando la posibilidad de posicionar una curva intermedia y modificar las curvas base que determinan la fusión.

Este nodo no solo amplía las funcionalidades de Grasshopper, sino que también mejora la precisión y la personalización del diseño al combinar la parametrización característica del programa con configuraciones más avanzadas, como la incorporación de curvas intermedias, similar a las opciones disponibles en Rhinoceros.

A continuación, se detalla el desarrollo del nodo `Blending`, utilizando como base las superficies NURBS creadas previamente en el apartado 2.2.4 Superficies NURBS en Grasshopper.

3.1 Blending

Objetivo: Crear un nodo que genere una superficie de fusión entre dos superficies separadas, permitiendo incorporar una curva intermedia en la transición y modificar las curvas base que definen la superficie de fusión.

El nodo desarrollado `Blending`, tiene como objetivo principal la creación de superficies de transición fluidas entre dos superficies separadas. Para lograrlo, se parte de los bordes de las superficies seleccionadas, aplicando un primer filtro que ajusta la dirección de la curva mediante un `Boolean Toggle`. Posteriormente, se evalúan los vectores normales en los bordes a través del nodo `Evaluate Surface`.

Para definir los puntos de evaluación necesarios en el borde, se utiliza `Evaluate Curve`, lo que proporciona tanto los puntos como el vector tangente en cada posición. Estos puntos se controlan mediante un `Gene Pool`, que permite ajustar dinámicamente la ubicación. El vector normal obtenido de `Evaluate Surface` es rotado 90° utilizando el vector tangente como eje y su amplitud es ajustada mediante el nodo `Amplitude`. Aquí, nuevamente se emplea un `Gene Pool` para controlar la magnitud de los vectores de cada borde.

Un segundo filtro se implementa para asegurar que los vectores estén orientados correctamente en la dirección deseada. Este ajuste se realiza utilizando un **Boolean Toggle**, que permite invertir la dirección de los vectores según sea necesario. Con los vectores configurados correctamente, se utiliza el nodo **Bézier Span** para generar las curvas base que definen la superficie de fusión. A partir de estas curvas base, se emplea el nodo **Tween Through Curves Along Curve** para crear curvas adicionales entre las bases y aumentar la precisión. Finalmente, con las curvas obtenidas, el nodo **Sweep2** se encarga de generar una superficie fluida y precisa.

Proceso:

1. Dirección de la curva del borde
Se utiliza un **Boolean Toggle** (*true/false*) como primer filtro para ajustar la dirección inicial de las curvas en los bordes seleccionados con **Flip Curve**.
2. Obtención de vectores
Los vectores normales se obtienen utilizando **Evaluate Surface** en combinación con **Evaluate Curve**, que define los puntos en los bordes y proporciona el vector tangente necesario. Es importante que las superficies estén parametrizadas y para asegurar que el punto está en la superficie utilizamos **Surface Closest Point**.
3. Amplitud de vectores
Los vectores normales son rotados en 90° con respecto al vector tangente y escalados utilizando **Amplitude**, cuyo valor se controla con un **Gene Pool**.

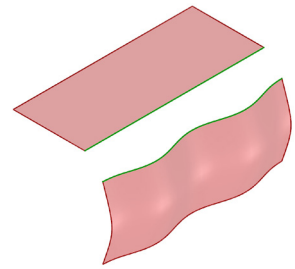


Figura 3.1: Selección de bordes.

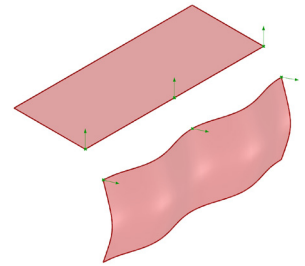


Figura 3.2: Vectores normales.

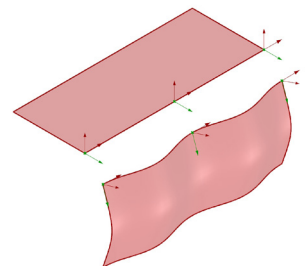
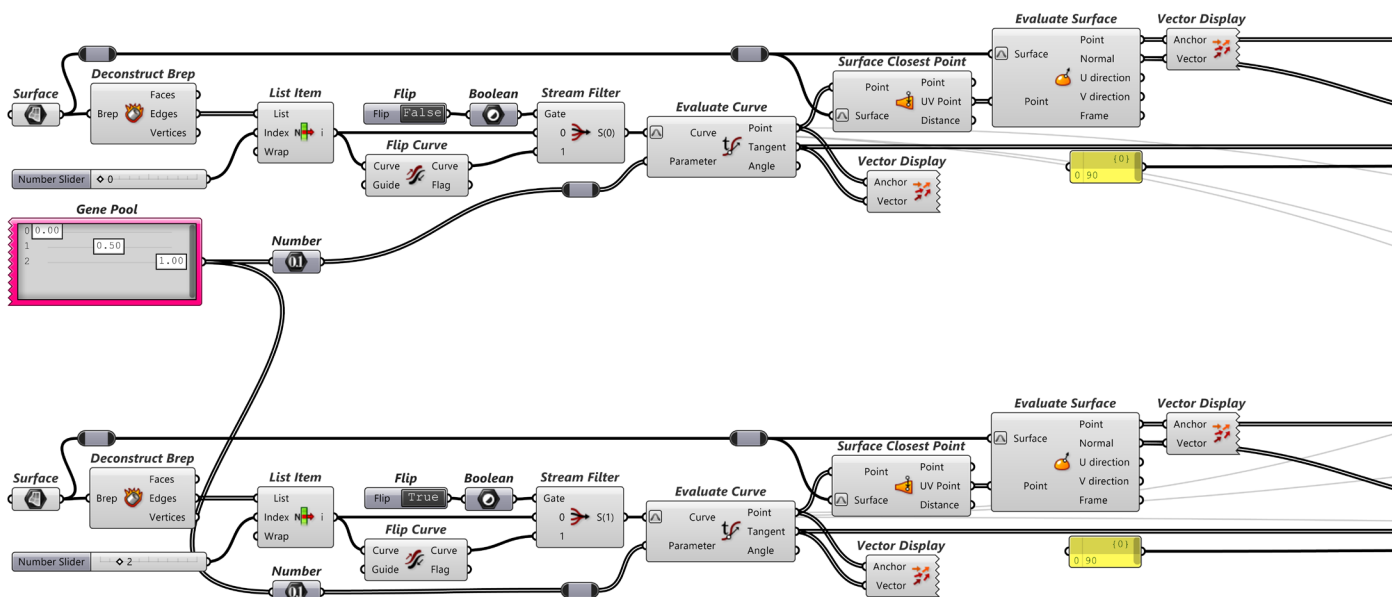


Figura 3.3: Rotación vectores normales.

Figura 3.4: Algoritmo Blending.



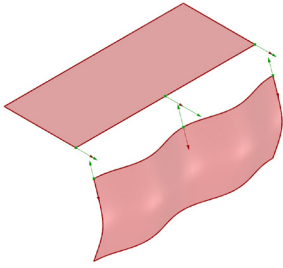


Figura 3.5: Amplitud y dirección vectores.

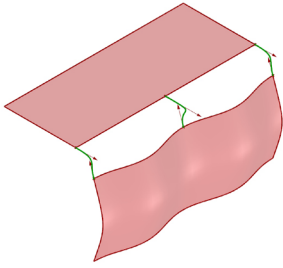


Figura 3.6: Curvas de Bézier.

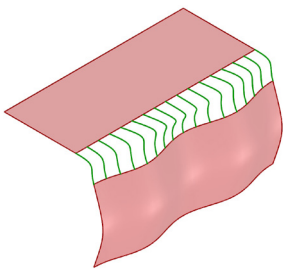


Figura 3.7: Curvas intermedias adicionales.

4. Segundo filtro - Dirección de vectores
Se aplica un segundo filtro con un **Boolean Toggle** (*true/false*), que asegura que los vectores estén orientados correctamente, permitiendo invertir su dirección si es necesario.

5. Curvas de Bézier
A partir de los vectores ajustados, se utiliza **Bézier Span** para construir las curvas base que definen la estructura inicial de la superficie de fusión.

6. Creación de la superficie
Con el nodo **Tween Through Curves Along Curve**, se generan curvas adicionales entre las bases para suavizar la transición. Posteriormente, el nodo **Sweep2** crea la superficie de fusión final.

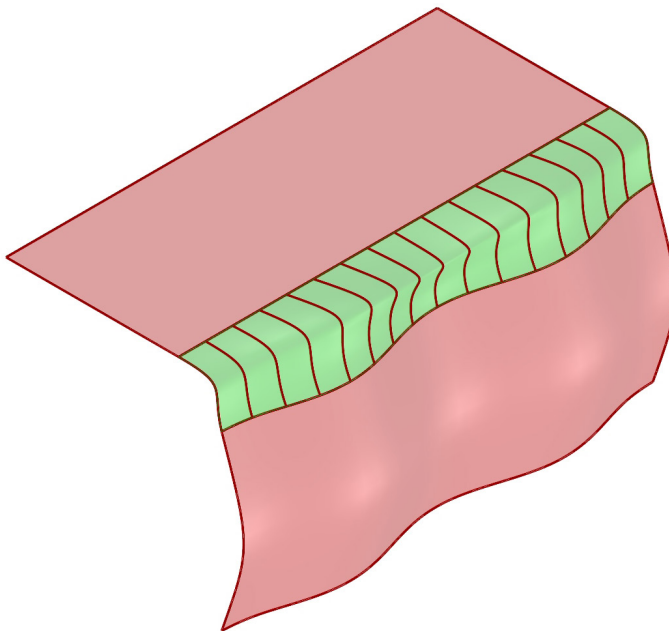
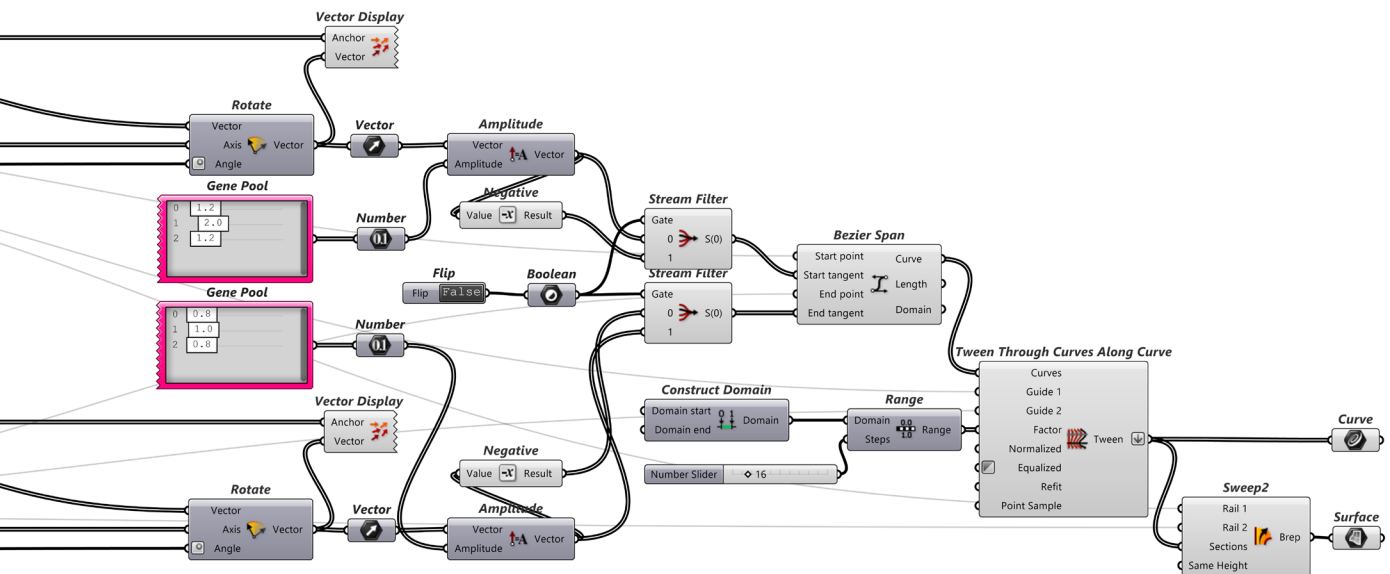


Figura 3.8: Resultado Blending.



3.2 Creación nodo

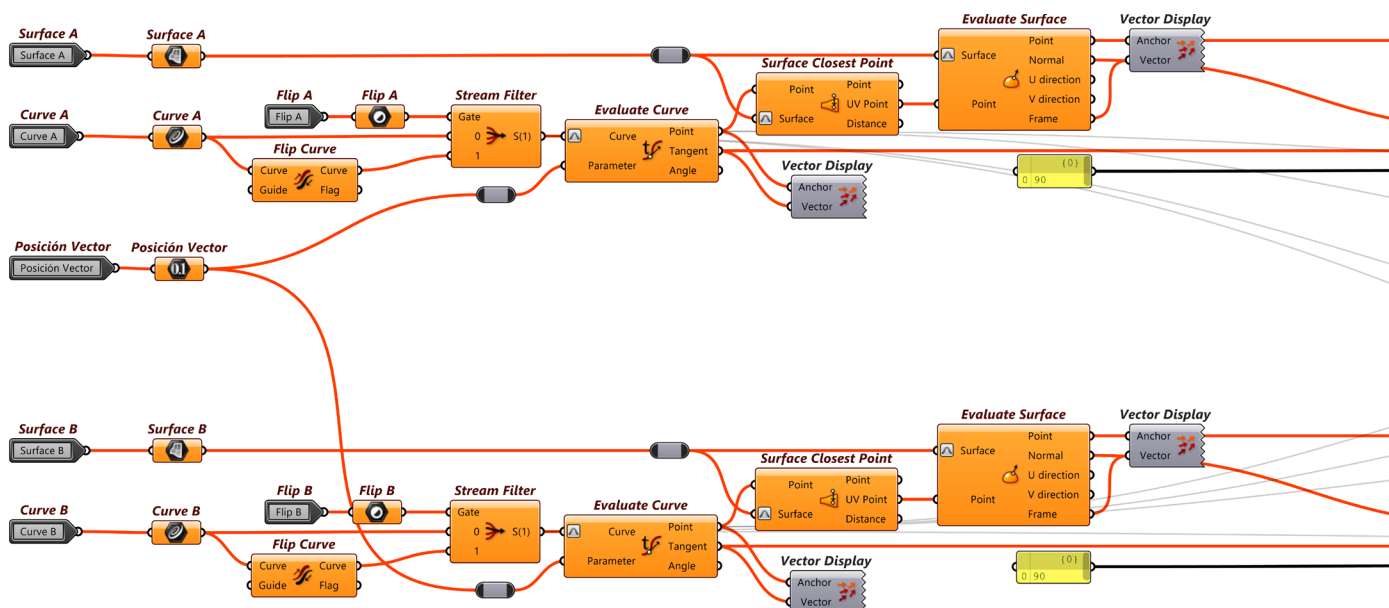
Para convertir el algoritmo de Blending en un nodo personalizado, utilizamos la funcionalidad de **Cluster** en Grasshopper. Este proceso consiste en agrupar los componentes necesarios dentro de un único contenedor y definir entradas y salidas mediante los nodos **Cluster Input** y **Cluster Output**, respectivamente.

Las entradas del nodo son:

1. *Surface A*: Primera superficie a fusionar.
2. *Curve A*: Curva asociada al borde de Surface A.
3. *Flip A*: Opción para invertir la dirección del borde de Surface A (Boolean Toggle).
4. *Surface B*: Segunda superficie a fusionar.
5. *Curve B*: Curva asociada al borde de Surface B.
6. *Flip B*: Opción para invertir la dirección del borde de Surface B (Boolean Toggle).
7. *Posición Vector*: Control para determinar la ubicación de los puntos en los bordes (Gene Pool).
8. *Flip Vector*: Opción para invertir la dirección de los vectores normales (Boolean Toggle).
9. *Amplitud A*: Control para ajustar la magnitud del vector normal en Surface A (Gene Pool).

En la figura 3.9, los nodos dentro del cluster aparecen en color naranja debido a la ausencia de datos o parámetros asignados, lo que indica que aún no han recibido la información necesaria para su correcto funcionamiento.

Figura 3.9: Algoritmo cluster Blending.



10. *Amplitud B*: Control para ajustar la magnitud del vector normal en Surface B (Gene Pool).

Las salidas del nodo son:

1. *Curves*: Curvas generadas para definir la superficie de transición.
2. *Surface*: Superficie de fusión resultante.

El resultado es un nodo único y funcional que encapsula todo el algoritmo de Blending, permitiendo al usuario acceder a las funcionalidades de fusión de superficies de manera sencilla y eficiente.

Para comprobar la utilidad y funcionamiento del nodo desarrollado, será aplicado en dos casos de estudio: Galaxy SOHO de Zaha Hadid y The Yas Hotel de Asymptote Architecture. Estos proyectos permitirán evaluar cómo el nodo responde a geometrías arquitectónicas complejas y comprobar su comportamiento en la fusión de superficies.

Figura 3.10: Panel de búsqueda.

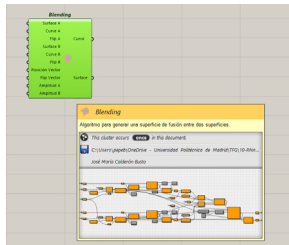
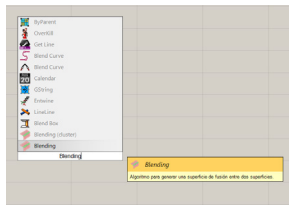


Figura 3.11: Descripción nodo.

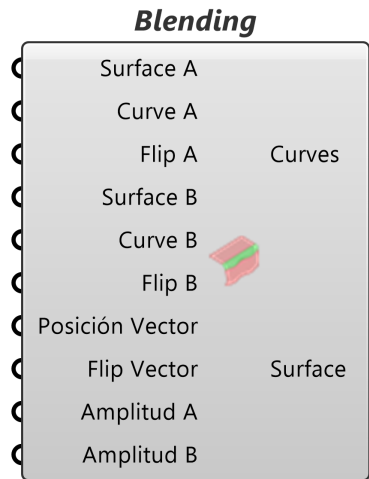
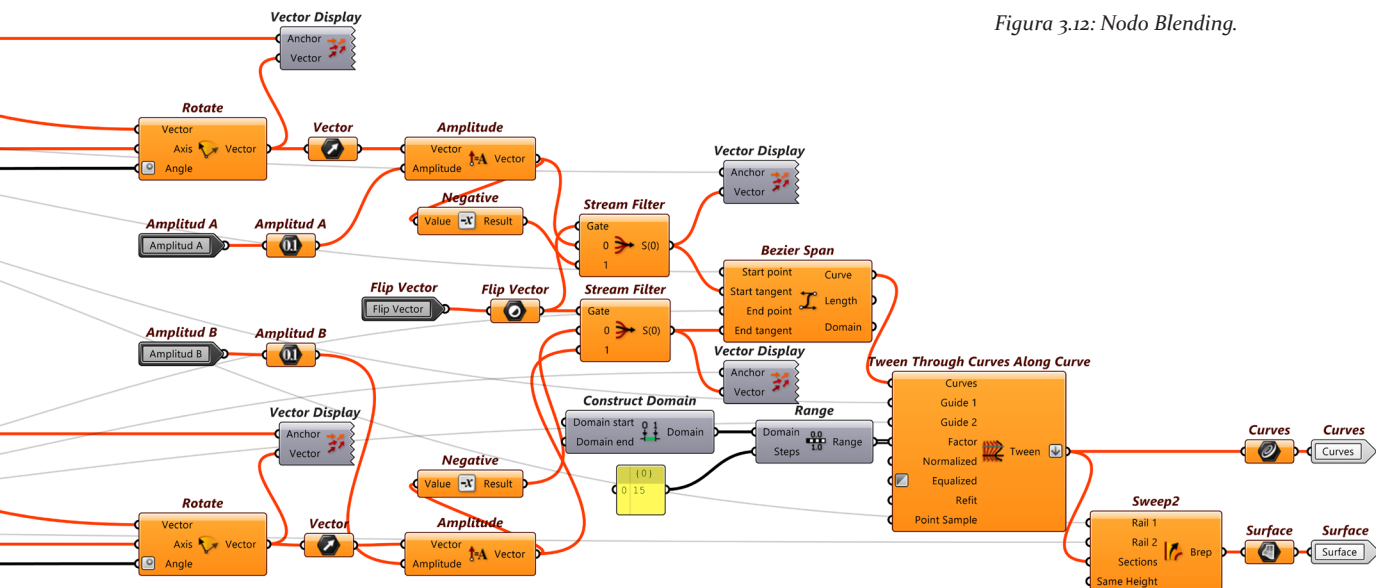


Figura 3.12: Nodo Blending.



4. Modelización arquitectónica



Figura 4.1: BMW Bubble, Alemania.



Figura 4.2: Golden Sands Lake Grand Theater, China.

En este apartado se desarrolla la modelización de proyectos arquitectónicos utilizando Grasshopper. El objetivo principal es aplicar el nuevo componente desarrollado *Blending* en el contexto de cubiertas arquitectónicas.

Para este estudio, se ha optado por analizar proyectos que destacan por su geometría fluida y su interacción entre edificios independientes unidos por cubiertas o envolventes arquitectónicas. Este tipo de diseño ofrece el escenario ideal para explorar la fusión de superficies, ya que las transiciones entre elementos deben ser suaves y visualmente integradas, como podemos ver en el proyecto BMW Bubble en Alemania (Figura 4.1) y el Golden Sands Lake Grand Theater en China (Figura 4.2).

Los proyectos que se van a analizar son:

1. Galaxy SOHO (2012), diseñado por Zaha Hadid Architects en Beijing, China, cuyo diseño se caracteriza por volúmenes conectados mediante cubiertas fluidas. En este caso, se estudiará la cubierta que une dos de los edificios del complejo.
2. The YAS Hotel (2009), diseñada por Asymptote Architecture en Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos. Este proyecto destaca por su malla envolvente que conecta los dos edificios principales del hotel, creando un elemento de unión que será modelado para analizar las técnicas de fusión.

Ambos casos de estudio representan la interacción entre geometrías que permiten poner en práctica las herramientas paramétricas de Grasshopper. Estos estudios no solo servirán para comprender como se generan estas geometrías, sino también para comprobar la eficacia del nodo *Blending* en la fusión de superficies.

4.1. Galaxy SOHO

El Galaxy SOHO, diseñado por la arquitecta Zaha Hadid y completado en 2012. Un complejo arquitectónico ubicado en Beijing, China. El proyecto representa un enfoque innovador en la integración de formas fluidas y orgánicas. Este complejo abarca un área total de 330.000 m² y está formado por cuatro volúmenes principales, conectados a través de plataformas. Cada volumen está formado por oficinas, áreas comerciales y de ocio, generando un espacio multifuncional que se disponen entorno a un patio central [10, 11].

Un aspecto destacado es la transición entre las cubiertas y los volúmenes. Las cubiertas no solo actúan como elementos de unión, sino que también acentúan la percepción de continuidad en el espacio, desdibujando los límites entre los distintos volúmenes. Este enfoque lo convierte en un caso de estudio relevante para analizar la fusión de superficies dentro del diseño paramétrico.

El objeto de trabajo está enfocado en modelar la cubierta que une dos de los edificios principales como vemos en la figura 4.5, que refleja la continuidad y fluidez característica de esta obra. Esta estructura no solo conecta físicamente las construcciones, sino que también crea un espacio funcional y estético.

Modelización cubiertas

Objetivo: Modelar las dos cubiertas principales, que serán utilizadas posteriormente en el proceso de fusión de superficies.

Para crear las cubiertas, partimos de una curva base en forma de elipse. Esta curva se repite en el eje Z utilizando el nodo `Move`, definiendo tanto la altura máxima como el número de divisiones mediante un rango. Posteriormente, las curvas se escalan en el plano XY empleando un `Graph Mapper` con una gráfica de Bézier, lo que permite ajustar dinámicamente la forma. Finalmente, las curvas escaladas se unen mediante el nodo `Loft` para generar la superficie principal. Para cerrar la parte superior de la cubierta, se selecciona la última curva generada, se aplica un `Offset` y se utiliza el nodo `Boundary Surfaces` para crear una tapa plana.

Proceso:

1. Creación de la elipse base

Se utiliza el nodo `Ellipse` para generar una curva base en forma de elipse. Los radios de la elipse se parametrizan a partir de un `slider`, lo que permite controlar el tamaño y la orientación de la cubierta desde el inicio.

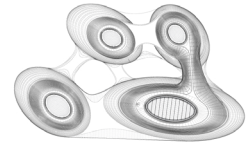


Figura 4.3: Planta Galaxy SOHO, Zaha Hadid.



Figura 4.4: Patio interior Galaxy SOHO, Zaha Hadid.

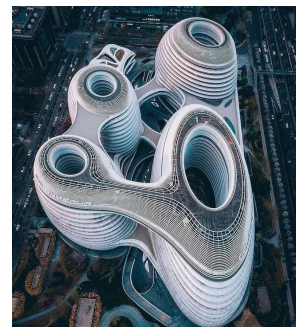


Figura 4.5: Cubierta Galaxy SOHO, Zaha Hadid.

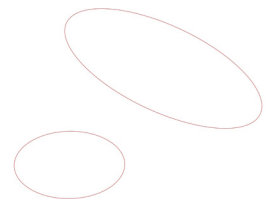


Figura 4.6: Creación de la elipse base.

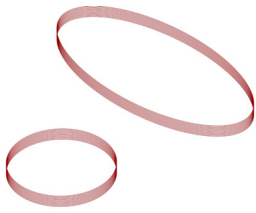


Figura 4.7: Repetición curva en eje Z.

2. Repetición curva en eje Z

La elipse creada se repite a lo largo del eje Z utilizando **Move**, donde se define un rango con el nodo **Range**. Este rango determina tanto la altura máxima que alcanzarán las curvas como el número total de repeticiones, distribuyendo las curvas de manera uniforme en la dirección vertical.

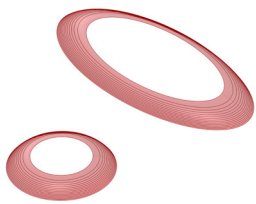


Figura 4.8: Curvas escaladas y superficie.

3. Escalar curvas

Las curvas distribuidas en el eje Z se escalan en el plano XY utilizando **Scale**. Para ajustar los factores de escala, se emplea un **Graph Mapper** configurado con una gráfica de Bézier lo que permite modificar la forma de las curvas de manera gradual desde un valor inicial de 1.00 hasta un valor final reducido, como 0.70. Este escalado crea una transición fluida en la geometría.

4. Creación de la superficie

Las curvas escaladas se conectan entre sí mediante el nodo **Loft**, que genera una superficie tridimensional continua. Este nodo se encarga de interpolar suavemente las curvas para crear una superficie orgánica y uniforme.



Figura 4.9: Resultado cubiertas.

5. Creación de la tapa plana

Para cerrar la parte superior de la cubierta, se selecciona la última curva generada mediante el nodo **List Item**. A esta curva se le aplica un **Offset** para ajustar su tamaño, y luego se utiliza el nodo **Boundary Surfaces** para convertirla en una superficie plana, completando así la geometría de la cubierta.

Resultado: Se obtienen dos superficies que representan las cubiertas del Galaxy SOHO, con formas orgánicas y un diseño fluido. Estas cubiertas están listas para ser utilizadas en el proceso de fusión de superficies, el cual se desarrollará en el siguiente apartado.

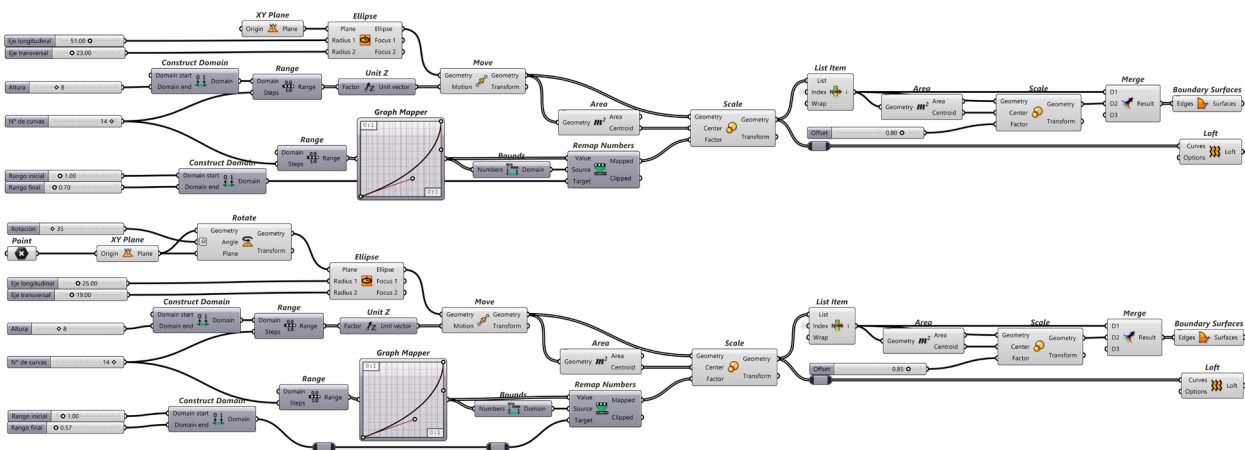


Figura 4.10: Algoritmo modelización cubiertas

Fusión de cubiertas

Objetivo: Aplicar el nuevo componente `Blending`, desarrollado en el capítulo 3, para fusionar las cubiertas previamente modeladas, logrando una superficie continua y fluida que conecte ambas geometrías.

El proceso comienza con la obtención de los bordes desde los que partirá la superficie de fusión. A partir de las superficies, extraemos las curvas con el nodo `Iso Curve`, ajustando su posición con `MD Slider`. Una vez tenemos los bordes, se aplica el nodo `Blending` para crear la superficie de fusión, configurando las curvas y vectores de dirección según las necesidades del diseño. Por último, se cierra la geometría con una tapa plana generada a partir de los bordes y curvas mediante `Boundary Surfaces`.

Proceso:

1. Obtención bordes

El primer paso consiste en seleccionar los bordes a partir de los cuales se iniciará la superficie de fusión. Para ello, se extraen las curvas de las superficies utilizando el nodo `Iso Curve`. Se emplea un `MD Slider` para definir la posición exacta de las curvas, lo que permite ajustar con precisión el inicio para la fusión.

2. Blending

Con las superficies de las cubiertas y los bordes definidos, se utiliza el nodo `Blending` para crear la superficie de fusión. Este nodo permite ajustar la posición y dirección de las curvas base y los vectores que definen la geometría, proporcionando un control detallado sobre la transición entre las superficies. Es esencial verificar la orientación de los bordes y vectores los parámetros *flip*, asegurando que estén correctamente. Se ajusta con un `Boolean Toggle (true/false)` para garantizar que el nodo funcione correctamente.

3. Creación de la tapa plana

Para cerrar la estructura, se seleccionan los bordes superiores de la superficie de fusión y las curvas utilizadas previamente en las cubiertas, empleando `List Item`. Con estas curvas, se genera una región delimitada mediante `Region Difference`, eliminando áreas redundantes y definiendo la forma de la tapa plana. Finalmente, el nodo `Boundary Surfaces` se utiliza para crear la superficie.

Resultado: Se obtiene una superficie de fusión continua y fluida, que conecta las dos cubiertas, garantizando una transición fluida entre ambas geometrías.

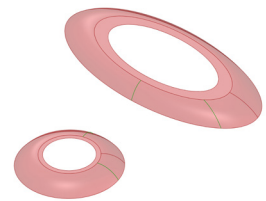


Figura 4.11: Obtención de bordes.

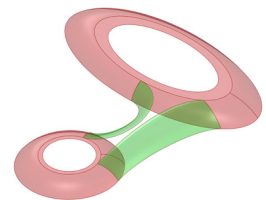


Figura 4.12: Blending.

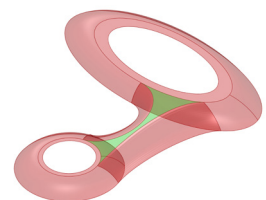


Figura 4.13: Tapa plana.

En este apartado, hemos recreado una de las características más complejas del Galaxy SOHO de Zaha Hadid. A través de un proceso paso a paso, desde la creación de las curvas base hasta la aplicación del nodo *Blending* desarrollado en este trabajo para la fusión de superficies, hemos logrado modelar una representación de las cubiertas que componen este innovador diseño arquitectónico.

El algoritmo desarrollado ha permitido no solo generar las cubiertas de manera eficiente, sino también experimentar con diferentes configuraciones paramétricas, como la escalabilidad de las curvas, el uso de gráficas y el control sobre la altura y forma de las mismas. Gracias a la flexibilidad de Grasshopper, cualquier ajuste o modificación realizado en los parámetros se actualiza de manera automática, lo que facilita el ajuste fino del modelo y la exploración de nuevas soluciones.

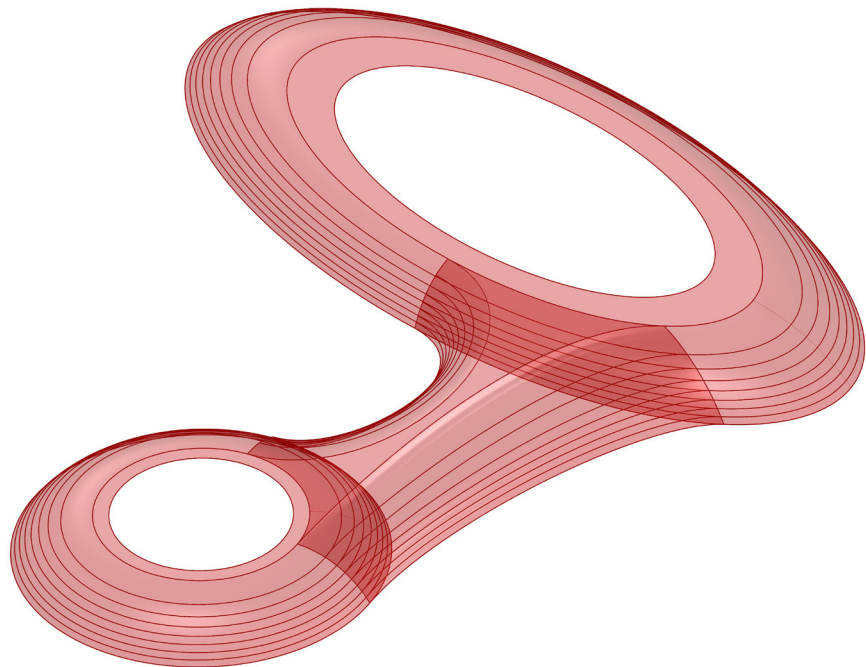


Figura 4.14: Modelización Galaxy SOHO.

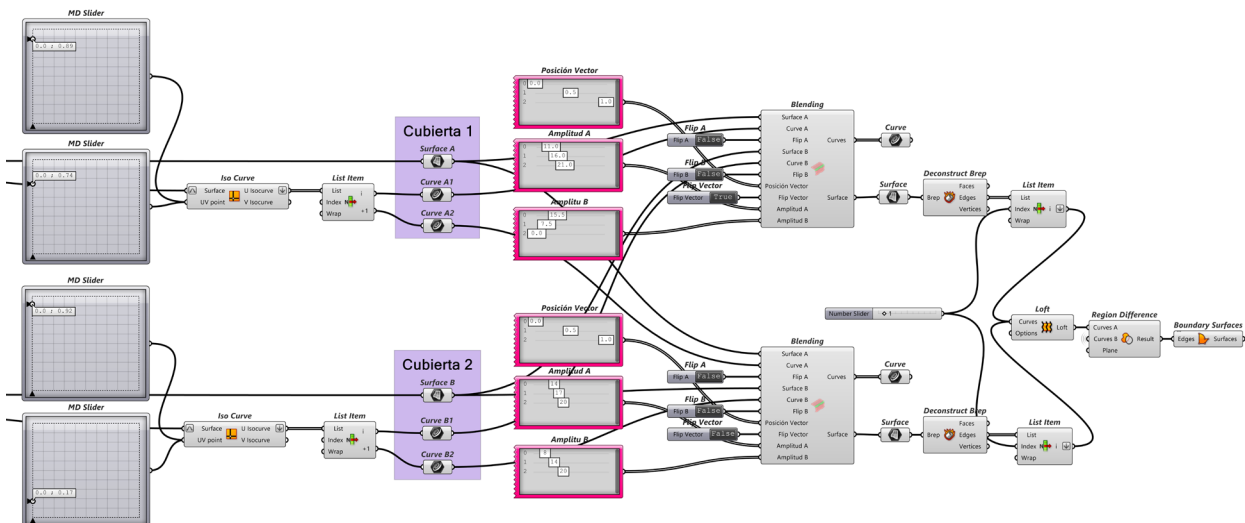


Figura 4.15: Algoritmo modelización cubiertas

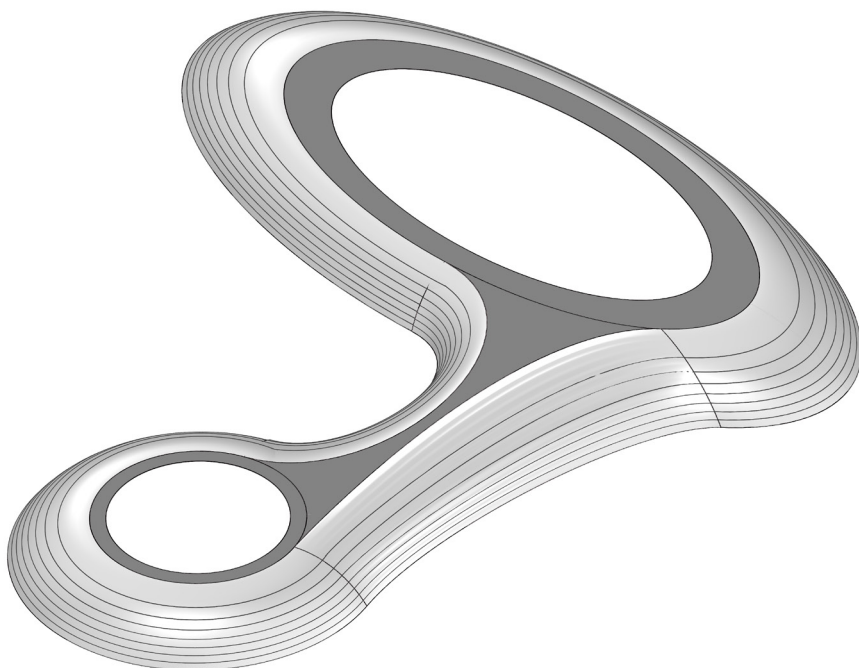


Figura 4.16: Visualización.

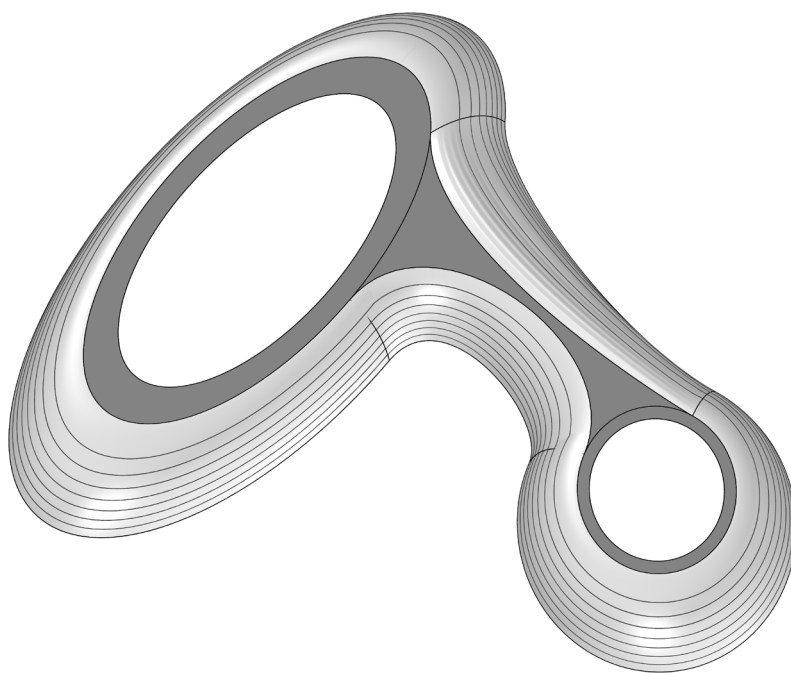


Figura 4.17: Visualización.

4.2 The YAS Hotel



Figura 4.18: The YAS Hotel, Asymptote Architecture.

The YAS Hotel, inaugurado en 2009, es un proyecto arquitectónico ubicado en la isla Yas, Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos. Diseñado por el estudio estadounidense Asymptote Architecture. Este lujoso complejo hotelero es reconocido por su diseño vanguardista, que combina innovación tecnológica, estética futurista y funcionalidad [12, 13].

El proyecto abarca dos edificios principales, que están conectados por una envolvente dinámica de malla de acero y vidrio. Esta estructura fluida cubre ambos volúmenes, creando un efecto visual único que evoca movimiento y luz, filtrando así la luz solar durante el día y transformándose en un espectáculo visual nocturno gracias a un sistema de iluminación LED multicolor.

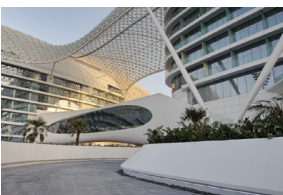


Figura 4.19: The YAS Hotel, Asymptote Architecture.

El objeto de trabajo está enfocado en modelar la malla envolvente que fue concebida como un sistema parametrizado, permitiendo ajustar y optimizar su diseño para adaptarse a los requisitos estructurales, lumínicos y ambientales. Este enfoque lo convierte en un caso de estudio para explorar la fusión de superficies, dado que la envolvente conecta los dos edificios principales mediante una transición fluida y continua.

Modelización cubiertas

Objetivo: Modelar las dos cubiertas para poder realizar el proceso de fusión de superficies y recrear la malla envolvente.

El proceso comienza con la generación de dos curvas base en forma de elipse, que representan las secciones principales de las cubiertas. Estas curvas se repiten en el eje Z mediante el nodo `Move`, configurando la altura máxima y el número de divisiones mediante un rango dinámico. A continuación, las curvas se escalan en el plano XY utilizando un `Graph Mapper` con una gráfica de Bézier, lo que permite ajustar de manera precisa la forma deseada.

Las curvas escaladas se combinan con el nodo `Loft` para generar las dos superficies principales, denominadas como Superficie A y Superficie B. Posteriormente, estas superficies se cortan para adaptarse al diseño final.

Para el corte de la Superficie A, se emplea el nodo `Brep | Plane` para obtener una curva a partir de un plano XY desplazado en el eje X. Con esta curva, se utiliza `Surface Split` para obtener la parte deseada de la superficie.

Para la Superficie B, el corte se realiza con el nodo `Split Brep`, utilizando la Superficie A. Finalmente, la Superficie B se mueve en el eje X para ajustar su posición en el modelo.

Proceso:

1. Creación de la elipse base

Se utiliza el nodo `Ellipse` para generar una curva base en forma de elipse. Los radios de la elipse se parametrizan a partir de un `slider`, lo que permite controlar el tamaño y la orientación de la cubierta desde el inicio.

2. Repetición curva eje Z

La elipse creada se repite a lo largo del eje Z utilizando `Move`, donde se define un rango con `Range`. Este rango determina tanto la altura máxima que alcanzarán las curvas como el número total de repeticiones, distribuyendo las curvas de manera uniforme en la dirección vertical.

3. Escalar curvas

Las curvas distribuidas en el eje Z se escalan en el plano XY utilizando `Scale`. Para ajustar los factores de escala, se emplea un `Graph Mapper` configurado con una gráfica de Bézier lo que permite modificar la forma de las curvas de manera gradual desde un valor inicial de 1.00 hasta un valor final reducido, como 0.70. Este escalado crea una transición fluida en la geometría.

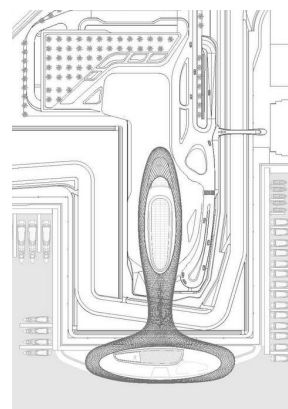


Figura 4.20: Planta, The YAS Hotel, Asymptote Architecture.



Figura 4.21: Creación de la elipse base.

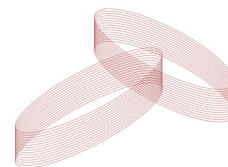


Figura 4.22: Repetición curva en eje Z.

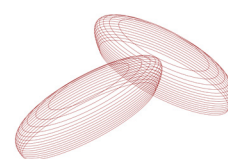


Figura 4.23: Curvas escaladas.

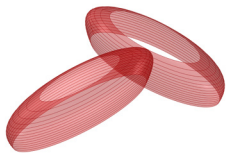


Figura 4.24: Creación de superficies.

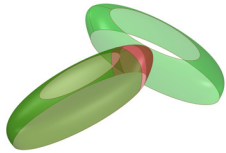


Figura 4.25: Corte superficies.

4. Creación de la superficie

Las curvas escaladas se conectan entre sí con el nodo **Loft** para generar las superficies principales. La Superficie A corresponde a la parte principal en el eje X, mientras que la Superficie B corresponde a la parte principal en el eje Y.

5. Corte superficie A

Se corta la Superficie A utilizando el nodo **Surface Split**. Necesitamos una curva que se genera con un plano XY desplazado en el eje X con **Brep | Plane**. Esta curva corta la superficie obteniendo la parte deseada de la superficie.

6. Corte superficie B

La Superficie B se corta utilizando el nodo **Split Brep**, empleando la Superficie A. Finalmente, esta superficie se mueve en el eje X para ajustarla en el diseño.

Resultado: El proceso produce las dos partes principales de la envolvente arquitectónica del YAS Hotel. Estas superficies están perfectamente adaptadas para ser utilizadas en el proceso de fusión de superficies, que se desarrollará en el siguiente apartado.

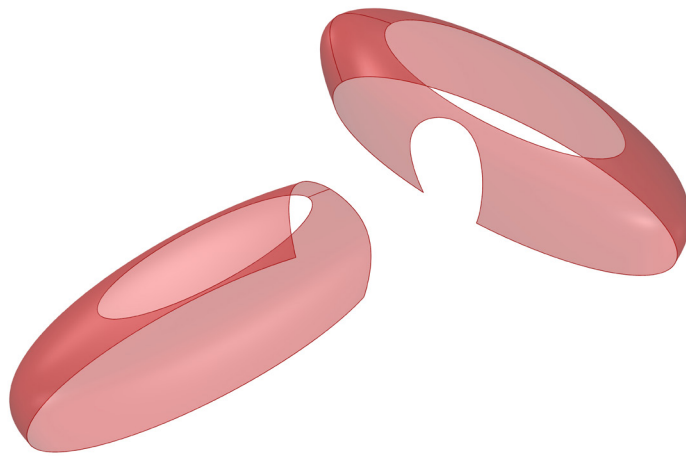


Figura 4.26: Obtención de bordes.

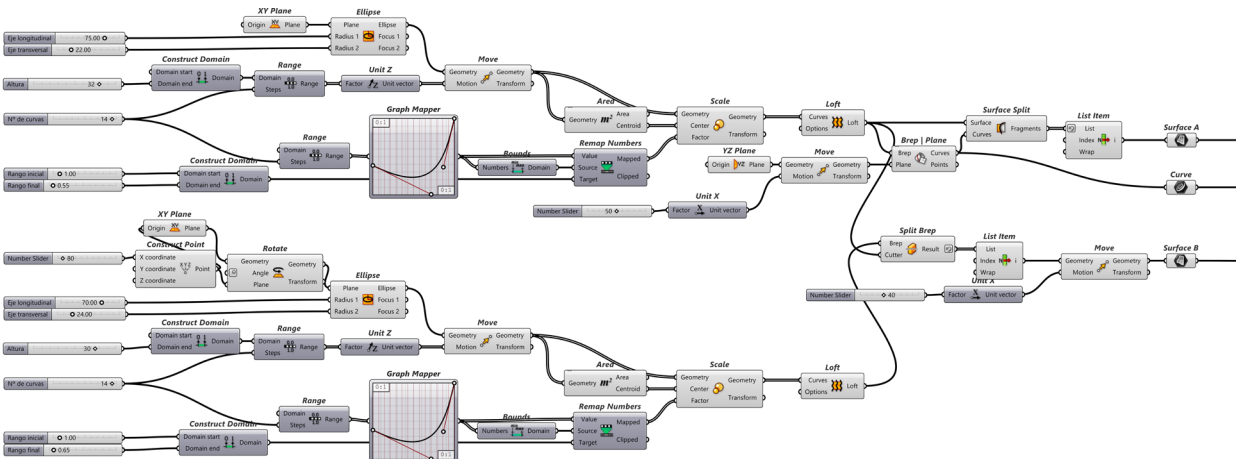


Figura 4.27: Algoritmo modelización cubiertas.

Fusión de cubiertas

Objetivo: Aplicar el nuevo componente **Blending**, desarrollado en el capítulo 3, para fusionar las superficies previamente modeladas, logrando una superficie continua y fluida para crear la envolvente.

El proceso comienza con la obtención de los bordes utilizando **Deconstruct Brep** y seleccionando los bordes con **List Item**. Una vez tenemos los bordes, se aplica el nodo **Blending** para crear la superficie de fusión, configurando las curvas y vectores de dirección según las necesidades del diseño.

Proceso:

1. Obtención bordes

El primer paso consiste en seleccionar los bordes a partir de los cuales se iniciará la superficie de fusión. Para ello, utiliza el nodo **Deconstruct Brep**, y se selecciona con **List Item**.

2. Blending

Con las superficies de las cubiertas y los bordes definidos, se utiliza el nodo **Blending** para crear la superficie de fusión. Este nodo permite ajustar la posición y dirección de las curvas base y los vectores que definen la geometría, proporcionando un control detallado sobre la transición entre las superficies. Es esencial verificar la orientación de los bordes y vectores los parámetros *flip*, asegurando que estén correctamente. Se ajusta con un **Boolean Toggle** (*true/false*) para garantizar que el nodo funcione correctamente.

Resultado: Se obtiene una superficie de fusión continua y fluida, que conecta las dos partes de la envolvente.



Figura 4.28: Selección bordes.

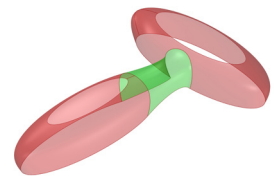


Figura 4.29: Blending.

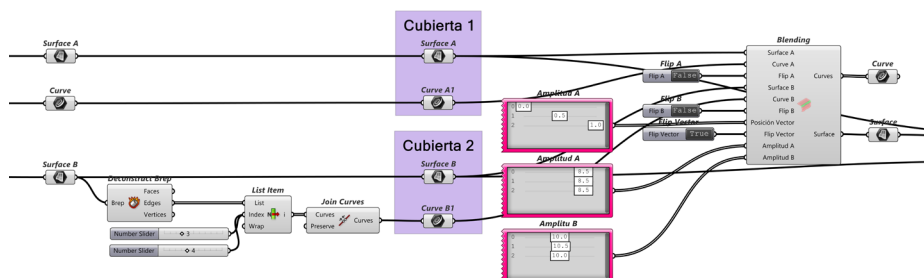


Figura 4.30: Algoritmo Blending.

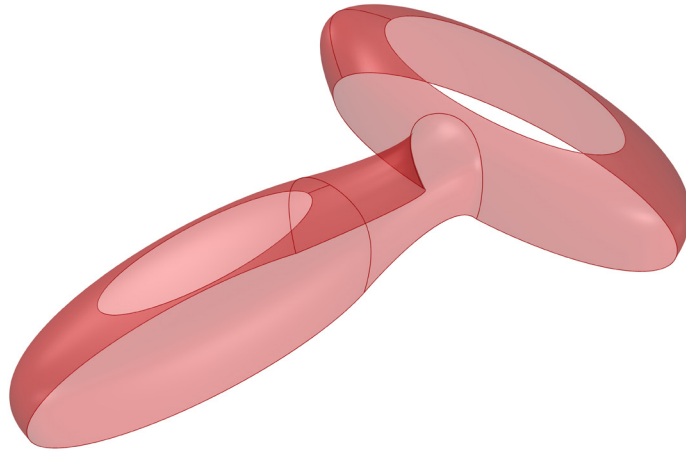


Figura 4.31: Resultado Blending.

Envolvente

Objetivo: Modificar la superficie obtenida anteriormente para recrear la envolvente del proyecto original.

Una vez obtenida la envolvente completa mediante el modelado de las cubiertas principales, es necesario recortar la superficie para ajustarla al diseño del proyecto original. Este proceso implica el posicionamiento estratégico de puntos en la curva base, el desplazamiento de estos puntos en el eje Z y su proyección en la superficie para crear una curva precisa que delimitará las áreas de corte.

El primer paso consiste en utilizar el nodo `Evaluate Curve` para posicionar puntos en la curva base, con la ayuda de un `Gene Pool` que permite ajustar dinámicamente las posiciones de los puntos a lo largo de la curva. A continuación, los puntos se desplazan en el eje Z mediante el nodo `Move`, nuevamente empleando un `Gene Pool` para controlar la altura de cada punto con mayor precisión.

Los puntos desplazados se proyectan sobre la superficie utilizando el nodo `Brep Closest Point` y con los puntos proyectados se genera una curva suave mediante `Interpolate`. Finalmente, con el nodo `Surface Split`, se corta la superficie utilizando esta curva como límite, seleccionando las partes necesarias con `List Item` para formar la envolvente final.

Proceso:

1. Posicionamiento de puntos

Se extraen puntos desde la curva base utilizando el nodo **Evaluate Curve**, controlando su posición con un **Gene Pool**. Estos puntos se desplazan en el eje Z mediante el nodo **Move**, ajustando la altura con un segundo **Gene Pool**.

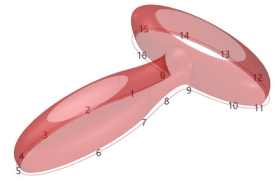


Figura 4.32: Posicionamiento de puntos.

2. Creación de la curva

Los puntos desplazados se proyectan sobre la superficie con **Brep Closest Point**, obteniendo una serie de puntos precisos sobre la geometría. Estos puntos se conectan mediante el nodo **Interpolate** para generar una curva suave y continua que delimitará el área de corte.

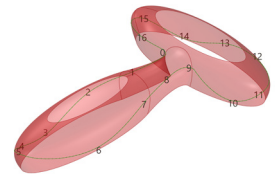


Figura 4.33: Creación de la curva.

3. Cortar superficie

Con la curva creada, se utiliza el nodo **Surface Split** para dividir la superficie en partes. Posteriormente, se seleccionan las secciones deseadas utilizando **List Item** para conformar la envolvente ajustada al diseño.

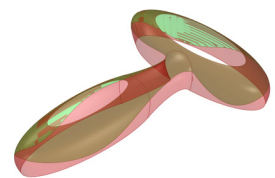


Figura 4.34: Superficie cortada.

Resultado: El proceso produce una envolvente arquitectónica que refleja con precisión las características del diseño original del YAS Hotel. La geometría obtenida está lista para su panelización en el siguiente apartado.

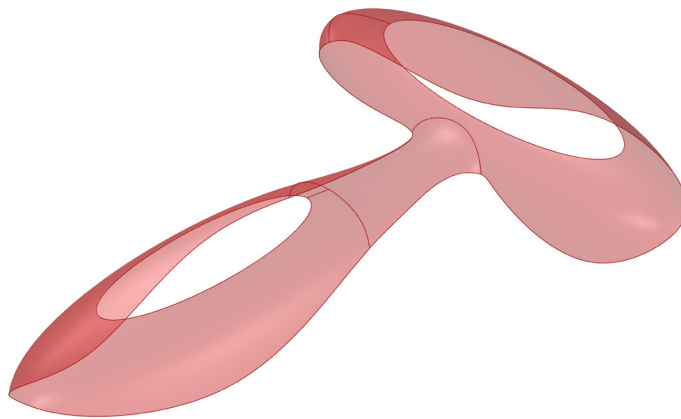


Figura 4.35: Envolvente.

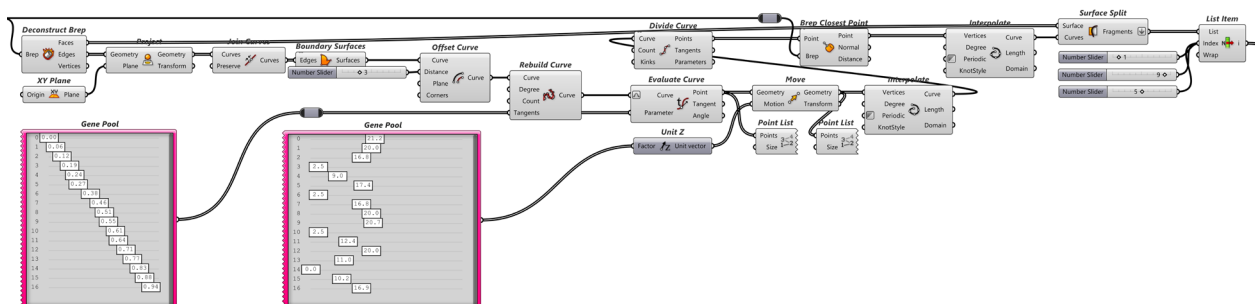


Figura 4.36: Algoritmo Envolvente.

Panelización

Objetivo: Modelar la panelización de la envolvente.

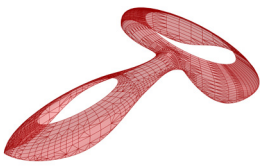


Figura 4.37: Mesh.

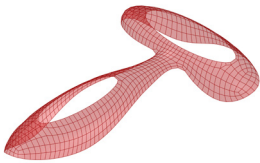


Figura 4.38: Quad ReMesh.

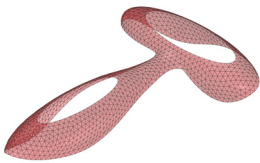


Figura 4.40: Panelización tirangular.

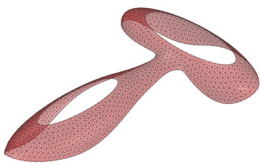


Figura 4.41: Panelización variante.

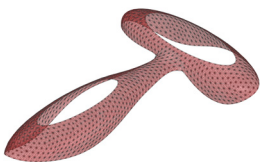


Figura 4.42: Panelización variante.



Figura 4.43: Panelización hexagonal.



Figura 4.44: Panelización variante.

A partir de la envolvente, se procede a realizar una panelización utilizando geometrías basadas en mallas (*Mesh*). En primer lugar, la malla se reconstruye y regulariza empleando el nodo **Quad Remesh** para garantizar una distribución uniforme. Posteriormente, se aplica el nodo **Diagonalize** para generar una panelización diagonal, representativa del diseño original. Además, se han explorado otras opciones de panelización, utilizando el nodo **TriRemesh**, con el fin de evaluar la eficiencia del modelo en la fusión de superficies. Estas pruebas incluyen panelizaciones de tipo triangular, hexagonal y combinaciones entre ellas.

Proceso:

1. Panelización original

La malla se reconstruye con **Quad Remesh** para regularizarla. Luego, se aplica el nodo **Diagonalize**, que genera una panelización diagonal alineada con el diseño original del Yas Hotel.

2. Panelizaciones de prueba:

Se utiliza el nodo **TriRemesh** para experimentar con diferentes configuraciones de panelización, incluyendo patrones triangulares, hexagonales y sus combinaciones. Esto permite explorar nuevas posibilidades y evaluar la adaptabilidad de las geometrías en procesos de fusión de superficies.

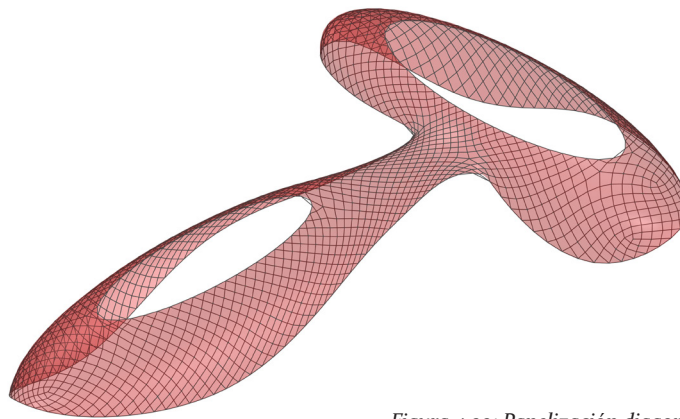


Figura 4.39: Panelización diagonal.

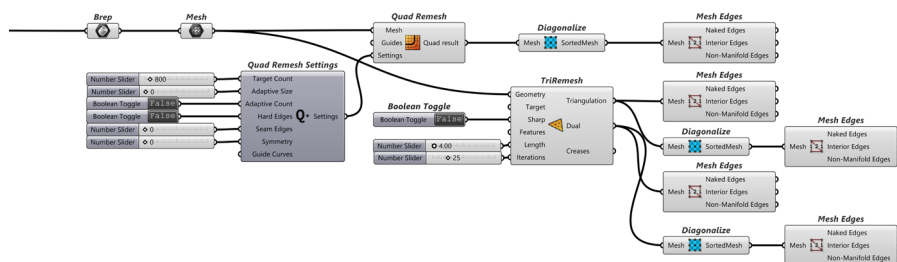


Figura 4.45: Algoritmo Envolvente.

Resultado: Se obtiene una panelización original en formato diagonal, junto con diversas configuraciones alternativas de panelización, que demuestran la versatilidad del modelo y su capacidad para adaptarse a distintas soluciones geométricas.

En conclusión, el caso de estudio del YAS Hotel ha validado la eficacia del nodo Blending desarrollado, que ha sido fundamental para resolver el desafío de fusionar superficies de manera fluida y funcional. Además, el proceso completo de modelización, fusión y panelización destaca el potencial de las herramientas paramétricas para abordar proyectos arquitectónicos complejos, ofreciendo flexibilidad, precisión y la posibilidad de explorar nuevas configuraciones geométricas. Este enfoque no solo ha permitido recrear el diseño del YAS Hotel, sino también proponer alternativas innovadoras que enriquecen el campo del diseño arquitectónico.

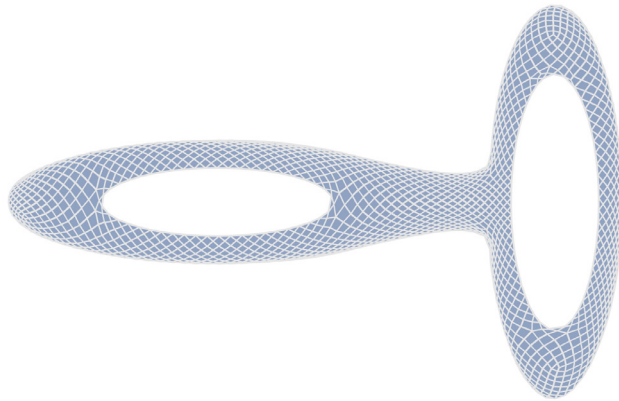


Figura 4.35: Planta.



Figura 4.35: Alzado.

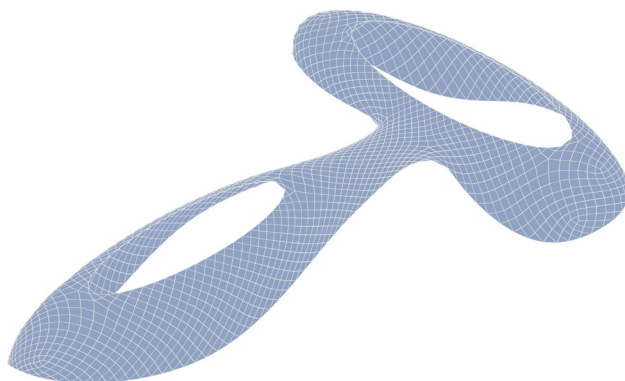


Figura 4.35: Visualización.

Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha abordado el estudio y desarrollo de herramientas de CAD aplicadas a la arquitectura, centrándose en la fusión de superficies como elemento clave para la generación de geometrías complejas. Este enfoque ha permitido no solo analizar las capacidades actuales de programas como Rhinoceros 8 y Grasshopper, sino también proponer soluciones que amplían sus funcionalidades, contribuyendo al avance del diseño paramétrico y la modelización arquitectónica.

El TFG ha cumplido con los objetivos planteados inicialmente, los cuales incluían: explorar las posibilidades de las herramientas de CAGD para la fusión de superficies, analizar casos de estudio relevantes y desarrollar soluciones propias para superar las limitaciones detectadas. Entre las principales aportaciones, destaca el desarrollo del nodo *Blending* en Grasshopper, una herramienta innovadora que responde a las carencias identificadas en las opciones nativas y complementarias del programa.

El nodo *Blending* se diseñó con el objetivo de permitir la creación de una superficie de transición entre dos superficies separadas, incorporando funcionalidades avanzadas como la posibilidad de posicionar una curva intermedia y modificar las curvas base que determinan la fusión. Este enfoque amplía significativamente las capacidades de Grasshopper, integrando la parametrización característica del programa con opciones más personalizables, similares a las que ofrece Rhinoceros 8. Como resultado, el nodo no solo mejora la precisión y la calidad del diseño, sino que también facilita una mayor adaptabilidad a las necesidades específicas de cada proyecto.

Los casos de estudio analizados en el TFG, tanto el Galaxy SOHO de Zaha Hadid Architects como The YAS Hotel de Asymptote Architecture, han demostrado la relevancia de las herramientas de CAD en el diseño arquitectónico contemporáneo. Estos proyectos se caracterizan por su uso innovador de geometrías complejas y superficies continuas, aspectos que requieren un manejo avanzado de herramientas digitales.

En el caso del Galaxy SOHO, se ha destacado el uso de Grasshopper para la modelización y fusión de cubiertas. Este proyecto ha servido para ilustrar cómo las herramientas paramétricas permiten optimizar procesos de diseño, garantizando tanto la coherencia geométrica como la eficiencia en la construcción. Asimismo, el desarrollo del nodo *Blending* ha demostrado ser particularmente útil para abordar los desafíos relacionados con la tran-

sición entre superficies curvadas, ofreciendo soluciones más precisas y personalizables que las herramientas nativas de Grasshopper.

Por su parte, el análisis de The YAS Hotel ha puesto de manifiesto la importancia de las superficies fusionadas en la creación de envolventes arquitectónicas fluidas y dinámicas. Este caso de estudio ha permitido evaluar cómo las herramientas desarrolladas en el TFG pueden integrarse en proyectos reales, aportando valor tanto en la fase de diseño como en la de implementación.

A pesar de los avances logrados, el desarrollo del TFG también ha revelado ciertas limitaciones. En primer lugar, las herramientas nativas de Grasshopper presentan restricciones significativas en lo que respecta a la fusión de superficies, lo que hizo necesario recurrir a complementos adicionales como *Flexibility*. Sin embargo, estas soluciones complementarias también presentan carencias en términos de configurabilidad y precisión, lo que motivó al desarrollo del nodo *Blending*.

En conclusión, este TFG ha demostrado la importancia de las herramientas de CAD en la arquitectura contemporánea, así como la necesidad de seguir innovando para superar las limitaciones actuales. El desarrollo del nodo *Blending* representa un paso significativo hacia la creación de herramientas más avanzadas y personalizables que respondan a las demandas de diseño más exigentes. Los resultados obtenidos en este proyecto no solo aportan valor a nivel técnico, sino que también destacan el papel fundamental de la investigación y el desarrollo en el avance del diseño arquitectónico. A medida que la tecnología continúa evolucionando, es esencial seguir explorando nuevas posibilidades y desafiando los límites de lo que se puede lograr con herramientas digitales en el ámbito de la arquitectura.

Líneas futuras de trabajo

De cara a futuras líneas de trabajo, se identifican varias oportunidades para continuar ampliando el impacto del trabajo desarrollado en este TFG y explorar nuevas direcciones de investigación y aplicación.

En primer lugar, se plantea la publicación de la modelización de los edificios analizados, como el Galaxy SOHO y The YAS Hotel, en una revista especializada en diseño paramétrico o modelización arquitectónica. La descripción detallada del proceso, incluyendo el uso de Grasshopper y el nodo *Blending*, podría resultar de gran interés para la comunidad académica y profesional, ya que ofrece una metodología replicable y herramientas específicas que pueden ser aplicadas en otros proyectos de arquitectura contemporánea. Este tipo de publicación no solo contribuiría a difundir los resultados del TFG, sino también a posicionar las aportaciones realizadas como un referente en el campo del diseño asistido por ordenador.

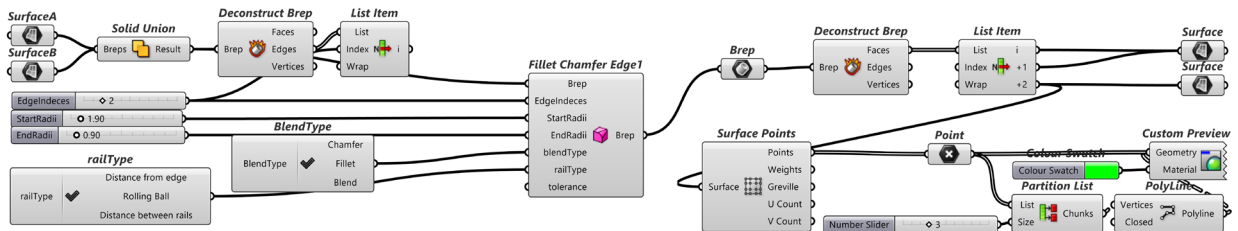
Por otro lado, una línea de acción muy prometedora consiste en compartir el nodo *Blending* desarrollado en foros de programación y plataformas de código abierto. Esta iniciativa permitiría que otros diseñadores, arquitectos e ingenieros accedan a esta herramienta, fomentando su uso y estimulando la retroalimentación por parte de la comunidad. Al liberar el nodo, se podría generar un espacio de colaboración donde otros usuarios propongan mejoras, nuevas funcionalidades o incluso adaptaciones del nodo a diferentes contextos de diseño. Esto contribuiría al enriquecimiento de la herramienta y podría abrir nuevas posibilidades de aplicación que no se exploraron durante el desarrollo del TFG.

Además, el nodo *Blending* ofrece un gran potencial para la creación de variantes o diseños propios. Una línea de trabajo futura podría centrarse en utilizar esta herramienta para explorar nuevos lenguajes arquitectónicos y soluciones formales innovadoras. Durante el desarrollo del TFG, no fue posible dedicar tiempo suficiente a experimentar con el nodo en este sentido, ya que el enfoque estuvo principalmente orientado a su creación y validación. Sin embargo, este potencial experimental abre un camino muy interesante para proyectos futuros, en los que se podría investigar cómo la parametrización y la personalización que ofrece el nodo pueden dar lugar a diseños únicos y altamente adaptados a las necesidades específicas de diferentes contextos arquitectónicos.

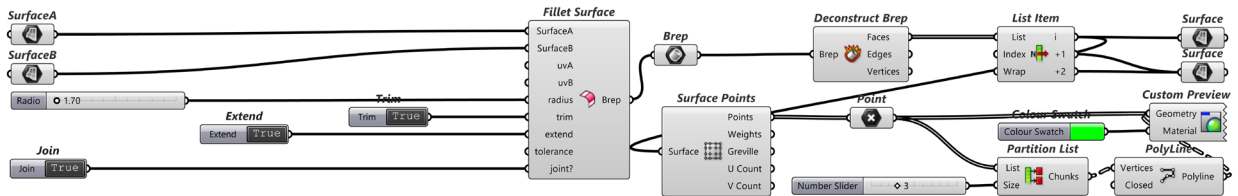
En conjunto, estas líneas de trabajo no solo permitirán extender y consolidar las contribuciones realizadas en este TFG, sino que también impulsarán el avance del diseño arquitectónico y la exploración de nuevas posibilidades dentro del diseño asistido por ordenador. La publicación de los resultados, el intercambio abierto de herramientas y la experimentación creativa representan pilares fundamentales para garantizar un impacto duradero y significativo en este campo.

Anexo: Algoritmos Gashopper

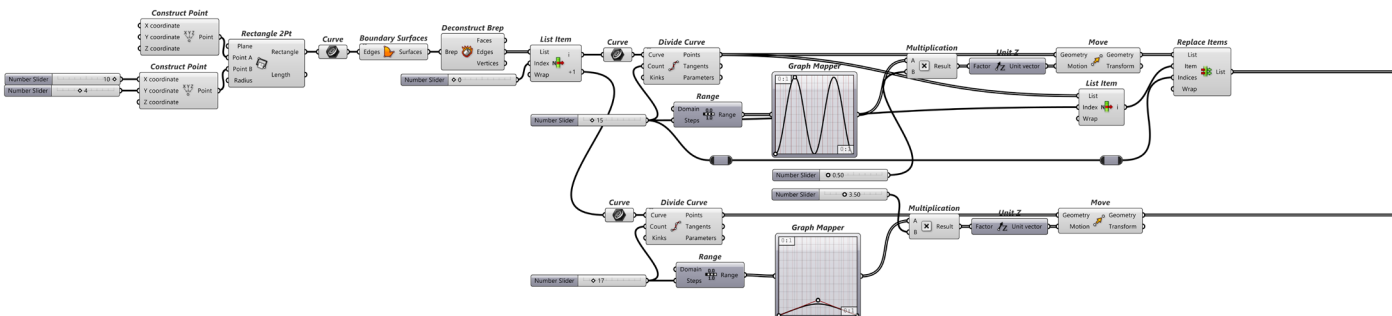
Algoritmo Fillet Chamfer Edge 1.



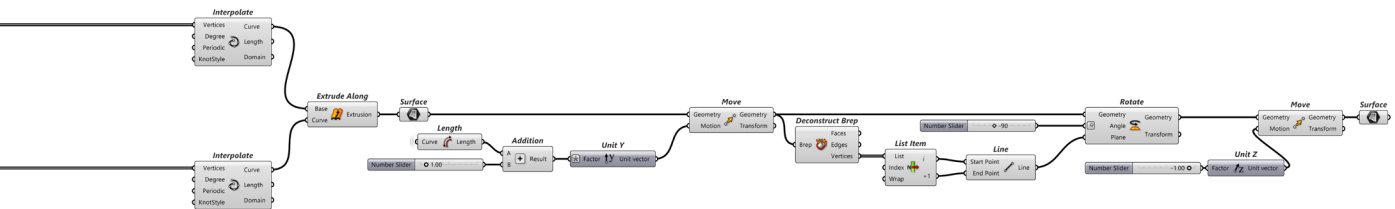
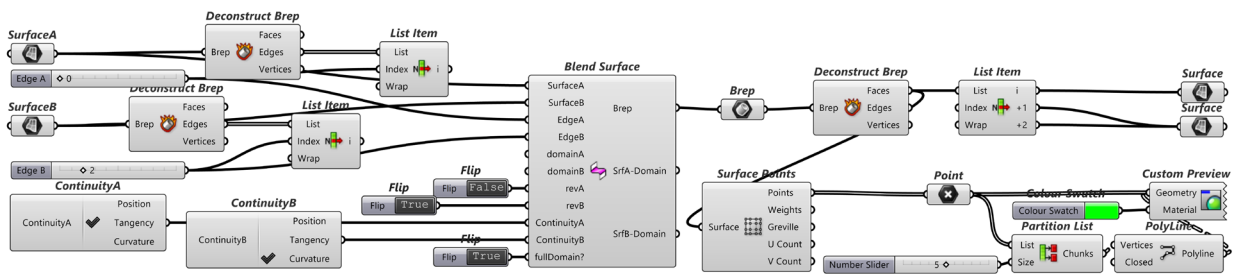
Algoritmo Fillet Surface.



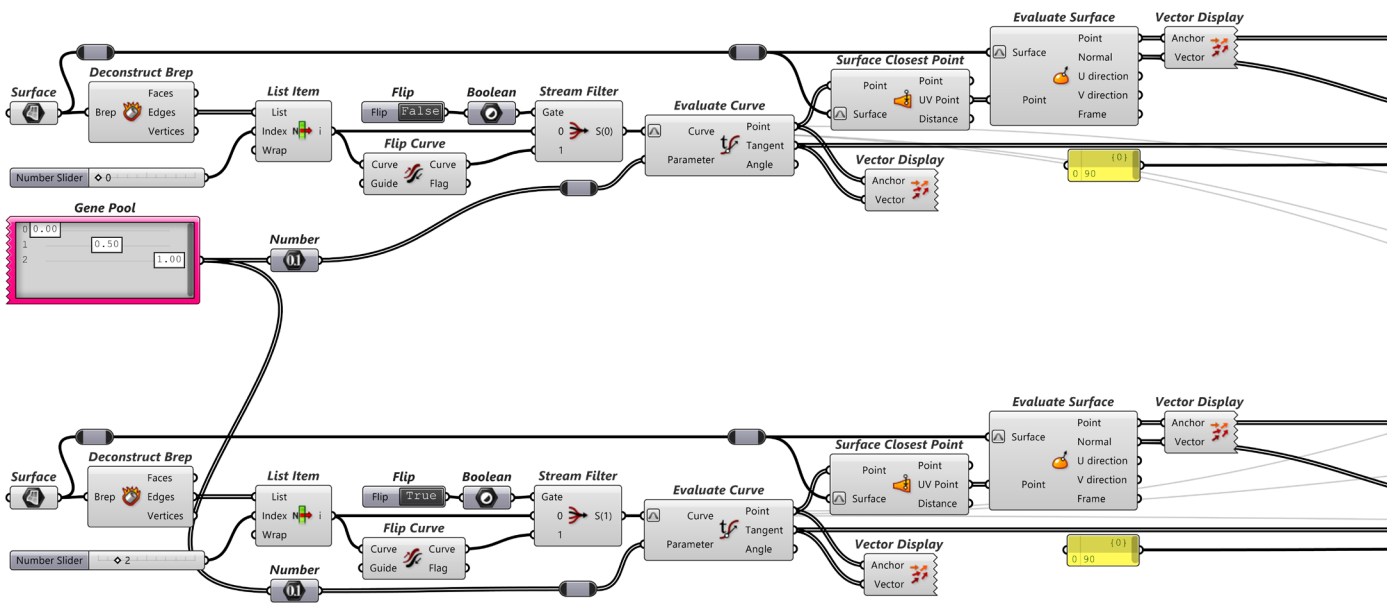
Algoritmo creación de superficies NURBS.



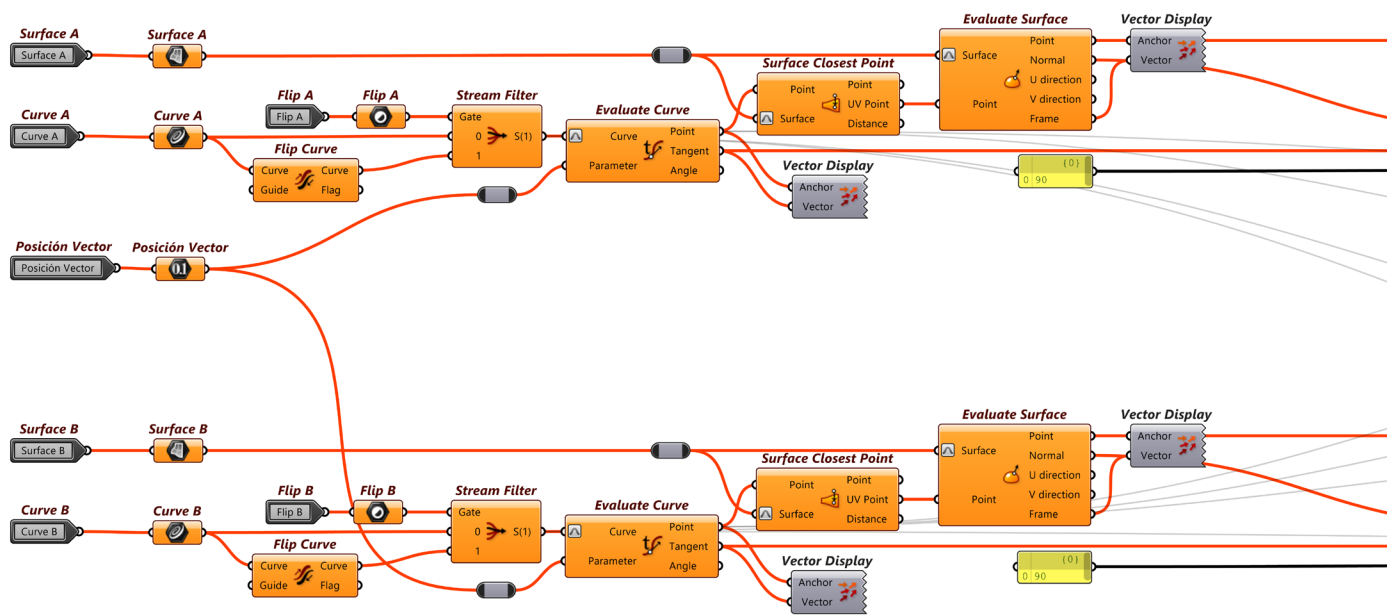
Algoritmo Blend Surface.

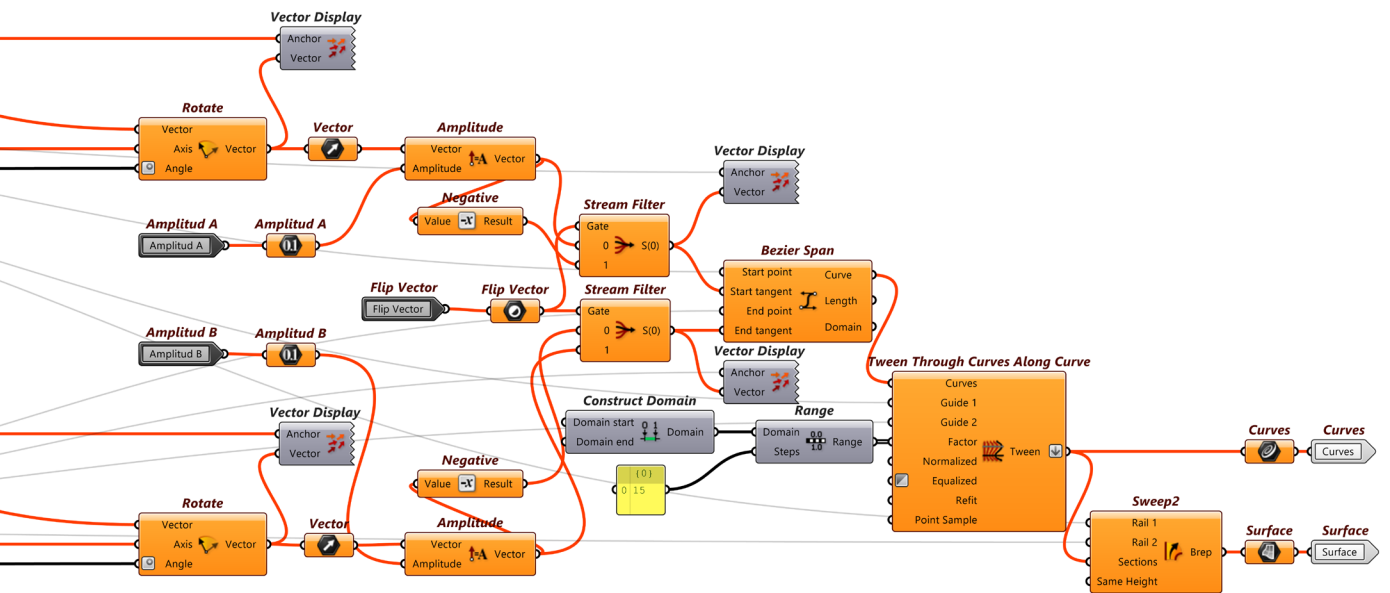
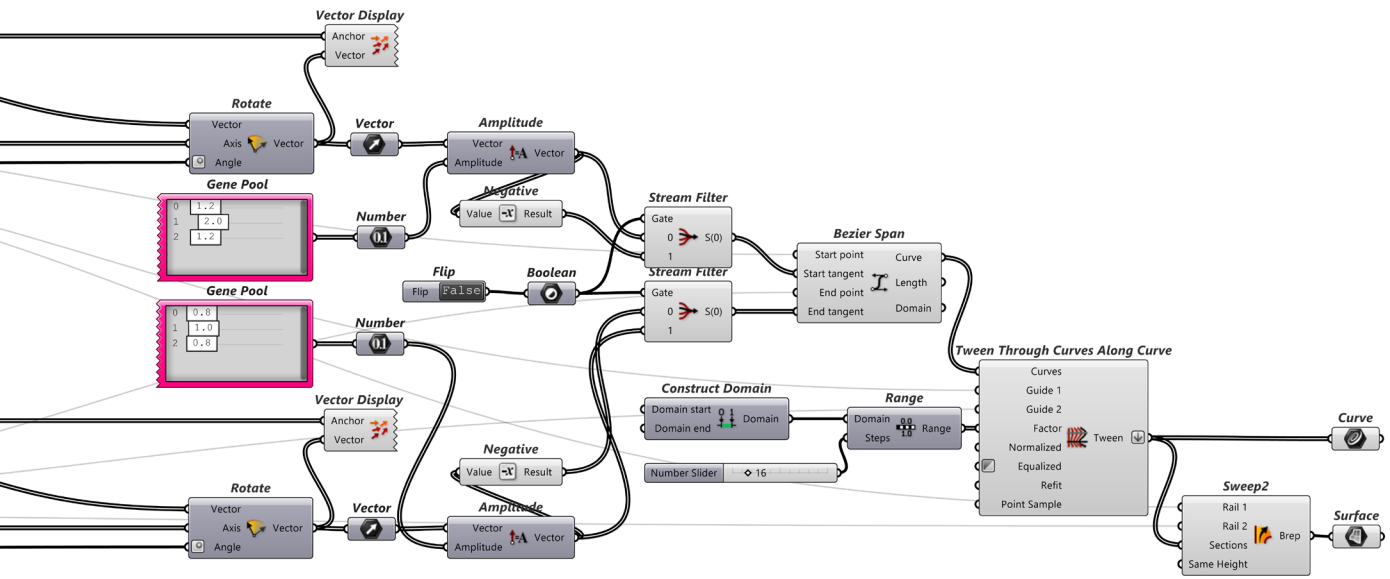


Algoritmo Blending.

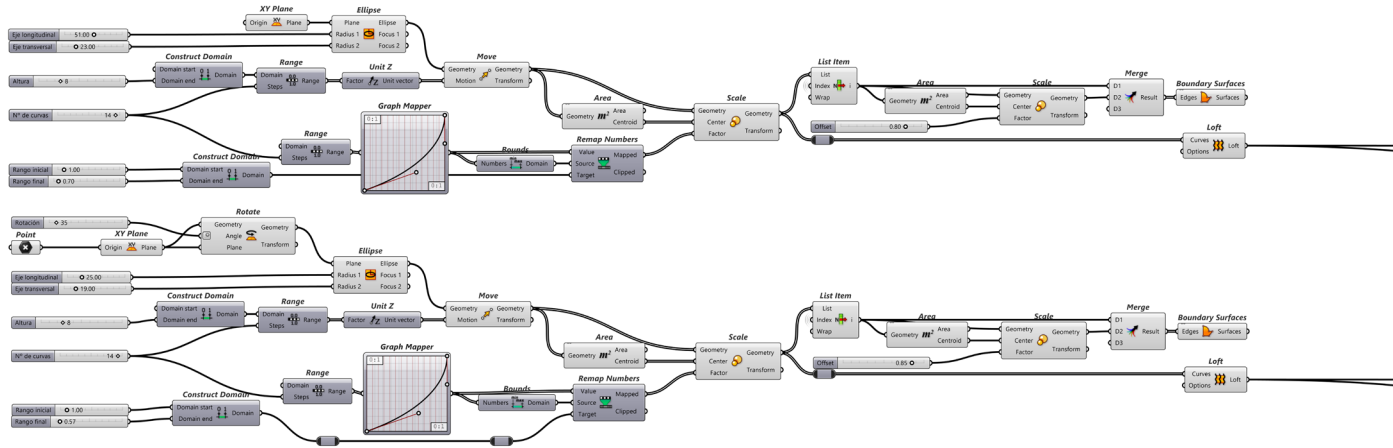


Algoritmo cluster Blending.

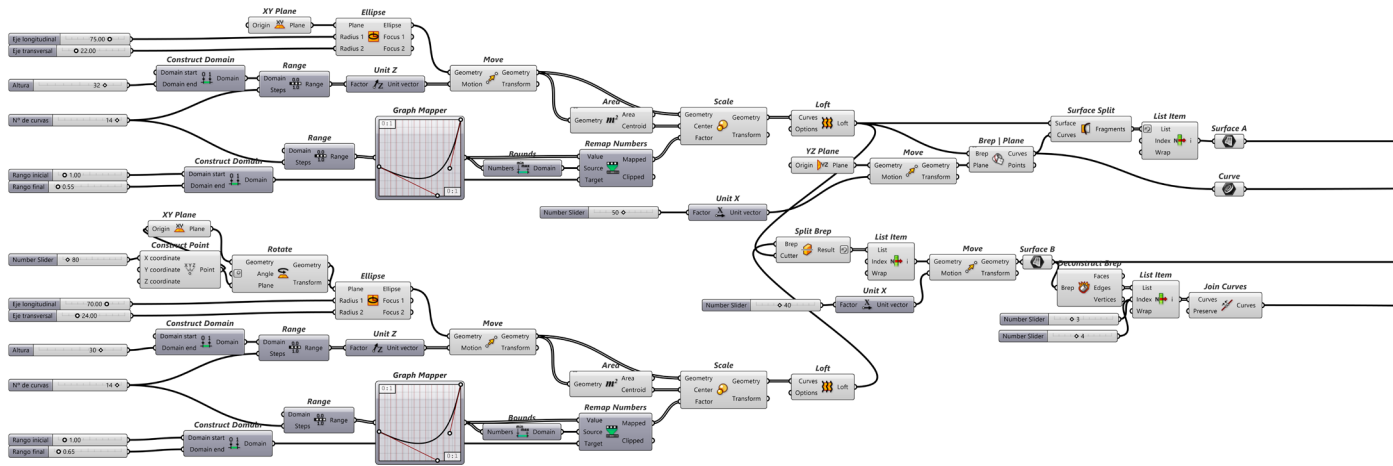




Algoritmo Galaxy SOHO, Zaha Hadid.



Algoritmo The YAS Hotel, Aymptote Architecture.



Fuentes

Bibliografía y recursos digitales

- [1] H. Pottmann, A. Asperl, M. Hofer, A. Kilian, D. Bentley, E. Kasiz-Hitz, y E. Reimer, *Architectural Geometry*. 1st ed. Bentley Systems, Exton, PA, 2007. [En línea]. Disponible en: www.bentley.com/books
- [2] A. H. Majeed, H. Al-Alwan, y N. Oukaili, «Free-form geometries in contemporary architecture – dimensional rules of Folded, Blob and Formlessness architecture», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1058, n.º 1, p. 012043, feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1058/1/012043.
- [3] “About Zaha | ZHF - Zaha Hadid Foundation”. Accedido: 2 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zhfoundation.com/about-zaha-hadid/>
- [4] J. Wallner y H. Pottmann, “Geometric Computing for Freeform Architecture”, *J. Math. Ind.*, vol. 1, n.º 1, pp. 1-19, 2011, doi: 10.1186/2190-5983-1-4.
- [5] A. Barreiro Barba, “Panelización de superficies de forma libre en arquitectura: de la idea a su construcción”, Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
- [6] “Historia del CAD: de la mesa de dibujo a la revolución digital”. Accedido: 3 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/3d-cad/historia-del-cad/>
- [7] “Rhino - Rhinoceros 3D”. Accedido: 3 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rhino3d.com/es/>
- [8] “Grasshopper - Algorithmic Modeling for Rhino”. Accedido: 3 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.grasshopper3d.com/>
- [9] “Flexibility | Food4Rhino”. Accedido: 3 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.food4rhino.com/en/app/flexibility>
- [10] S. L. Rueda, *Formas Libres II: Superficies NURBS*, Cuaderno 456.02, Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [11] S. L. Rueda, *Formas Libres I: Curvas NURBS*, Cuaderno 456.01, Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [12] “Galaxy SOHO – Zaha Hadid Architects”. Accedido: 7 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/galaxy-soho/>
- [13] “Galaxy Soho / Zaha Hadid Architects | ArchDaily”. Accedido: 7 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.archdaily.com/287571/galaxy-soho-zaha-hadid-architects?ad_source=search&ad_medium=projects_tab
- [14] “Yas Marina and Hotel”. Accedido: 7 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://asymptote.net/yas_marina_and_hotel
- [15] “The Yas Hotel / Asymptote Architecture | ArchDaily”. Accedido: 7 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.archdaily.com/43336/the-yas-hotel-asymptote?ad_source=search&ad_medium=projects_tab

Procedencia de las ilustraciones

Capítulo 1

Portada: The YAS Hotel, Asymptote Architecture

<https://www.re-thinkingthefuture.com/wp-content/uploads/2024/10/A13307-The-Yas-Viceroy-Hotel-Iconic-Design-and-Engineering-Image-5-1024x682.jpg.webp>

Figura 1.1: Modelo físico, Antoni Gaudí.

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fa/Maqueta_funicular.jpg/675px-Maqueta_funicular.jpg

Figura 1.2 Basílica de la Sagrada Familia, Antoni Gaudí.

<https://www.mayerlingbisbeurquinaona.com/sagrada-familia/>

Figura 1.3 Casa Milà, Antoni Gaudí.

<https://images.adsttc.com/media/images/517e/a80b/b3fc/4boc/e700/000a/slide-show/antoni-gaudi-spain-barcelona-casa-mila-01-samuel-ludwig.jpg?1367255048>

Figura 1.4 Notre Dame du Haut, Le Corbusier.

<https://lecorbusier-worldheritage.org/wp-content/webpc-passthru.php?src=https://lecorbusier-worldheritage.org/wp-content/uploads/2019/07/chapelle-notre-dame-du-haut.jpg&nocache=1>

Figura 1.5 Terminal TWA, Eero Saarinen.

https://es.wikiarquitectura.com/wp-content/uploads/2017/01/JFK_T5_18.jpg

Figura 1.6: Ópera de Sídney, Jørn Utzon.

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/98/SydneyOperaHouse.jpg/1200px-SydneyOperaHouse.jpg>

Figura 1.7 Museo Guggenheim de Bilbao, Frank Gehry.

<https://cms.guggenheim-bilbao.eus/uploads/2021/03/2-1.jpg>

Figura 1.8: Heydar Aliyev Centre, Zaha Hadid.

https://www.zaha-hadid.com/wp-content/uploads/2019/12/hac_photobyiwambaan4copy-1621x1080.jpg

Figura 1.9: Galaxy Soho, Zaha Hadid.

<https://preview.redd.it/v6ipcadturq81.jpg?auto=webp&s=d630b26921a076cb68d8c84c9655c1b710a52eb8>

Figura 1.10: National Holding Headquarters, Zaha Hadid

https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1186%2F2190-5983-1-4/MediaObjects/13362_2010_Article_3_Fig14_HTML.jpg?as=webp

Figura 1.11: Optimización de la panelización.

https://media.springernature.com/full/springer-static/image/art%3A10.1186%2F2190-5983-1-4/MediaObjects/13362_2010_Article_3_Fig15_HTML.jpg?as=webp

Figura 1.12: Operación chamfer. Elaboración autor.

Figura 1.13: Operación fillet. Elaboración autor.

Figura 1.14: Operación blend. Elaboración autor.

Figura 1.15: Representación blending radio constante. Fuente: [2]

Figura 1.16: Representación blending radio variable. Fuente: [2]

Capítulo 2

Figura 2.1: Icono Rhinoceros.

<https://global.discourse-cdn.com/mcneel/uploads/default/original/4X/4/d/e/4de5b69df3e8caf9e91b19bcddc29cboa533812a.jpeg>

Figura 2.2: Área de trabajo, Rhinoceros. Elaboración autor.

Figura 2.3: Icono Grasshopper.

https://miro.medium.com/v2/resize:fit:1400/1*zsnNLbMi5lnSfmvV5Pd19A.jpeg

Figura 2.4: Área de trabajo, Grasshopper. Elaboración autor.

Figura 2.5: Superficie de Bézier.

<https://dcain.etsin.upm.es/~leonardo/ejemplos5/figs/fig528.gif>

Figura 2.6: Posición (Go).

https://docs.mcneel.com/rhino/8/help/es-es/image/topic_illustrations/blendcrv-009.png

Figura 2.7: Tangencia (G1).

https://docs.mcneel.com/rhino/8/help/es-es/image/topic_illustrations/blendcrv-010.png

Figura 2.8: Curvatura (G2).

https://docs.mcneel.com/rhino/8/help/es-es/image/topic_illustrations/blendcrv-011.png

Figura 2.9: G3.

https://docs.mcneel.com/rhino/8/help/es-es/image/topic_illustrations/blendcrv-012.png

Figura 2.10: G4.

https://docs.mcneel.com/rhino/8/help/es-es/image/topic_illustrations/blendcrv-013.png

Figura 2.11: Panel de búsqueda. Elaboración autor.

Figura 2.12: Superficie base 1. Elaboración autor.

Figura 2.13: Algoritmo creación superficie base 1. Elaboración autor.

Figura 2.14: Curvas modificadas. Elaboración autor.

Figura 2.15: Superficie base 2. Elaboración autor.

Figura 2.16: Algoritmo creación superficies NURBS. Elaboración autor.

Figura 2.17: Preparación del modelo. Elaboración autor.

Figura 2.18: Icono Fillet Edge.

https://docs.mcneel.com/rhino/mac/help/en-us/image/command_icons/filletedge.png

Figura 2.19: Superficies base. Elaboración autor.

Figura 2.20: Selección borde. Elaboración autor.

Figura 2.21: Previsualización. Elaboración autor.

Figura 2.22: Malla de control de la superficie. Elaboración autor.

Figura 2.23: Resultado Fillet Edge. Elaboración autor.

Figura 2.24: Icono Blend Edge.

https://docs.mcneel.com/rhino/mac/help/en-us/image/command_icons/blendedge_filletedge_rt.png

Figura 2.25: Superficies base. Elaboración autor.

Figura 2.26: Selección borde. Elaboración autor.

Figura 2.27: Previsualización. Elaboración autor.

Figura 2.28: Malla de control de la superficie. Elaboración autor.

Figura 2.29: Resultado Blend Edge. Elaboración autor.

Figura 2.30: Icono Fillet Surface.

https://docs.mcneel.com/rhino/mac/help/en-us/image/command_icons/filletsrf.png

Figura 2.31: Superficies base. Elaboración autor.

Figura 2.32: Superficies base. Elaboración autor.

Figura 2.33: Selección superficies. Elaboración autor.

Figura 2.34: Panel control. Elaboración autor.

Figura 2.35: Previsualización. Elaboración autor.

Figura 2.36: Malla de control de la superficie. Elaboración autor.

Figura 2.37: Resultado Fillet Surface. Elaboración autor.

Figura 2.38: Icono Blend Surface

https://docs.mcneel.com/rhino/mac/help/en-us/image/command_icons/blendsrf.png

Figura 2.39: Superficies base. Elaboración autor.

Figura 2.40: Selección borde. Elaboración autor.

Figura 2.41: Panel control. Elaboración autor.

Figura 2.42: Previsualización. Elaboración autor.

Figura 2.43: Malla de control de la superficie. Elaboración autor.

Figura 2.44: Resultado Blend Surface. Elaboración autor.

Figura 2.45: Icono Fillet Edge. Elaboración autor.

Figura 2.46: Icono Fillet Chamfer Edge1. Elaboración autor.

Figura 2.47: Superficies base. Elaboración autor.

Figura 2.48: Selección borde. Elaboración autor.

Figura 2.49: Previsualización. Elaboración autor.

Figura 2.50: Malla de control de la superficie. Elaboración autor.

Figura 2.51: Resultado Fillet Chamfer Edge1. Elaboración autor.

Figura 2.52: Algoritmo Fillet Chamfer Edge 1. Elaboración autor.

Figura 2.53: Icono Fillet Surface. Elaboración autor.

Figura 2.54: Superficies base. Elaboración autor.

Figura 2.55: Superficies base. Elaboración autor.

Figura 2.56: Selección borde. Elaboración autor.

Figura 2.57: Previsualización. Elaboración autor.

Figura 2.58: Malla de control de la superficie. Elaboración autor.

Figura 2.59: Resultado Fillet Surface. Elaboración autor.

Figura 2.60: Algoritmo Fillet Surface. Elaboración autor.

Figura 2.61: Icono Blend Surface. Elaboración autor.

Figura 2.62: Superficies base. Elaboración autor.

Figura 2.63: Selección borde. Elaboración autor.

Figura 2.64: Previsualización. Elaboración autor.

Figura 2.65: Malla de control de la superficie. Elaboración autor.

Figura 2.66: Resultado Blend Surface. Elaboración autor.

Figura 2.67: Algoritmo Blend Surface. Elaboración autor.

Capítulo 3

Figura 3.1: Selección de bordes. Elaboración autor.

Figura 3.2: Vectores normales. Elaboración autor.

Figura 3.3: Rotación vectores normales. Elaboración autor.

Figura 3.4: Algoritmo Blending. Elaboración autor.

Figura 3.5: Amplitud y dirección vectores. Elaboración autor.

Figura 3.6: Curvas de Bézier. Elaboración autor.

Figura 3.7: Curvas intermedias adicionales. Elaboración autor.

Figura 3.8: Resultado Blending. Elaboración autor.

Figura 3.9: Algoritmo cluster Blending. Elaboración autor.

Figura 3.10: Panel de búsqueda. Elaboración autor.

Figura 3.11: Descripción nodo. Elaboración autor.

Figura 3.12: Nodo Blending. Elaboración autor.

Capítulo 4

Figura 4.1: BMW Bubble, Alemania.

https://franken-group.com/media/pages/home/c21fc95771-1673601647/bubble_friedrich-busam.jpg

Figura 4.2: Golden Sands Lake Grand Theater, China.

<https://parametric-architecture.com/wp-content/uploads/2024/01/Golden-Sands-Lake-Grand-Theater-21.jpg>

Figura 4.3: Planta Galaxy SOHO, Zaha Hadid.

<https://www.zaha-hadid.com/wp-content/uploads/2019/12/f17topview.png>

Figura 4.4: Pario interior Galaxy SOHO, Zaha Hadid.

https://images.adsttc.com/media/images/50a6/42f8/b3fc/4b46/eboo/0066/slideshow/ZH_Galaxy_Soho_014.jpg?1375809655

Figura 4.5: Cubierta Galaxy SOHO, Zaha Hadid.

<https://okdiario.com/coolthelifestyle/img/2023/04/17/v6ipcadturq81-1.jpg>

Figura 4.6: Creación de la elipse base. Elaboración autor.

Figura 4.7: Repetición curva en eje Z. Elaboración autor.

Figura 4.8: Curvas escaladas y superficie. Elaboración autor.

Figura 4.9: Resultado cubiertas. Elaboración autor.

Figura 4.10: Algoritmo modelización cubiertas Elaboración autor.

Figura 4.11: Obtención de bordes. Elaboración autor.

Figura 4.12: Blending. Elaboración autor.

Figura 4.13: Tapa plana. Elaboración autor.

Figura 4.14: Modelización Galaxy SOHO. Elaboración autor.

Figura 4.15: Algoritmo modelización cubiertas Elaboración autor.

Figura 4.16: Visualización. Elaboración autor.

Figura 4.17: Visualización. Elaboración autor.

Figura 4.18: The YAS Hotel, Asymptote Architecture.

<https://images.adsttc.com/media/images/5012/073c/28ba/od55/8100/027f/slideshow/stringio.jpg?1361409426>

Figura 4.19: The YAS Hotel, Asymptote Architecture.

<https://images.adsttc.com/media/images/5012/0734/28ba/od55/8100/027d/slideshow/stringio.jpg?1360898196>

Figura 4.20: Planta, The YAS Hotel, Asymptote Architecture.

<https://i.pinimg.com/1200x/83/21/67/832167f6c1cfa4d3f6474a67e4bf2466.jpg>

Figura 4.21: Creación de la elipse base. Elaboración autor.

Figura 4.22: Repetición curva en eje Z. Elaboración autor.

Figura 4.23: Curvas escaladas. Elaboración autor.

Figura 4.24: Creación de superficies. Elaboración autor.

Figura 4.25: Corte superficies. Elaboración autor.

Figura 4.26: Obtención de bordes. Elaboración autor.

Figura 4.27: Algoritmo modelización cubiertas. Elaboración autor.

Figura 4.28: Selección bordes. Elaboración autor.

Figura 4.29: Blending. Elaboración autor.

Figura 4.30: Algoritmo Blending. Elaboración autor.

Figura 4.31: Resultado Blending. Elaboración autor.

Figura 4.32: Posicionamiento de puntos. Elaboración autor.

Figura 4.33: Creación de la curva. Elaboración autor.

Figura 4.34: Superficie cortada. Elaboración autor.

Figura 4.35: Envolvente. Elaboración autor.

Figura 4.36: Algoritmo Envolvente. Elaboración autor.

Figura 4.37: Mesh. Elaboración autor.

Figura 4.38: Quad ReMesh. Elaboración autor.

Figura 4.39: Panelización diagonal. Elaboración autor.

Figura 4.40: Panelización tirangular. Elaboración autor.

Figura 4.41: Panelización variante. Elaboración autor.

Figura 4.42: Panelización variante. Elaboración autor.

Figura 4.43: Panelización hexagonal. Elaboración autor.

Figura 4.44: Panelización variante. Elaboración autor.

Figura 4.45: Algoritmo Envolvente. Elaboración autor.

Figura 4.46: Planta. Elaboración autor.

Figura 4.47: Alzado. Elaboración autor.

Figura 4.48: Visualización. Elaboración autor.

