



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

ARQUITECTURA PARAMÉTRICA Y DISEÑO  
PARAMÉTRICO: APLICACIÓN AL DISEÑO DE  
MOBILIARIO URBANO

PARAMETRIC ARCHITECTURE AND PARAMETRIC  
DESIGN: APPLICATION TO THE DESIGN OF URBAN  
FURNITURE

Autor/es

Jorge Ruberte Bailo

Director/es

Manuel González Bedia  
Francisco José Serón Arbeloa

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
2016



DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Jorge Ruberte Bailo

con nº de DNI 25167650 S en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado

ARQUITECTURA PARAMÉTRICA Y DISEÑO PARAMÉTRICO: APLICACIÓN AL DISEÑO DE MOBILIARIO URBANO / PARAMETRIC ARCHITECTURE AND PARAMETRIC DESIGN: APPLICATION TO THE DESIGN OF URBAN FURNITURE.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 24 de Noviembre de 2016

Fdo: Jorge Ruberte Bailo



## RESUMEN

A lo largo de la presente memoria de Trabajo fin de grado se profundiza en diferentes técnicas digitales existentes en el campo del diseño arquitectónico así como su aplicación.

En primer lugar se hace un breve recorrido por cinco ejemplos paradigmáticos del uso de técnicas digitales que permiten tanto al autor como al lector aproximarse a las diferentes posibilidades que existen. Posteriormente se elige el caso concreto del edificio Water Cube de Pekín y se estudia el modo en que fue diseñada su fachada y por último se realiza un caso de aplicación de los conceptos aprendidos al diseño de una pieza de arte urbano a colocar en un espacio público urbano.

Finalmente se dan unas indicaciones para que una persona parta en el futuro del trabajo realizado y continúe con la investigación.



## GLOSARIO DE TÉRMINOS

### **Open Source (Código Abierto)**

El concepto open source tiene su origen en el mundo de la informática y más concretamente en el campo del desarrollo de software. Se dice que un software es de código abierto cuando el autor del mismo lo pone a disposición del público en general cediendo sus derechos para estudiarlo, modificarlo, o distribuirlo.

### **Código Fuente**

El código fuente de un programa informático es el conjunto de líneas de texto con los pasos que debe seguir la computadora para ejecutar dicho programa.

### **FAB LAB**

El nombre viene de la abreviación de las palabras inglesas Fabrication Laboratory y se trata de un espacio productivo a escala personal o local compuesto por máquinas fundamentalmente de fabricación digital. Su misión es la de favorecer la creatividad de los individuos proporcionándoles las herramientas de fabricación necesarias para que sean capaces de desarrollar sus proyectos de manera autónoma.

### **Polimérico**

Se llama de esta manera a los materiales compuestos a base de polímeros. El almidón, la celulosa, o la seda son polímeros naturales mientras que el nailon, el polietileno o la baquelita son polímeros sintéticos.

### **Cluster**

Según el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española es una palabra que no existe en el castellano, de ahí que se utiliza en el texto entre comillas. Se ha usado en la redacción del presente trabajo por estar contenida en la mayoría de documentación consultada durante la fase de investigación y hace referencia a un grupo de objetos similares posicionados de manera muy próxima entre sí.

### **Algoritmo**

En el campo de la computación un algoritmo es un conjunto de instrucciones ordenadas y finitas que posibilita la realización de una actividad. Partiendo de unas condiciones iniciales se ejecutan el conjunto de órdenes definidas en el algoritmo y se llega a un resultado final.

### **Grasshopper**

Software informático de programación visual. Se ejecuta sobre la plataforma Rhinoceros y permite definir un algoritmo de una manera sencilla. La estructura de los algoritmos realizados en él es de unos componentes que contienen los datos iniciales, otros que contienen las instrucciones a realizar, y por último otros que almacenan los resultados del algoritmo. Todos ellos conectados entre sí mediante cables de una manera lógica.

### **Componente de Grasshopper**

Cada una de las piezas que se utilizan para componer el algoritmo dentro de la plataforma Grasshopper. Los componentes pueden almacenar información o realizar determinadas instrucciones definidas en su código interno.

### **Input**

En el campo de la informática es el conjunto de datos introducido en un sistema informático.

### **Sistema kinésico**

El significado que se le atribuye en el presente trabajo fin de grado es el de un sistema que trata de simular el movimiento natural del cuerpo humano

### **Diseño paramétrico**

Proceso de diseño que se basa en un algoritmo al cual se le introducen una serie de parámetros iniciales y una serie de reglas que definen la relación entre los requisitos de diseño y el propio diseño resultante.

### **Plug-In**

En informática se trata de una aplicación que se relaciona con otra para agregarle nuevas funcionalidades.



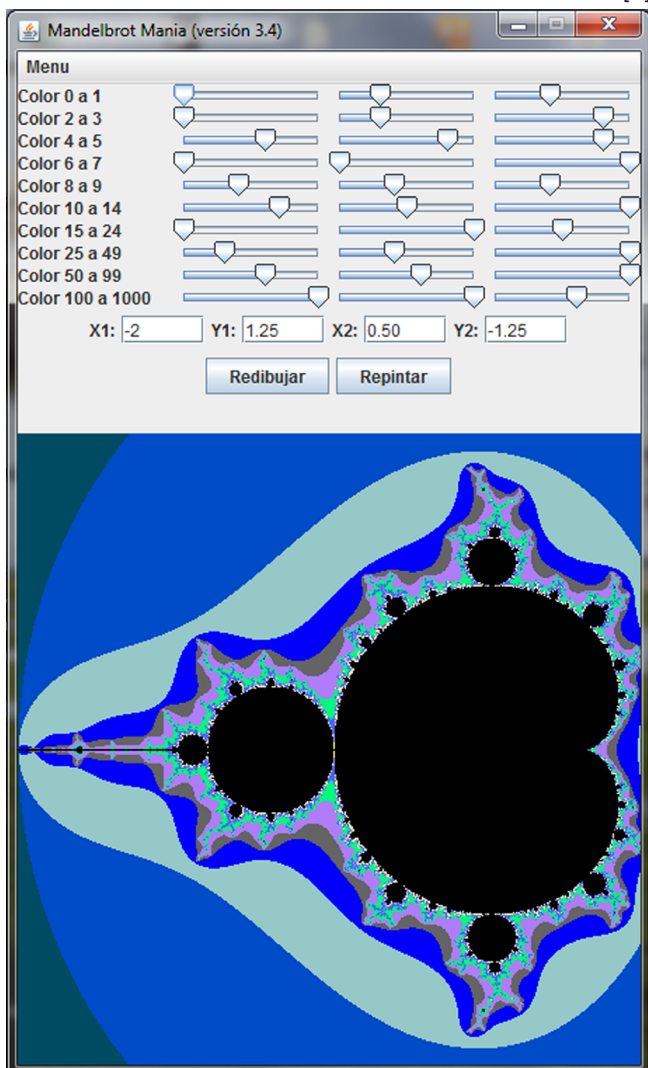
# ÍNDICE

	Página
<b>_RESUMEN</b>	
<b>_GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>	
<b>1_ PROLOGO</b>	<b>9</b>
<b>2_ OBJETIVOS DEL TRABAJO</b>	<b>11</b>
<b>3_ METODOLOGÍA DE TRABAJO</b>	<b>11</b>
<b>4_ ESTADO DEL ARTE</b>	<b>11</b>
<b>5_ CASO PRÁCTICO</b>	<b>12</b>
5.1_ WATER CUBE - National Acuatics Center	12
5.2_ Aproximación al problema	13
5.3_ Método de Voronoi	14
5.3.1_ Algoritmo en Grasshopper para método de Voronoi	15
5.4_ Método de Laplace-Plateau	15
5.4.1_ Pseudocódigo para método de Laplace-Plateau	16
5.4.2_ Algoritmo en grasshopper para Laplace-Plateau	16
5.4.3_ Trabajo futuro a partir del algoritmo realizado	16
5.5_ Ejemplo de aplicación real	17
<b>6_ CONCLUSIONES</b>	<b>18</b>
<b>7_ DIAGRAMA TEMPORAL</b>	<b>18</b>
<b>ANEXO I_ ESTADO DEL ARTE</b>	
<b>ANEXO II_ ALGORITMO EN GRASSHOPPER PARA MÉTODO DE VORONOI</b>	
<b>ANEXO III_ MÉTODO DE LAPLACE-PLATEAU</b>	
<b>ANEXO IV_ PSEUDOCÓDIGO PARA MÉTODO DE LAPLACE-PLATEAU</b>	
<b>ANEXO V_ ALGORITMO EN GRASSHOPPER PARA LAPLACE-PLATEAU</b>	
<b>ANEXO VI_ EJEMPLO DE APLICACIÓN REAL</b>	
<b>_ BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>_ FUENTES DIGITALES</b>	
<b>_ ÍNDICE DE IMÁGENES</b>	
<b>_ PROCEDENCIA DE IMÁGENES</b>	





[1]



## 1\_ PROLOGO

El trabajo fin de grado que se desarrolla en las siguientes paginas tiene su germen en el trabajo realizado por el autor del mismo como miembro de uno de los grupos de trabajo que se formaron para la evaluación de la asignatura de Informática correspondiente al primer curso del Grado de estudios en Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

El citado trabajo tenía como objetivo la implementación de un algoritmo informático para la representación en un interfaz gráfico del conocido en la disciplina matemática como el conjunto de Mandelbrot y cuyo resultado fue el que se muestra en la imagen [1].

Con esta experiencia informática vivida por el autor y ante la emergente situación que se presenta en el mundo de la arquitectura en la que cada día más se integra ese mundo de la programación y las tecnologías digitales para el desarrollo de proyectos, el autor se queda con la inquietud y decide explorar el mundo de posibilidades que nos puede brindar esta tecnología.





[2]

## 2\_OBJETIVOS

Se plantea como objetivo del presente trabajo final de grado el análisis por parte del autor del mundo del diseño paramétrico así como sus posibles aplicaciones a los proyectos urbanos y paisajísticos. Como segundo objetivo se plantea el conocimiento y profundización en las ideas básicas que subyacen del concepto “smart geometry” así como la aplicación de estas ideas al diseño de un elemento de mobiliario urbano.

## 3\_METODOLOGÍA

En primer lugar se realiza una búsqueda de diferentes casos de estudio en los cuales se puede observar cierta relación entre el diseño y el mundo digital ( ver anexo I) con la finalidad de proporcionar una visión global de las posibilidades que ofrece el mundo digital aplicado al diseño arquitectónico.

En segundo lugar se elige un edificio real conocido bajo el nombre Watercube de los arquitectos PTW Architects (ver imagen [2]) en el cuál se observa claramente la utilización de tecnologías digitales durante las fases de redacción del proyecto para su diseño. Posteriormente se estudia el procedimiento y las técnicas “no digitales” que se encuentran en la base del diseño propuesto para el edificio, para finalmente pasar a estudiar las técnicas digitales que permiten realizar dicho diseño de manera automática.

Por último y tras estudiar las técnicas tanto “no digitales” como digitales que permiten realizar el diseño seleccionado para su estudio, se realiza un ejemplo de aplicación a un posible proyecto real a desarrollar en el futuro. Para ello se trabaja con la aplicación informática conocida comercialmente bajo el nombre Rhinoceros 5.0 y un plug-in gratuito que funciona sobre Rhinoceros 5.0 y cuyo nombre es Grasshopper. La combinación de ambas herramientas permite a una persona no experta en programación la realización de una aplicación informática que realice de forma automática tareas determinadas.

## 4\_ESTADO DEL ARTE

Con el objetivo de realizar un acercamiento a las diferentes técnicas digitales que se están aplicando actualmente al diseño de edificios, así como el conocimiento de las mismas. Se ha realizado un breve catalogo de casos de aplicación de tecnologías digitales en el mundo del diseño, bien sea para la concepción de un espacio arquitectónico o bien sea para la pura experimentación (ver anexo I). Entre los diferentes casos que integran dicho estado del arte realizado en el anexo I de esta memoria destaca la utilización de diversas tecnologías digitales como pueden ser:

Programación de materiales: Dicha técnica consiste en incluir dentro de los propios materiales algoritmos informáticos, los cuales permitirían el auto ensamblaje de los mismos, o la interacción del ser humano con los objetos que le rodean. Lo que se denomina según los autores Valderrama y Díaz en un artículo científico “El internet de las cosas” o “El internet de las casas”.(\*)1

Impresión 3D: Como se puede ver en alguno de los casos estudiados, la impresión en tres dimensiones es una tecnología que permitiría la concepción de espacios habitables, ya sea mediante impresoras 3D o mediante el uso de animales como “impresoras biológicas” como en el caso del Silk Pavilion.

Efectos sonoros y de movimiento: También se están usando diferentes técnicas que permiten incorporar coreografías de luz y sonido a los edificios como en el caso del Theme Pavilion.

Diseño accesible: Existen diferentes plataformas abiertas en las cuales los diseñadores comparten de forma abierta sus diseños con el resto de la sociedad haciendo el diseño accesible a cualquiera y permitiendo personalizar los diseños a las personas que los descargan de internet.

Este breve estado del arte nos predispone a pasar al siguiente apartado y poder profundizar más en alguna de las técnicas digitales existentes.

(\*)1Valderrama, F. & Díaz, J. (2016) Más allá del BIM y del cad: Del internet de las cosas al internet de las casas. EUBIM2016 Libro de actas, 160-169



[3]

## 5\_CASO PRÁCTICO

Como ya se ha explicado previamente en la metodología de trabajo, tras realizar una pequeña inmersión en el mundo de las tecnologías digitales aplicadas al diseño arquitectónico (ver anexo I), se ha elegido un proyecto real edificado en el cual se puede observar la aplicación de ciertas tecnologías digitales para su concepción arquitectónica y el posterior desarrollo del proyecto de ejecución del mismo.

Sobre este proyecto se procede a realizar un estudio de las técnicas que se han aplicado, para posteriormente reproducir esas técnicas estudiadas sobre un pequeño volumen.

Etileno, un material de base polimérica que permite mejorar las características de aislamiento térmico del edificio con un peso de un 1% con respecto al peso de un vidrio.

Constructivamente, se crean unas burbujas de este material que se intersecan entre sí unas con otras formando un “clúster”. Esta solución permite que durante el día se llegue a captar hasta el 20% de la energía diaria necesaria para la calefacción directamente del sol, aparte de un aporte lumínico al edificio de gran importancia que permite ahorrar hasta el 50% de la energía necesaria para iluminar el edificio. Por la noche las burbujas se iluminan por medio de unos leds de color azul (\*2) (ver imagen [5]).

### 5.1\_WATER CUBE - National Aquatics Center (China)

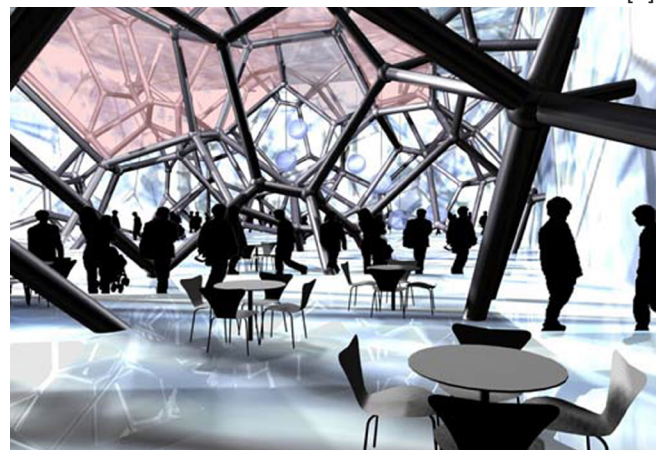
El proyecto tomado como referencia se trata de un conjunto formado por una plaza pública y un recinto de piscinas construido en Beijing con motivo de la celebración de las olimpiadas de 2008 que lleva la firma conjunta del estudio de arquitectura australiano PTW Architects y la multinacional de ingeniería Ove Arup Engineering ambos con base en Sídney (ver imágenes [2] y [3]).

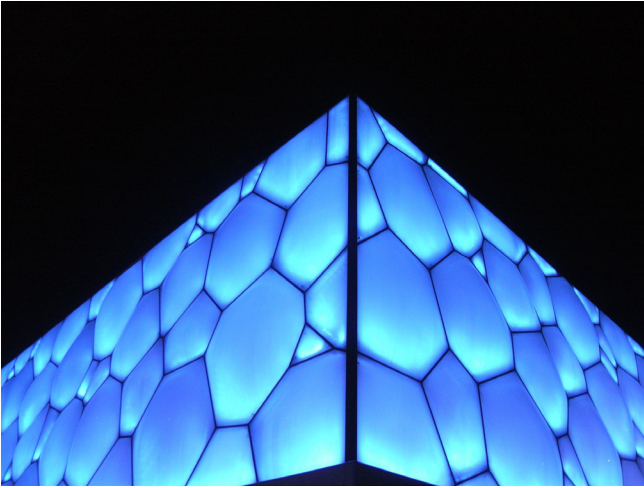
El proyecto utiliza el agua, elemento muy importante tanto en la tradición como en la cultura china, como leitmotiv tanto estructural como temático. Conceptualmente el edificio se trata de una serie de espacios interiores excavados en un “clúster” de burbujas de jabón con forma de paralelepípedo (ver imagen [4]).

La solución arquitectónica está inspirada en la formación natural de las pompas de jabón, y para su construcción se utiliza básicamente un material llamado Etiltetrafloruro de

(\*2) Fuente: <http://www.designbuild-network.com/projects/watercube/>

[4]





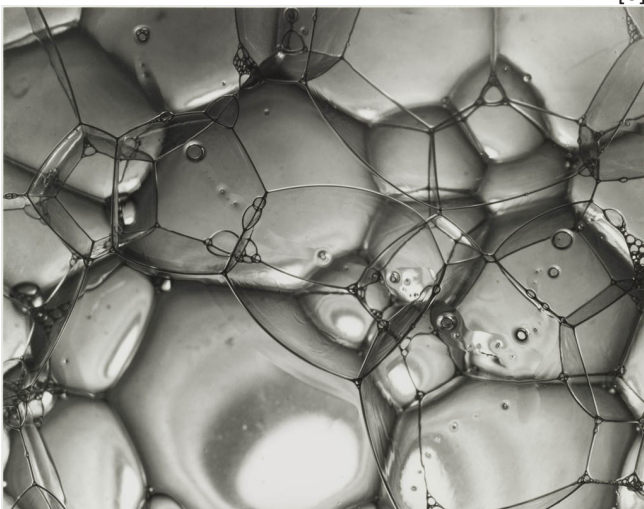
[5]

## 5.2\_ APROXIMACIÓN AL PROBLEMA

El proyecto posee una imagen de fachada muy potente. Según los propios arquitectos redactores del proyecto el mismo se inspira en los “clusters” que se forman cuando juntamos varias pompas de jabón. Un fenómeno extensamente estudiado y documentado en el entorno científico.

Sin embargo sorprende ver imágenes cercanas de la fachada en las cuales parece ser que la solución de diseño adoptada por los arquitectos dista bastante del fenómeno físico real que se produce al acercar dos burbujas de jabón (ver imagen [7] y [8]). En la imagen [6] se puede ver como es realmente en la naturaleza el fenómeno de intersección de varias pompas de jabón. Al aproximar dos pompas de jabón de diferente radio una respecto a la otra se genera una película intersección entre ambas, esta película posee unas características físicas determinadas que serán explicadas posteriormente. Pero lo que resulta evidente es que el resultado de la intersección de dos esferas es un círculo o en su defecto si no mostramos la intersección completa, como sería el caso de la fachada del edificio estudiado, un arco de circunferencia. En cambio, tal como puede verse en las imágenes [7] y [8], en el proyecto objeto de estudio esta intersección se resuelve mediante una recta.

Este hecho hace pensar que posiblemente, aunque se habla de la intersección de pompas de jabón como leitmotiv del diseño del edificio, los arquitectos decidieron simplificar en algún momento del proyecto la resolución tridimensional del mismo.



[6]



[7]



[8]

El enunciado de la ley matemática que explica el citado fenómeno físico de intersección de dos burbujas de jabón así como su generalización al caso de intersección de varias pompas de jabón formando un “cluster” se atribuye al físico belga Joseph Plateau (1801-1883) el cual enunció las conocidas como Plateau’s Laws o Leyes de Plateau en castellano, y que se complementan en las leyes enunciadas por Laplace-Young.

Por otro lado, partiendo de las imágenes disponibles del edificio, parece que la solución aplicada para el desarrollo del proyecto se trata del teselado de Voronoi. Dicho nombre es en honor al matemático Ruso-Ucraniano Gregory Feodosievich Voronoy que fue quien enunció la ley matemática que lo explica.

Así pues en los siguientes apartados del presente trabajo fin de grado se pasará a estudiar los dos métodos enumerados, ver sus particularidades y finalmente aplicar uno de ellos al diseño de un elemento de mobiliario urbano que consistirá más concretamente en una pieza de arte urbano inspirada en la intersección de pompas de jabón.

Fuente: Demin D. & Turcaud S. *Packing of soap bubbles - Geometrical solutions of soap bubble clusters*. [http://www.academia.edu/11783885/Packing\\_of\\_soap\\_bubbles\\_-\\_Geometrical\\_solutions\\_of\\_soap\\_bubble\\_clusters](http://www.academia.edu/11783885/Packing_of_soap_bubbles_-_Geometrical_solutions_of_soap_bubble_clusters)

Durikovic, Roman. (2005) *Computer Animation: Animation of Soap Bubble Dynamics, Cluster Formation and Collision*. JAMSI

[https://en.wikipedia.org/wiki/Voronoi\\_diagram](https://en.wikipedia.org/wiki/Voronoi_diagram)

5.3\_ MÉTODO DE VORONOI

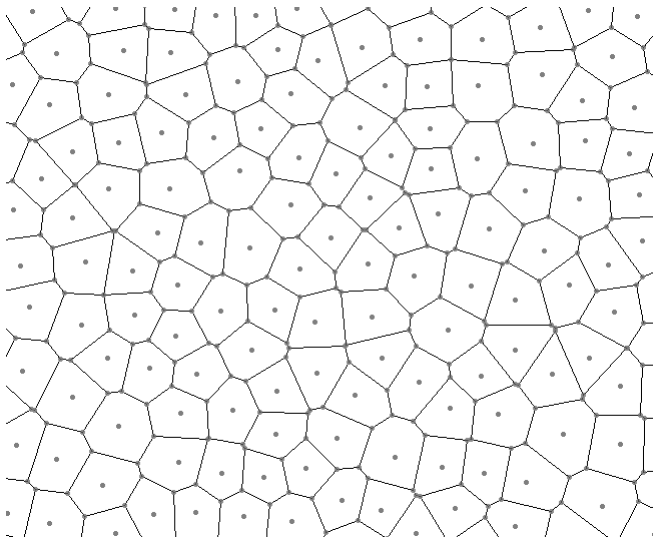
El método de subdivisión o de teselado de Voronoi consiste en dividir un plano dado en regiones mas pequeñas de la siguiente manera:

Dada una región del plano y una serie de puntos P1, P2, P3, ..... , Pn. Un punto cualquiera del plano pertenecerá a la región asociada a P1 si y solo si la distancia que lo separa del punto P1 es menor que la distancia que lo separa de cualquiera de los otros puntos definidos en el plano (ver imagenes [9] y [10]).

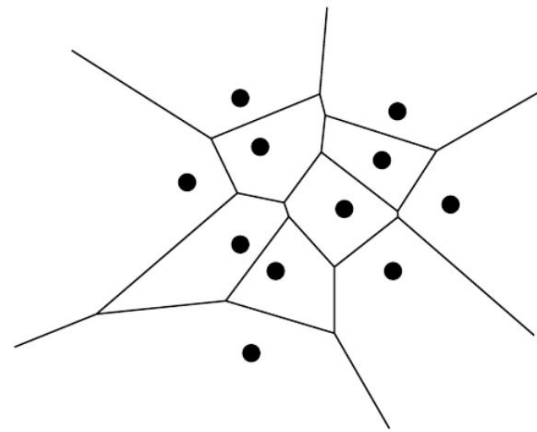
Todo esto escrito bajo notación matemática queda de la siguiente manera:

$$R_k = \{x \in X | d(x, P_k) \leq d(x, P_j) \text{ para cualquier } j \neq k \}$$

De esta condición matemática se explica la existencia de líneas rectas en el plano en lugar de circunferencias en tres dimensiones, ya que esas líneas rectas que aparecen representan el lugar geométrico de los puntos del plano que equidistan de dos puntos dados. Repitiendo el proceso dos a dos puntos nos encontramos con la subdivisión de Voronoi o teselado de Voronoi.



[9]



[10]

5.3.1\_ ALGORITMO EN GRASSHOPPER PARA VORONOI

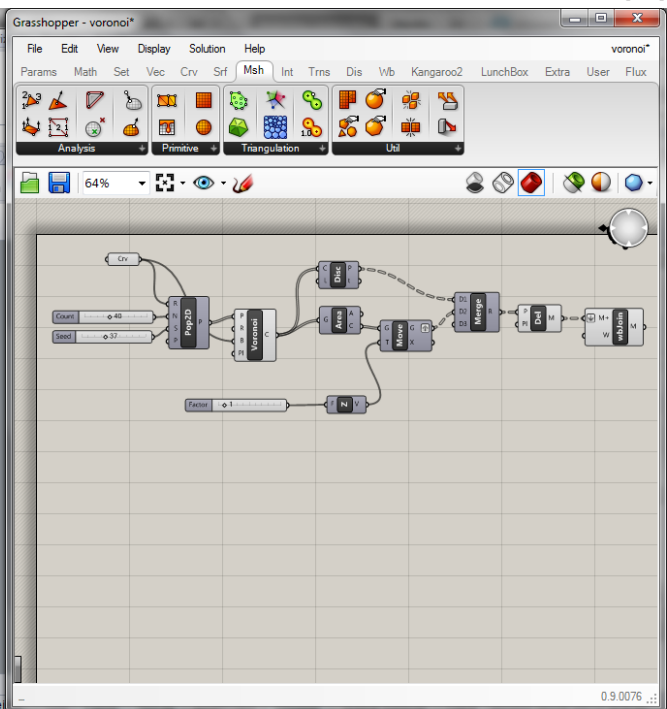
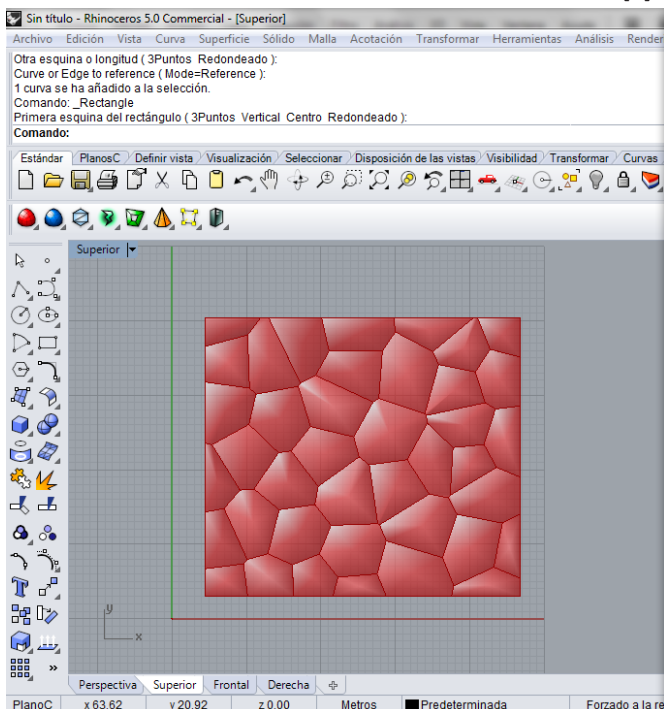
Para la subdivisión de una superficie introducida a través de Rhinoceros 5.0 mediante el método de teselado de Voronoi el propio programa Grasshopper dispone de un componente que se encarga de realizar esta operación.

Existen dos componentes que permiten realizar este proceso, el primero de ellos se llama Voronoi 2D y necesita de una región plana y una población de puntos definidos sobre la misma para poder hacer la subdivisión. El segundo de ellos se denomina Voronoi 3D y necesita de una región en tres dimensiones y una población de puntos definidos sobre la misma para funcionar.

Para la investigación realizada se ha elegido utilizar el componente Voronoi 2D. El proceso completo de subdivisión de una región mediante el uso de este componente se encuentra detallado en el Anexo II que acompaña a esta memoria. En la imagen [11] puede verse el resultado final.

Inicialmente se ha partido de un rectángulo introducido a mano en Rhinoceros y de una población de puntos aleatorios que se han generado en el propio Grasshopper mediante un componente denominado Populate 2D que posee el propio programa. Con estos dos inputs se ha obtenido el resultado que se observa en la imagen.

[11]



## 5.4\_ MÉTODO DE LAPLACE-PLATEAU

El método de Laplace-Plateau se trata del método que explica el fenómeno físico de intersección de dos pompas de jabón. Su enunciado matemático tiene el siguiente aspecto:

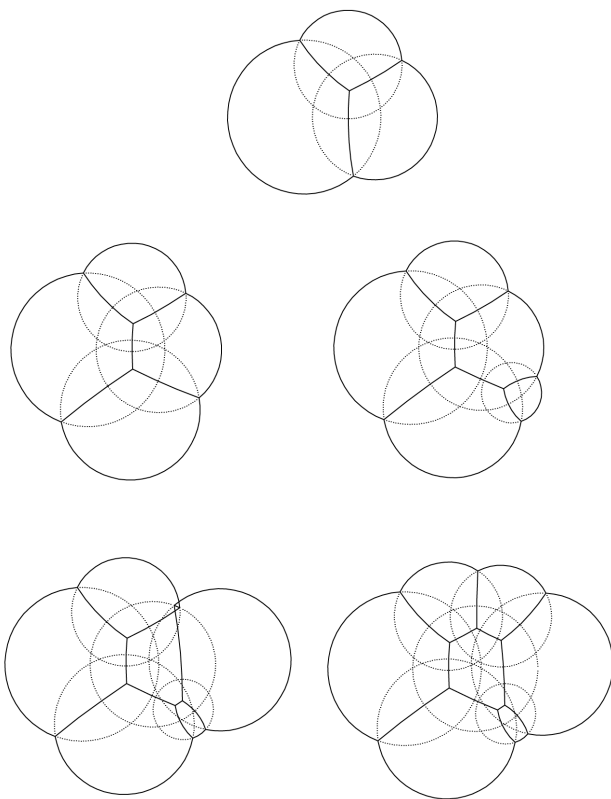
$$AB^2 = Ra^2 + Rb^2 - Ra * Rb \quad (1)$$

$$\frac{1}{Rab} = \frac{1}{Ra} - \frac{1}{Rb} \quad (2)$$

Donde Ra y Rb corresponde con los radios de dos pompas de jabón que se aproximan, Rab es el radio de la película que se forma entre ambas pompas en el momento que se tocan y AB es la distancia que separa los centros de ambas pompas una vez que se produce la intersección de ambas.

Estas leyes fueron enunciadas por el físico Joseph Plateau, pero para enunciarlas se apoyo en otras anteriores enunciadas por Laplace. De ahí que se haga referencia a las mismas como leyes de Laplace-Plateau (\*3).

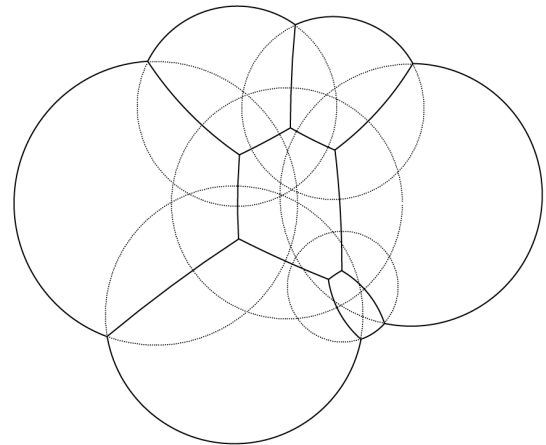
El proceso completo a seguir para resolver la intersección de



[12]

dos pompas de jabón mediante este método se encuentra explicado en Anexo III de la presente memoria. Para su resolución se parte de una lista de valores aleatorios que representan la magnitud de los radios de las pompas que se van a introducir en el "cluster". Posteriormente se seleccionan dos de ellas para resolver su intersección y a partir de ahí se va introduciendo de una en una más pompas al "cluster", y se van resolviendo las intersecciones que se van produciendo entre las nuevas pompas que se introducen y las existentes dentro del "cluster" (ver imagen [12]) hasta que finalmente se obtiene el resultado que se observa en la imagen [13].

(\*3) Fuente: Demin D. & Turcaud S. *Packing of soap bubbles - Geometrical solutions of soap bubble clusters*. [http://www.academia.edu/11783885/Packing\\_of\\_soap\\_bubbles\\_-\\_Geometrical\\_solutions\\_of\\_soap\\_bubble\\_clusters](http://www.academia.edu/11783885/Packing_of_soap_bubbles_-_Geometrical_solutions_of_soap_bubble_clusters)



[13]

### 5.4.1\_ PSEUDOCÓDIGO PARA MÉTODO DE LAPLACE-PLATEAU

Una vez que se conoce el procedimiento manual necesario a seguir para la realización de la construcción geométrica que se observa en la figura [13] el siguiente paso consiste en automatizarlo para que el computador lo ejecute de manera automática. Como paso previo a la automatización, es necesario analizar los pasos necesarios a seguir en lenguaje humano para posteriormente escribir en un lenguaje informático el código que realiza las diferentes ordenes que permiten realizar la construcción geométrica deseada.

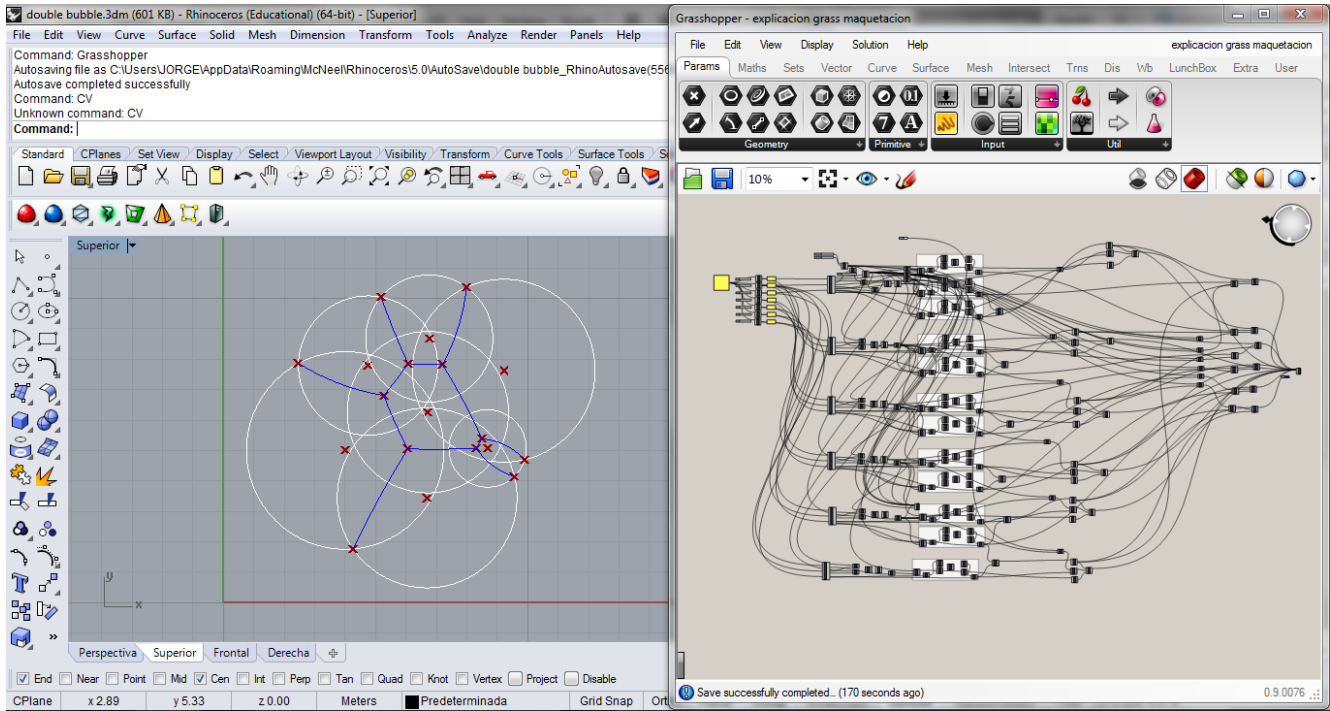
Para tal fin existe en el campo de la informática el concepto de pseudocódigo, es decir código falso, o lo que es lo mismo el listado de ordenes a seguir para conseguir la finalidad deseada de tal forma que posteriormente solo hay que traducir a un lenguaje informático este pseudocódigo para obtener el código que realiza la función deseada.

La totalidad del pseudocódigo realizado para obtener la figura geométrica de la imagen [13] se encuentra detallado en el Anexo IV de la presente memoria. A modo resumen se encuentra estructurado por bloques de ordenes que realizan determinadas tareas. Los bloques de ordenes que componen el pseudocódigo realizado son:

- \_Proceso de montaje de pompa A y B
- \_Proceso de intersección de A con B
- \_Proceso de incorporación de pompa C al montaje
- \_Proceso de intersección de A con C
- \_Proceso de intersección de B con C
- \_Proceso de incorporación de pompa D al montaje
- \_Proceso de intersección de A con D
- \_Proceso de intersección de B con D
- \_Proceso de incorporación de pompa E al montaje
- \_Proceso de intersección de D con E
- \_Proceso de intersección de B con E
- \_Proceso de incorporación de pompa F al montaje
- \_Proceso de intersección de E con F
- \_Proceso de intersección de B con F
- \_Proceso de incorporación de pompa G al montaje
- \_Proceso de intersección de F con G
- \_Proceso de intersección de B con G
- \_Proceso de intersección de C con G
- \_Proceso de identificación de las intersecciones de las películas intersección
- \_Proceso de identificación de las intersecciones exteriores entre pompas de jabón
- \_Proceso de construcción de las películas intersección

Una vez redactado el pseudocódigo, el siguiente paso es realizar la traducción de lenguaje humano a un lenguaje informático.





[14]

5.4.2\_ ALGORITMO EN GRASSHOPPER PARA MÉTODO DE LAPLACE-PLATEAU

Una vez que se conoce el procedimiento manual necesario a seguir para la realización de la construcción geométrica (ver apartado 5.4) y que se tiene una lista ordenada de ordenes necesarias para la construcción o pseudocódigo (ver apartado 5.4.1) es necesario traducir este a un lenguaje informático de tal forma que el computador sea capaz de entenderlo.

Tal y como se ha explicado en el apartado 3\_ METODOLOGIA, para la realización de esta tarea se ha elegido el plug-in de programación visual conocido como Grasshopper. Por lo que el lenguaje utilizado para dicha traducción será el lenguaje de programación visual que se genera dentro del propio plug-in.

El resultado final después de realizar dicha traducción es el que puede verse en la imagen [14] donde se observa en la mitad izquierda de la imagen, la pantalla de Rhinoceros 5.0 y en la mitad derecha, la pantalla de Grasshopper con toda la definición del código. (ver Anexo V para más detalle sobre el código).

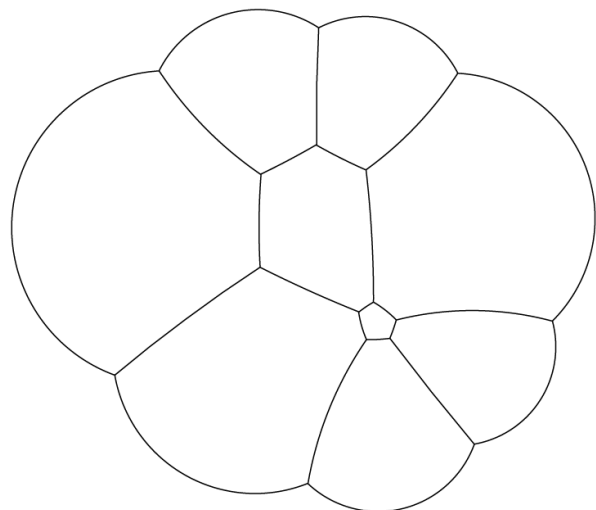


[15]

5.4.3\_ TRABAJO FUTURO A PARTIR DEL ALGORITMO REALIZADO

Se ha realizado un algoritmo que construye un modulo de seis pompas de jabón entorno a una pompa central, así como las respectivas intersecciones entre las mismas, pero para conseguir reproducir la fachada del edificio objeto de estudio (ver imagen [15]) es necesario concatenar repetidas veces el proceso explicado hasta aquí. Para ello será necesario introducir nuevas pompas de jabón a la construcción realizada y resolver las nuevas intersecciones que se generan (ver imagen [16]).

Se hace necesario plantear una estrategia de crecimiento, en la que hay que identificar la primera pompa central y las pompas que rodean a esta central. Posteriormente es necesario seleccionar alguna de las pompas perimetrales y definirla como pompa central del segundo crecimiento. Al hacer esta definición esa pompa tendrá una serie de pompas que serán sus pompas perimetrales ya existentes y otras nuevas que se deberán introducir, resolver las nuevas intersecciones y volver a repetir el proceso hasta que la superficie generada sea del tamaño deseado.



[16]

## 5.5\_EJEMPLO DE APLICACIÓN REAL

Con el objetivo de asimilar y sintetizar por parte del autor del presente trabajo final de grado todos los conceptos que se han estudiado a lo largo del mismo, se va a proceder a continuación a aplicar algunos de ellos a la realización de un caso de aplicación real.

Para realizar el citado caso de aplicación se va a proceder como ya se ha dicho anteriormente con la herramienta informática Rhinoceros 5.0 y su complemento para programación visual llamado Grasshopper.

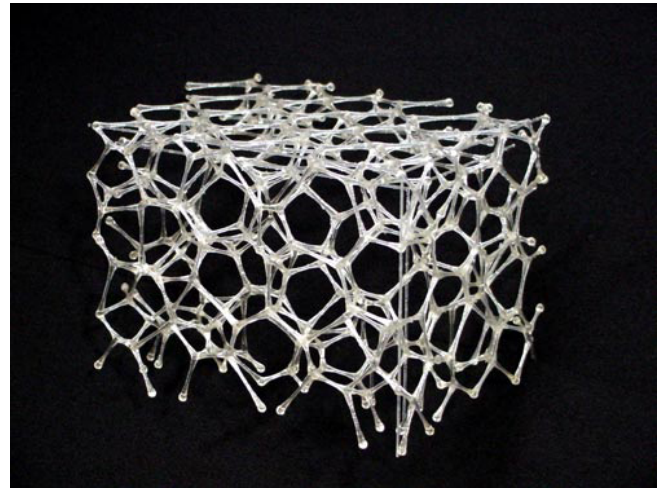
Se va a realizar el diseño de una pieza en forma de paralelepípedo sobre la cual se va a aplicar la función de Voronoi 3D con la finalidad de obtener un diseño similar al que puede verse en la imagen que acompaña el presente texto (ver imagen [17])

Para ello se parte del volumen sobre el que se quiere trabajar en Rhinoceros y se introduce como un objeto de entrada en Grasshopper. Posteriormente ya en el propio programa Grasshopper se pasa a generar una nube de puntos aleatoria que servirá de base a la subdivisión del volumen mediante el método de Voronoi. Con estos dos datos previos - la nube de puntos por un lado y el volumen sobre el que actuar por otro- se pasa a ejecutar la función de Voronoi 3D propiamente dicha, y se obtiene de esta forma una serie de líneas que delimitan los polígonos en los que queda dividido el paralelepípedo de partida.

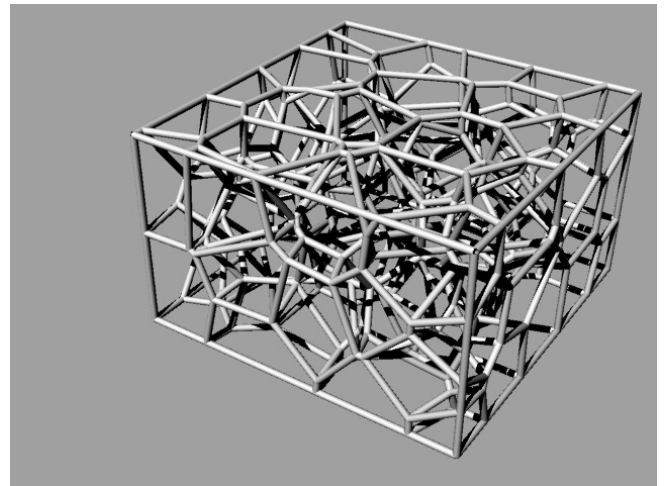
Finalmente se recogen las líneas que definen la subdivisión realizada sobre el volumen en el que se está trabajando y se aplica un componente que toma estas líneas como base para convertirlas en unos tubos que serán los que compondrán la estructura propuesta para construir el volumen.

Por ultimo hay que activar la orden de Grasshopper denominada "bake" para que estos datos que se han generado en Grasshopper se vuelquen sobre el modelo de Rhinoceros.

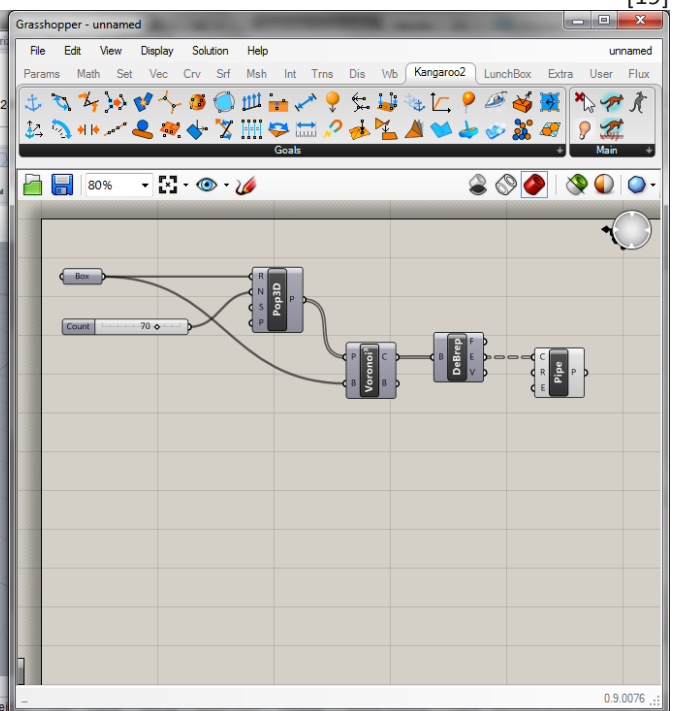
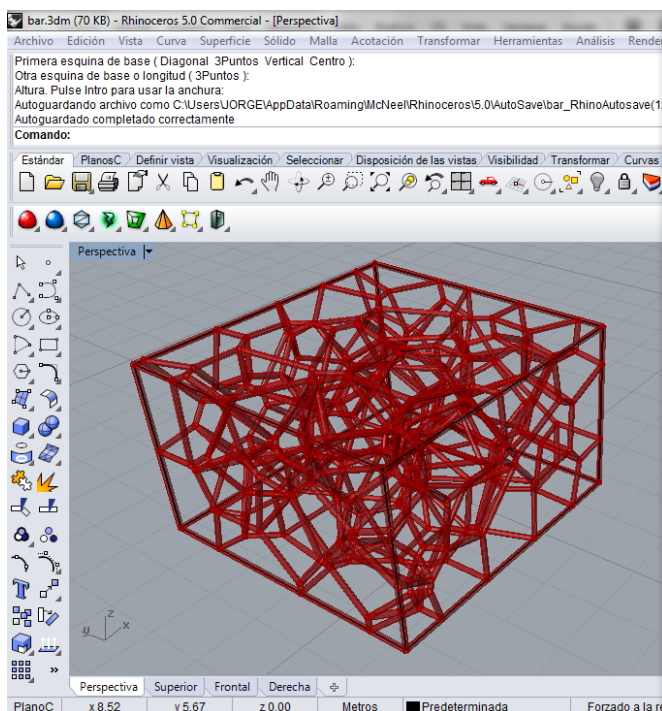
Como resultado del caso practico se obtienen las imágenes que acompañan el texto (ver imágenes [18] y [19]). Una geometría obtenida con Rhinoceros a través de Grasshopper y que se propone como diseño base de una pieza de arte urbano inspirada en las intersecciones de las pompas de jabón.



[17]



[18]



[19]

6\_CONCLUSIONES

OBJETIVO 1: Análisis por parte del autor del mundo del diseño paramétrico así como sus posibles aplicaciones a los proyectos urbanos y paisajísticos.

Objetivo alcanzado en el apartado 4\_ESTADO DEL ARTE en el que se hace un estudio de diferentes casos reales de aplicación de técnicas digitales y paramétricas en el mundo del diseño.

OBJETIVO 2: Conocimiento y profundización en las ideas básicas que subyacen del concepto “smart geometry”.

Objetivo alcanzado en el apartado 5\_CASO PRACTICO en el que se selecciona el edificio Water Cube para estudiar las diferentes posibilidades existentes para conseguir el diseño deseado.

OBJETIVO 3: Aplicación de las ideas que subyacen del concepto “Smart Geometry” al diseño de un elemento de mobiliario urbano.

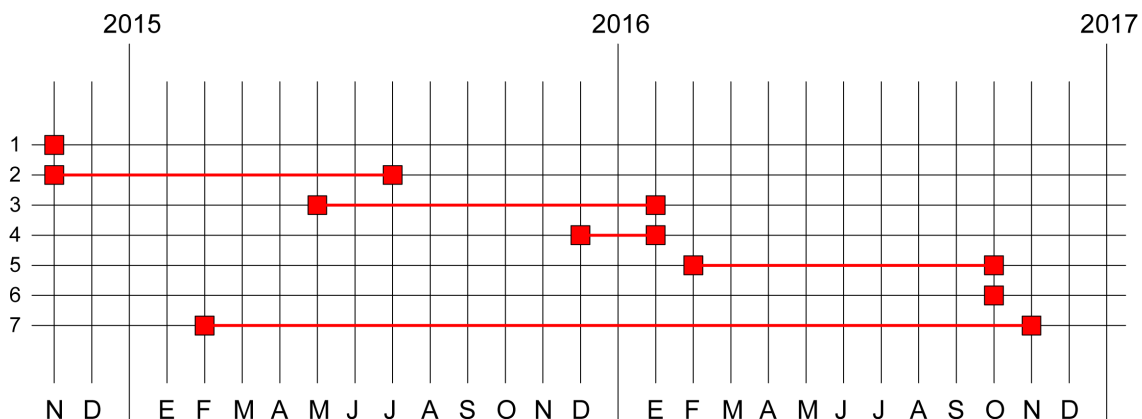
Objetivo alcanzado en el punto 5.5\_EJEMPLO DE APLICACIÓN real en el que se realiza el diseño de una pieza de arte urbano basada en el concepto de intersección de pompas de jabón.

De todas las tareas realizadas las que mas complicado me ha resultado su realización han sido por una parte el estudio del método de Laplace-Young por su contenido fisico matemático y la dificultad que tiene su asimilación y por otro lado la realización del pseudo algoritmo, ya que muchas de las tareas realizadas y las decisiones tomadas se hacen de manera automática y hay que tener en cuenta que aunque para nosotros pueden ser muy sencillas y evidentes para un computador no lo son.

7\_DIAGRAMA TEMPORAL

Para el desarrollo del presente trabajo se han realizado una serie de tareas, en ocasiones superpuestas en el tiempo unas con otras y que se detallan a continuación.

Nº TAREA	TAREA	FECHA INICIO	FECHA FIN	Nº de Horas
1	Comienzo del Trabajo Final de Grado	Noviembre de 2014		
2	Investigación sobre las posibilidades que tiene el diseño paramétrico	Noviembre de 2014	Junio de 2015	20
3	Aprendizaje de la herramienta Grasshopper	Mayo de 2015	Enero de 2016	80
4	Estudio del edificio Watercube	Diciembre de 2015	Enero de 2016	5
5	Estudio de los métodos aplicados al diseño del edificio Water Cube	Febrero de 2016	Octubre de 2016	100
6	Caso Practico	Octubre de 2016	Octubre de 2016	8
7	Redacción de la memoria	Febrero de 2015	Noviembre de 2016	30
			TOTAL	243







Fluid Assembly: Chair

Se trata de un proyecto desarrollado por el laboratorio de auto ensamblaje del Instituto tecnológico de Massachusetts ( Self-Assembly Lab, MIT Massachusetts Institute of Technology).

Es un proyecto de alto grado experimental, pero ha sido seleccionado para su estudio en el presente trabajo fin de grado por tratarse de una oportunidad para investigar en los temas de auto ensamblaje de estructuras, muebles, o incluso componentes electrónicos. Una vez auto-ensambladas las estructuras se puede experimentar con ellas, utilizarlas, o desmontarlas y reciclarlas para producir otras nuevas.

Para el experimento se introdujo cierto número de piezas en un tanque de agua turbulenta y se filmaron durante 7 horas al cabo de las cuales se extrajo como resultado una silla completamente ensamblada.

Autores: Skylar Tibbits, Baily Zuniga,  
Carrie McKnelly, Athina Papadopoulou.  
Fuente: [http://www.selfassemblylab.net/  
FluidAssemblyFurniture.php](http://www.selfassemblylab.net/FluidAssemblyFurniture.php)

Se trata de un proyecto que nos enseña la cabeza visible de las tecnologías encaminadas a la programación de los materiales. Unos experimentos que tratan de introducir algoritmos en los materiales de tal forma que al ejecutarse dichos algoritmos los materiales podrían auto posicionarse y formar estructuras por si solas.

## Silk Pavillion



[1\_2]

En este caso nos encontramos ante una mezcla de técnicas constructivas. Por un lado una técnica digital consistente en una “tejedora” manejada por computador que construyó la estructura principal del pabellón y por otro lado una técnica de tejido natural, que son los gusanos de seda.

La forma general del pabellón viene dada por un algoritmo que realiza un tejido de un solo hilo continuo a través de parches que proporcionan diversos grados de densidad. La variación de densidad se creó por los propios gusanos, ya que se desplegó un enjambre de 6500 gusanos de seda que funcionaron como una impresora biológica y se encargaron de rellenar y de reforzar los espacios que había dejado el tejido CNC. Una vez pasado el periodo de tejido de los gusanos estos se retiraron.

Durante el proceso de construcción se vio que el comportamiento de los gusanos variaba en función de las condiciones ambientales de luz, humedad y temperatura que les rodeaban migrando a zonas mas oscuras y mas densas.

Autores: Prof. Neri Oxman, Markus Kayser,  
Jared Laucks, Carlos David Gonzalez Uribe, Jorge  
Duro-Royo  
MIT Media Lab  
Fuente: [http://matter.media.mit.edu/  
environments/details/silk-pavillion#prettyPhoto](http://matter.media.mit.edu/environments/details/silk-pavillion#prettyPhoto)

Se realizaron varias investigaciones paralelas sobre el uso de los gusanos de seda como elementos que pueden “computar” basándose en criterios de rendimiento externos. También se realizó un estudio sobre la formación de estructuras no tejidas de fibra generadas por gusanos de seda como un esquema de cálculo para la optimización de estructuras de superficie a base de fibra.



Theme Pavilion EXPO Yeosu

[I\_3]

Se trata de un edificio que incorpora el movimiento como un ingrediente más de su arquitectura. Esta incorporación del movimiento se realiza mediante la construcción de una fachada kinésica que se integra de forma continua en la piel del edificio.

El movimiento de la fachada está controlado por un computador que permite realizar tanto un movimiento funcional que regule la cantidad de luz que entra al interior del edificio como un movimiento artístico que se encargue más de generar un espectáculo de luz en el interior y un espectáculo de movimiento en el exterior. La particularidad que posee este proyecto es que el movimiento no se realiza por el accionamiento mecánico de un motor sino que viene dado por la inducción de unas fuerzas longitudinales sobre una lama de cierta longitud, provocando su pandeo e induciendo un movimiento que simula el movimiento de las branquias de un animal.

La fachada está compuesta por unas lamas de fibra de vidrio reforzada con polímeros que le confiere a las lamas una alta resistencia a tracción y una baja resistencia a flexión lo que permite grandes deformaciones elásticas reversibles. Su movimiento de apertura está basado en un estudio del ITKE University Stuttgart sobre cómo se pueden aplicar movimientos biológicos a escala arquitectónica, y se basa en inducir fuerzas de compresión a las lamas que dan lugar a la deformación elástica compleja.

Autor: Soma ZT GmbH

Fuentes:

<http://www.e-architect.co.uk/korea/expo-yeosu-pavilion>

[http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme\\_pavilion&parent=2#](http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme_pavilion&parent=2#)



Fab Lab House

[I\_4]

La Fab Lab House se trata de un proyecto desarrollado dentro del marco del concurso Solar Decathlon y bajo los ideales de consumo energético que persigue el citado concurso, pero su interés desde el punto de vista de este trabajo reside en sus características constructivas.

Se trata de un proyecto realizado íntegramente dentro de un FAB-LAB, lo cual conlleva una serie de características propias de los diseños construidos en estos lugares como la facilidad de reproducción en otro FAB-LAB, la participación ciudadana, el alto contenido de métodos de construcción digitales, la accesibilidad a su "código fuente", etc.

Básicamente se trata de una estructura a base de costillas de madera fresadas con una determinada forma, estas costillas se unen unas con otras mediante unos travesaños de madera y posteriormente se rellenan los huecos entre las costillas. Finalmente se impermeabiliza la cubierta para hacerla habitable, y se urbaniza el entorno. En el caso de esta casa se incorporaron diferentes sistemas tanto activos como pasivos para el ahorro de energía derivados de los objetivos del concurso para el que se presentaba la vivienda.

Autor: Instituto de Arquitectura Avanzada de  
Cataluña.  
Fuente: <http://www.fablabhouse.com>

Destaca sobre todo que las técnicas constructivas de la misma son muy básicas, haciendo posible que cualquier persona sin formación específica en construcción que tenga acceso a un FAB-LAB pueda reproducirla y construirse su propia FAB-LAB House incluso con modificaciones en el diseño base.

## WIKI House



[1\_5]

WIKI HOUSE se puede definir como un "Open Source Building System" o lo que es lo mismo un Sistema constructivo de código abierto. Se trata de una revolución social derivada del concepto de los Fab Labs. Uno de sus fundadores habla de que los arquitectos normalmente trabajan para el 1% de la población, que son los que tienen el dinero y los que construyen edificios. Con el proyecto Wiki House se busca invertir el porcentaje y trabajar para el otro 99% restante.

Wiki House es una plataforma "online" en la que cualquiera se puede registrar. En esta plataforma, los diseñadores cuelgan proyectos completos de piezas construibles, desde pequeñas cabañas de jardín a edificios más completos, y los miembros de la comunidad se pueden descargar los planos que permiten su construcción y con la ayuda de un Fab Lab o una empresa de fabricación son autosuficientes para poder construir su propio edificio.

Consecuencia directa de este proyecto es una nueva imagen de las ciudades, donde ya no hace falta un largo proceso para construir sino que las ciudades se plantean con un crecimiento más espontáneo y funcional, y lo más revolucionario, impulsadas por el ciudadano de a pie.

Otra de las líneas de funcionamiento del proyecto es la concepción de los espacios públicos, los cuales a partir de ahora podrán ser construidos por los propios ciudadanos, identificando los mismos como propios y haciendo que la sociedad se vincule de una forma diferente para su cuidado y mantenimiento.

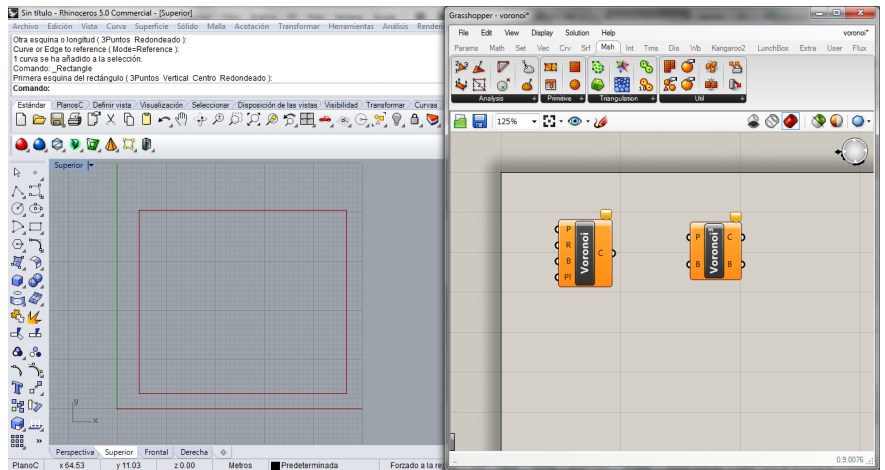
Autor: WIKI HOUSE Foundation.  
Fuente: <http://www.wikihouse.cc>





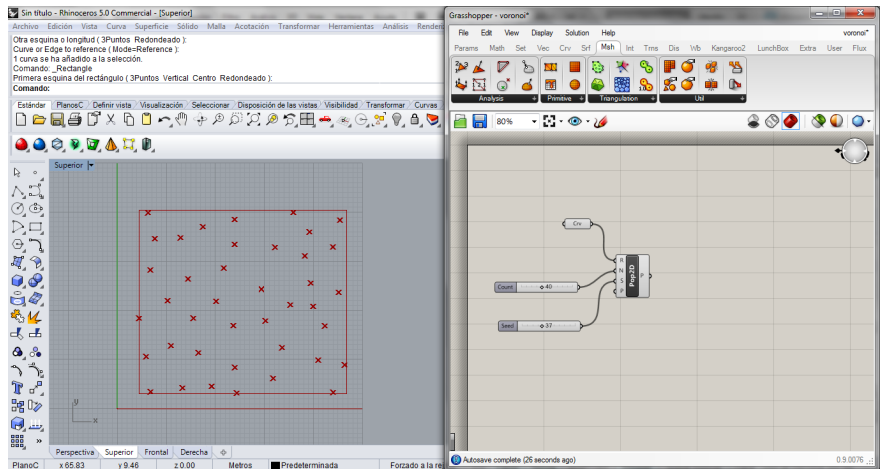






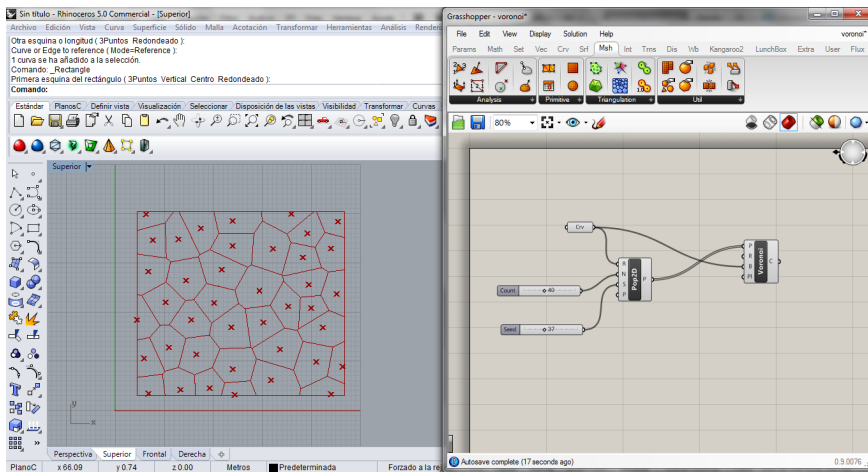
[11\_1]

Para aplicar el método de triangulación de Voronoi, el propio plug-in Grasshopper dispone de un componente de aplicación directa (imagen [1]). Concretamente dispone de dos componentes diseñados para esta función los cuales están contenidos dentro de la pestaña Mesh de las funciones básicas del programa (Voronoi 2D y Voronoi 3D) cada uno para aplicarlo en el caso del 2D a una superficie y en el caso del 3D a un volumen.



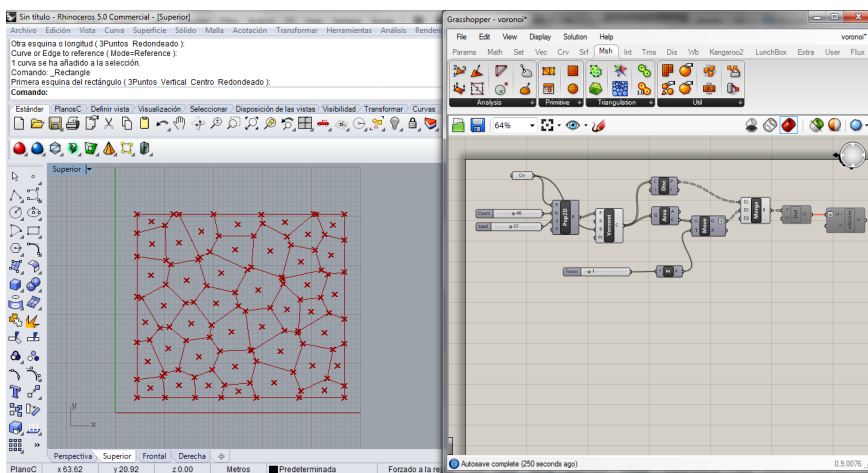
[11\_2]

Para aplicar el componente Voronoi es necesario introducirle como inputs una superficie, la cual dividirá según el método de Voronoi, una población de puntos aleatoria contenida en el plano que será la que tomará de base para realizar la triangulación, y por ultimo los limites del plano sobre el cual va a actuar la función. Dicha población es posible construirla a mano seleccionando puntos con el ratón sobre el plano, o bien mediante un componente que crea dicha población de puntos aleatorios sobre un plano dado a partir de un valor "semilla" y un número de unidades a colocar (imagen [2]).



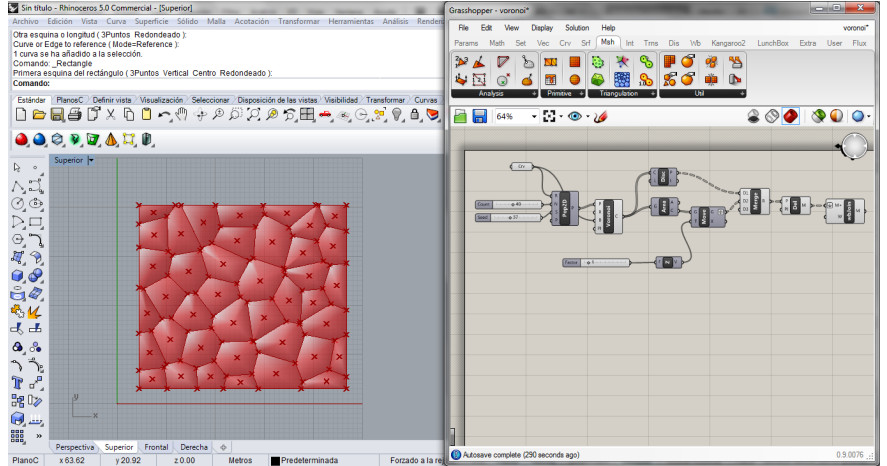
[II\_3]

Una vez están definidos todos los parámetros de partida, hay que colocar el componente Voronoi y conectarlo debidamente a los datos de partida (imagen [3]). En el momento que se realiza la conexión se obtiene automáticamente el teselado de la superficie de acuerdo a la ley descrita en el apartado 5.3\_MÉTODO DE VORONOI, con la única salvedad de que se trata de una subdivisión realizada a base de líneas, y por lo tanto necesitará de un tratamiento posterior para convertirla en superficies.



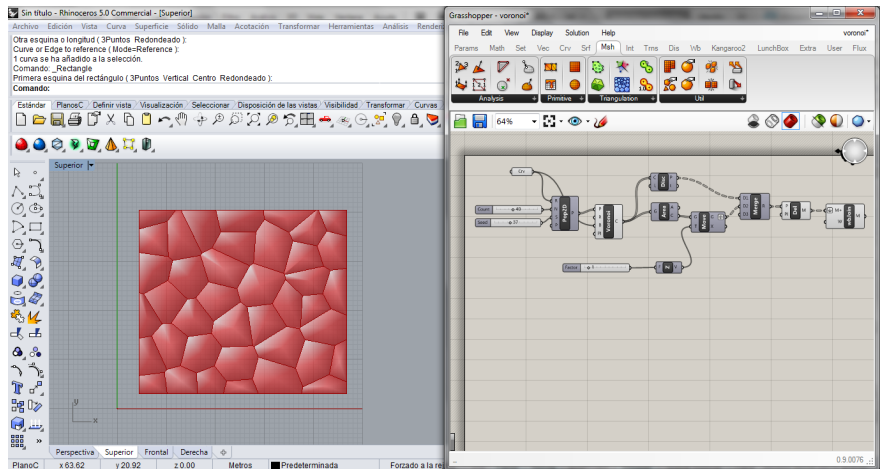
[II\_4]

El tratamiento posterior a aplicar a los datos obtenidos directamente con el componente Voronoi consiste en hallar el centroide de cada uno de los polígonos que se han generado, así como los vértices de los mismos (imagen [4]). Todos estos datos posteriormente se introducen en una única lista de datos que servirá como input para el componente llamado Delany, y que se encarga de hacer una superficie tomando como base esos puntos (imagen [5]).

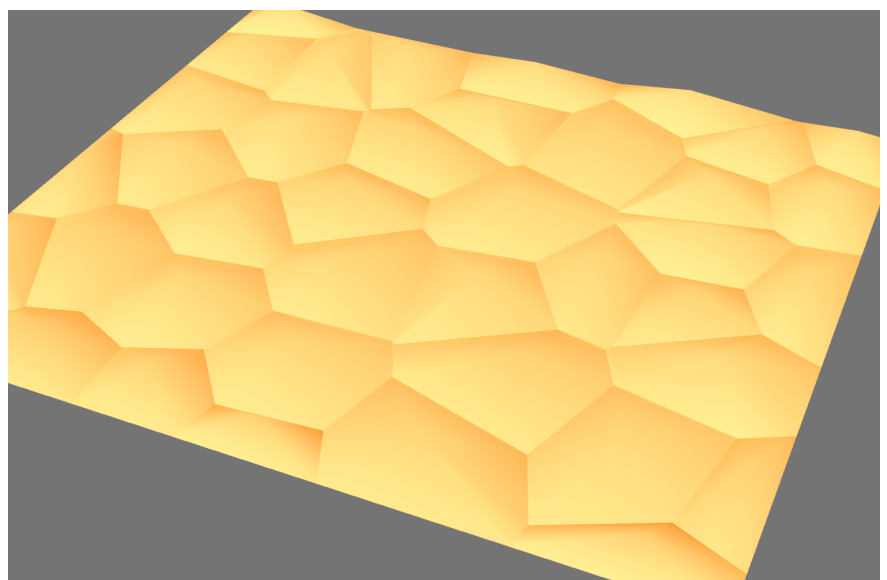


[II\_5]

Por último y para dar por finalizado el ejercicio se procede a ocultar los puntos intermedios que han servido para resolver el problema (imagen [6]). Para finalizar el proceso en Grasshopper también es necesario ejecutar la orden "bake" para que la superficie se genere en Rhinoceros, y lanzar un render sencillo para visualizar mejor el resultado final (imagen [7]).



[II\_6]



[II\_7]









Tras la forma aparente que se aprecia al visualizar el edificio se esconde la física que se produce cuando dos o más pompas de jabón se aproximan, y que se explica en los siguientes párrafos.

En primer lugar para poder llegar a la explicación física completa del algoritmo que genera la fachada del edificio, se parte de la simplificación del mismo sustituyendo las pompas de jabón por una aproximación a las mismas realizada con esferas en 3D. Matemáticamente se parte de las leyes enunciadas por Laplace-Plateau y que se resumen en las siguientes dos fórmulas (III\*1):

$$AB^2 = Ra^2 + Rb^2 - Ra * Rb \quad (1)$$

$$\frac{1}{Rab} = \frac{1}{Ra} - \frac{1}{Rb} \quad (2)$$

La fórmula (1) expresa que dadas dos burbujas a y b que entran en contacto entre sí, sus centros se colocaran a una distancia denominada AB y que vendrá determinada por los radios de las dos burbujas que entran en contacto mediante esa relación matemática.

La segunda de las fórmulas indica que el radio de la película intersección que se generara entre ambas será el identificado como Rab y vendrá dado por los radios de las dos burbujas que están interaccionando de acuerdo a la expresión matemática indicada.

Una vez introducido el concepto físico-matemático subyacente en el procedimiento con el que se va a trabajar, se pasa a explicar paso a paso el proceso en su totalidad. En primer lugar y puesto que los diferentes radios son inputs que se deberán introducir en las fórmulas, se procede a generar una lista de valores aleatorios con dos observaciones. Por un lado se busca que los radios no sean muy diferentes entre sí y por otro lado tampoco se desea que dos radios que vayan a interactuar sean iguales. El motivo de la primera decisión es porque se va a dibujar los resultados a mano y por comodidad se establece este criterio. La motivación de la segunda decisión es porque en el caso de que dos radios sean iguales, el radio de la película intersección que se forma tiende a infinito y por lo tanto cambia de ser una circunferencia a una recta, así que para eliminar la complicación que puede producir esta situación, se elimina esta variable.

Por lo tanto se procede a generar una lista de valores que posteriormente se usaran para definir los radios de las burbujas que se van a representar y que va a ser la siguiente:

3.246127

2.651599

2.290026

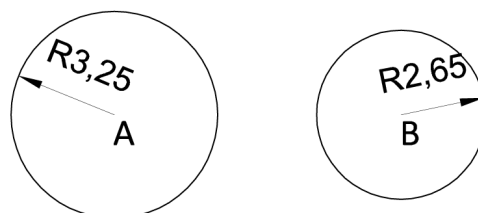
2.955002

1.275895

3.003767

La siguiente restricción a introducir para simplificar el proceso va a ser sustituir las esferas en 3D por circunferencias en el plano. Una vez resuelto el problema con circunferencias en el plano, el paso a esferas en 3D será inmediato.

Para la explicación se parte aislando dos circunferencias, las cuales se van a aproximar y se va a determinar el radio de la película que se obtiene entre ellas (imagen [III\_1]).



Ra=3,246127

Rb=2,651599

(III\*1):

Fuente: Demin D. & Turcaud S. *Packing of soap bubbles - Geometrical solutions of soap bubble clusters*. [http://www.academia.edu/11783885/Packing\\_of\\_soap\\_bubbles\\_-\\_Geometrical\\_solutions\\_of\\_soap\\_bubble\\_clusters](http://www.academia.edu/11783885/Packing_of_soap_bubbles_-_Geometrical_solutions_of_soap_bubble_clusters)

Durikovic, Roman. (2005) *Computer Animation: Animation of Soap Bubble Dynamics, Cluster Formation and Collision*. JAMSI

Las dos circunferencias seleccionadas para la explicación serán de radios  $R_a=3,246127\text{cm}$  y  $R_b=2,651599\text{cm}$  (los dos primeros valores de la lista de radios) y mediante la aplicación directa de las leyes de Plateau y de Laplace-Young (1) y (2) se obtiene la distancia que debe existir entre los centros de ambas pompas (AB) y el radio de la película que se forma en su intersección ( $R_{ab}$ ).

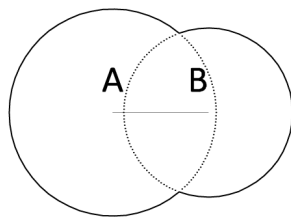
Obteniendo los siguientes valores:

$$AB = 2,993474$$

$$R_{ab} = 14,477754$$

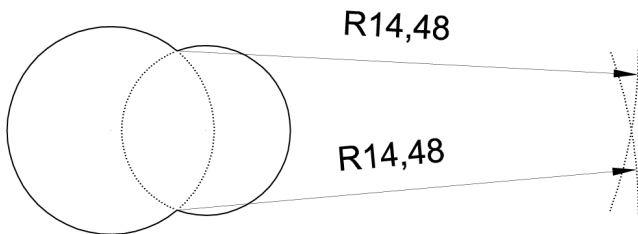
Con estos dos valores se debe realizar una construcción geométrica que permita determinar el punto donde se situará el centro de la película intersección de ambas burbujas y por tanto su representación.

En primer lugar se representa el primero de los círculos ( $R_a$ ), desde el centro de este primer círculo y con una distancia de 2,993474 se traza un segmento horizontal que será el que determine la posición del centro del segundo círculo

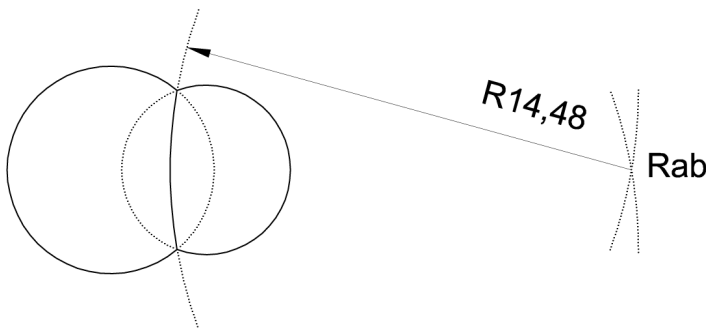


[III\_2]

Una vez quedan posicionadas las dos circunferencias en el espacio con centro en cada una de las intersecciones que se producen entre ambas circunferencias se trazan unos arcos de circunferencia con un radio de 14,477754cm determinando de esta forma el centro de la película intersección ( $R_{ab}$ ) (imagen [III\_3]), y por último desde este punto que se acaba de hallarse representa la película intersección entre ambas circunferencias (imagen [III\_4]).

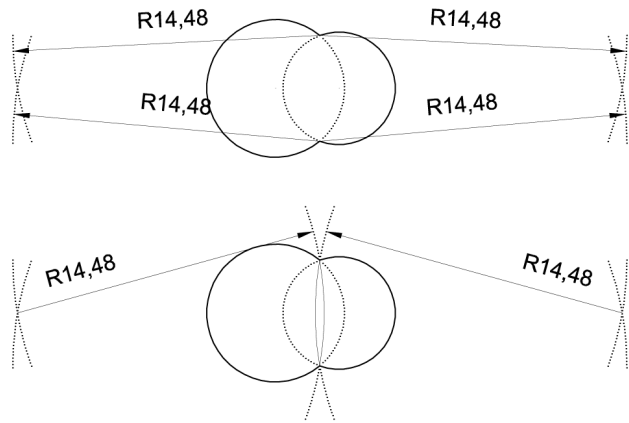


[III\_3]



[III\_4]

Llegado este punto del proceso se debe introducir más círculos utilizando este método con la salvedad de considerar que siempre la burbuja de menor radio tendrá una mayor presión interna y por tanto será la que introducirá parte de su volumen en el interior de la de mayor tamaño. Como se puede observar en el diagrama (imagen [III\_5]) existen dos posibles soluciones a tener en cuenta una por la derecha y otra por la izquierda, y se elige la que hace que la circunferencia pequeña se introduzca en la grande.



[III\_5]

A continuación se procede a introducir una nueva circunferencia en este caso de radio  $R_c=2,290026$  la cual deberá de cumplir las premisas que se acaban de explicar dos a dos por lo que en este caso se tienen las siguientes ecuaciones a resolver:

$$AB^2 = Ra^2 + Rb^2 - Ra * Rb$$

$$AC^2 = Ra^2 + Rc^2 - Ra * Rc$$

$$BC^2 = Rb^2 + Rc^2 - Rb * Rc$$

$$\frac{1}{Rab} = \frac{1}{Ra} - \frac{1}{Rb}$$

$$\frac{1}{Rac} = \frac{1}{Ra} - \frac{1}{Rc}$$

$$\frac{1}{Rbc} = \frac{1}{Rb} - \frac{1}{Rc}$$

Las cuales una vez resueltas dan los siguientes datos:

$$AB = 2,993474$$

$$AC = 2,889263$$

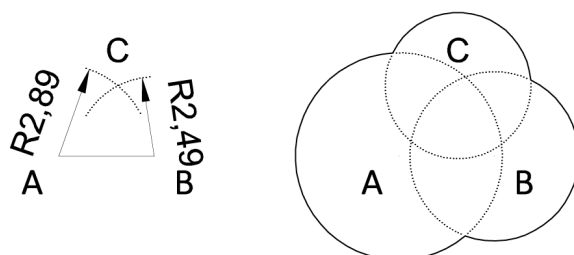
$$BC = 2,490575$$

$$Rab = 14,477754$$

$$Rac = 7,75036$$

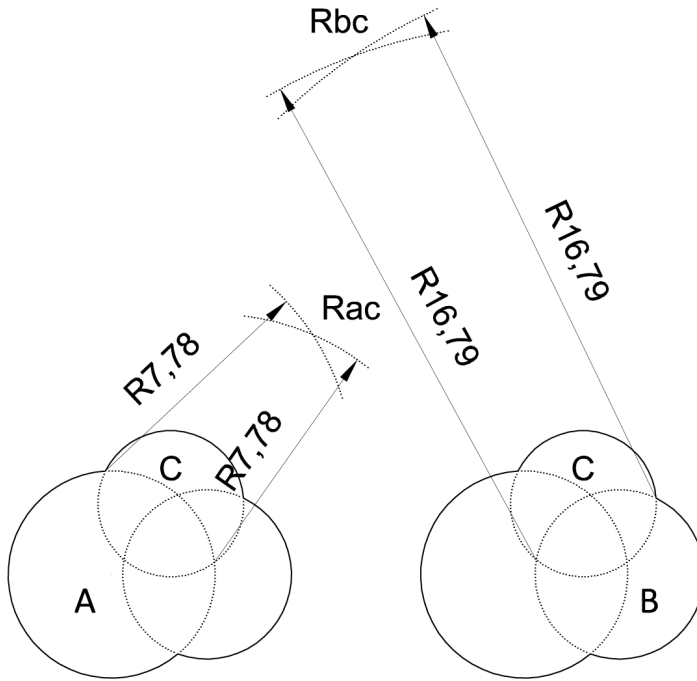
$$Rbc = 16,793941$$

Con estos datos ya se puede proceder a representar geoméricamente el "clúster" de tres burbujas. Para ello en primer lugar partiendo de los centros A y B que se tenía representado del anterior paso se posicionará el tercer centro (C) cumpliendo las premisas de distancia obtenidas según las ecuaciones (imagen [III\_6]); haciendo notar que existen dos posibles soluciones al respecto, una que coloca el punto en la parte superior del segmento que se tenía trazado y otra que lo colocaría en la parte inferior. La elección de una u otra opción es indiferente pero condiciona la decisión a tomar posteriormente al introducir la pompa D cuando ya no será indiferente. En este caso se la opción que coloca la pompa en la parte superior.



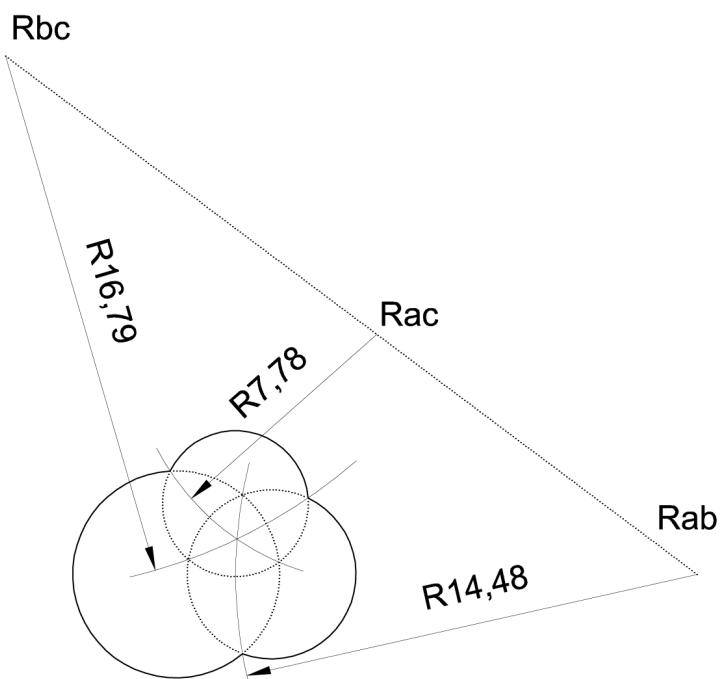
[III\_6]

Una vez se tiene el clúster representado, con el mismo procedimiento geométrico empleado anteriormente para hallar el centro de la película Rab se posicionan dos a dos los centros de las películas Rac y Rbc tal y como se muestra en las figura (imagen [III\_7]) teniendo siempre presente que existen dos puntos en el plano 2D que permiten dibujar cada una de las circunferencias, y que se debe elegir de los dos el que responde al criterio de que la burbuja pequeña debe de ser la que se introduce en la grande.



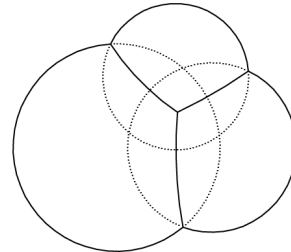
[III\_7]

Encontrados los centros de las tres películas intersección se traza cada una de ellas respetando la medida de radio que debe de tener. Para posteriormente seleccionar el segmento de película que interesa y terminar obteniendo la intersección geométrica buscada (imagen [III\_8]).



[III\_8]

Cabe destacar dos cosas. Por un lado señalar que los tres centros de las películas intersección de las tres burbujas que intervienen en el “cluster” se encuentran alineados tal como puede verse en la figura (imagen [III\_8]) y por otro lado; El punto intersección de las películas intersección será definitivo, pero no así el final, el cual actualmente llega hasta la intersección con el perímetro del “cluster”, pero que posteriormente conforme se introduzcan más burbujas y más películas intersección se verá modificado, por lo que todavía no se puede dar como finalizada ninguna de las películas intersección que aparecen (imagen [III\_9]).



[III\_9]

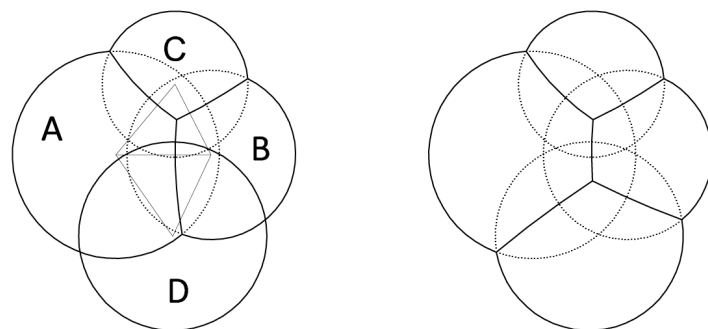
De esta forma se deben de introducir mas circunferencias hasta llegar a conseguir una superficie como la que podemos ver en el alzado del edificio objeto de estudio.

Así pues se procede manualmente a seguir construyendo la geometría para poder ver los puntos críticos que presenta la resolución del problema y poder posteriormente introducirlos en el código informático sin que de problemas.

A continuación se procede a introducir una nueva burbuja a la construcción (D) la cual tendrá un radio de 2,955002 y se toma la decisión de posicionarla en el plano con respecto a las burbujas A y B colocadas anteriormente. Con estos datos de partida se resuelven las ecuaciones explicadas en el caso anterior (1) y (2) para el caso de las pompas A, B, y D y se obtienen los siguientes resultados:

ID	RADIO		DISTANCIA ENTRE CENTROS	RADIO CIRCUNF. INTERSECCIÓN
A	3,246127	AB	2,993474	14,477754
B	2,651599	BD	2,815588	25,82529
D	2,955002	AD	3,110798	32,949196

Con estos datos obtenidos se pasa a representar la nueva burbuja introducida (D) y a hallar las películas intersección tal y como se ha explicado en el caso anterior (imagen [III\_10]).



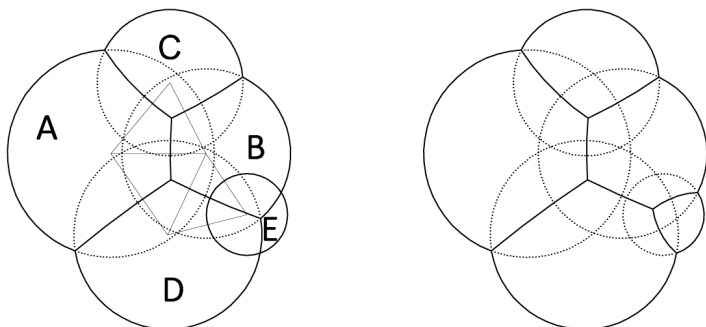
[III\_10]

Es necesario destacar que al introducir esta burbuja y hallar sus correspondientes películas intersección, se modifica la película intersección existente anteriormente entre las burbujas A y B (Rab); Esta película intersección ya no llegará hasta el perímetro del cluster sino que terminara en el punto intersección de Rab, Rbd y Rad quedando así perfectamente definida.

Se continúa introduciendo una quinta burbuja (E) y decidiendo su posición relativa respecto a las burbujas B y D. Resolviendo las correspondientes ecuaciones se hayan los siguientes valores:

IDENTIFICADOR	RADIO		DISTANCIA ENTRE CENTROS	RADIO CIRCUNF. INTERSECCIÓN
D	2,955002	DB	2,815588	25,82529
B	2,651599	BE	2,296894	2,459221
E	1,275895	DE	2,567036	2,245402

Una vez hallados los valores, se realiza la construcción geométrica (imagen [III\_11]) haciendo que la película intersección entre B y D quede perfectamente definida.

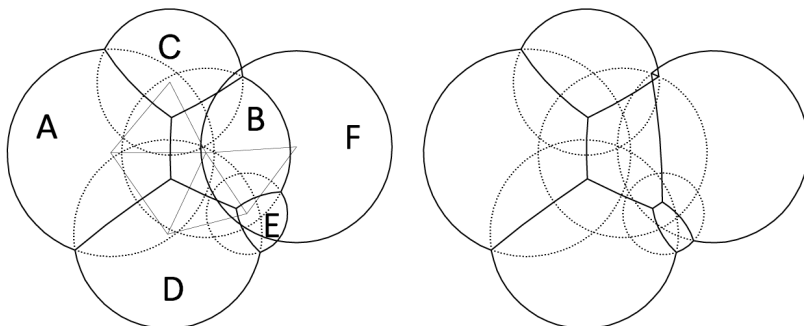


[III\_11]

La siguiente burbuja en introducir será la sexta (F) y se procede de la misma manera que anteriormente. Se decide su posición relativa respecto a B y E, se halla la solución a las ecuaciones que definen las respectivas distancias y los radios de las correspondientes películas intersección:

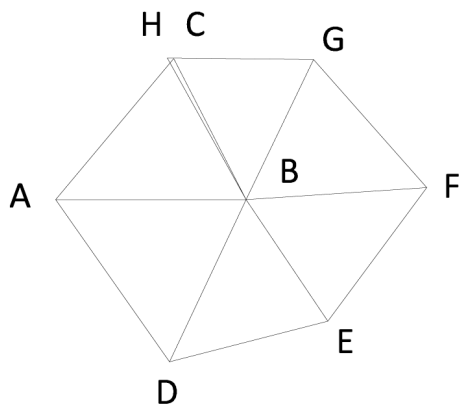
IDENTIFICADOR	RADIO		DISTANCIA ENTRE CENTROS	RADIO CIRCUNF. INTERSECCIÓN
E	1,275895	EB	2,296894	2,459221
B	2,651599	BF	2,844083	22,616448
F	3,003767	EF	2,611136	2,21804

Y se representa la construcción geométrica de la misma (imagen [III\_12]).



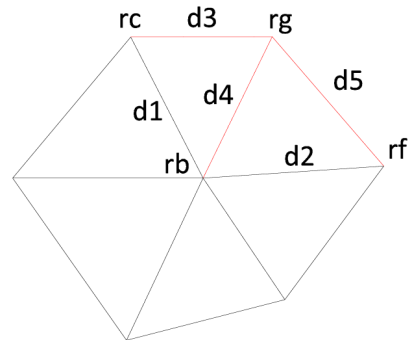
[III\_12]

Llegado este punto surge la siguiente dificultad en la construcción geométrica del algoritmo y que consiste en que si se sigue introduciendo una nueva burbuja con este método (una supuesta burbuja G con un radio elegido de la lista de radios aleatorios) y tras esta otra más (H), se empiezan a producir situaciones extrañas en la triangulación de base que se tiene (imagen [III\_13]) que consisten en que se produce la superposición de triángulos entre si.



[III\_13]

Puesto que la finalidad del algoritmo es cubrir la totalidad de una superficie con burbujas que intersecan unas con otras, se debe conseguir que la triangulación de la misma que se va produciendo simultáneamente a la colocación de las burbujas cubra la totalidad de la superficie sin dejar huecos, y al mismo tiempo los triángulos no se deberán superponer los unos a los otros. Para conseguir tal fin, se debe estudiar el lugar donde se coloca el centro de la séptima burbuja (G) para que no se produzcan las situaciones de superposición de triángulos descritas.



[III\_14]

Para calcular los valores necesarios para posicionar la pompa G es necesario realizar la construcción geométrica que puede verse en la figura (imagen [III\_14]) en la cual se tiene como datos conocidos los valores de d1 y d2, y los radios correspondientes a rc, rb, y rf. En este caso el valor de rg no se puede seleccionar aleatoriamente de la lista de radios como se ha hecho hasta ahora, ya que si se hace así solamente verificará dos de las distancias con respecto a los puntos que le rodean y es necesario que verifique tres para que la superficie quede cerrada. Por tanto a partir del montaje de partida que se ve en la figura (imagen [III\_14]) se plantean las siguientes ecuaciones para las tres distancias desconocidas que se tienen y que serán las siguientes:

$$d3^2 = Rc^2 + Rg^2 - Rc * Rg$$

$$d4^2 = Rb^2 + Rg^2 - Rb * Rg$$

$$d5^2 = Rf^2 + Rg^2 - Rf * Rg$$

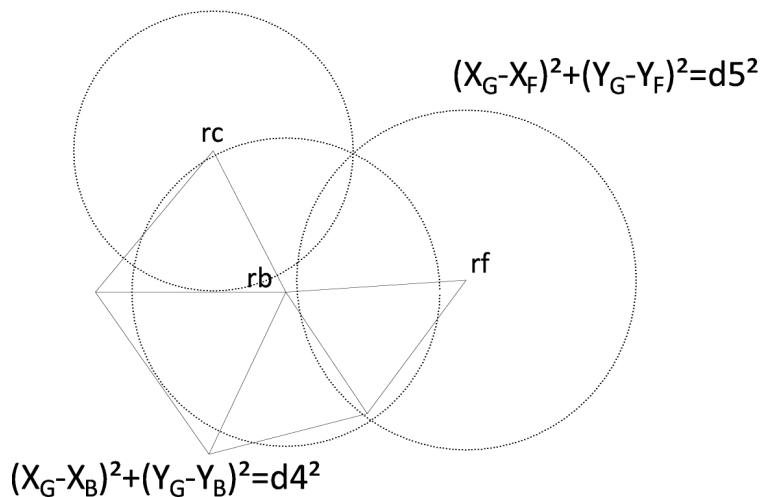
El problema que se plantea es que hay 4 incógnitas y solamente 3 ecuaciones (falta una para poderlo resolver). Esta ecuación que falta se saca de la ecuación genérica de una circunferencia centrada en un punto (x0, y0) y de radio r, particularizándola a cada uno de los puntos conocidos y con las distancias que también son conocidas según el esquema de la figura (imagen [III\_15])

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$$

Esta ecuación se escribe para tres circunferencias colocadas en C, B, y F y de radios d3, d4, y d5 respectivamente y que se cortaran en un punto el cual me definirá el centro de la nueva burbuja que se quiere colocar (imagen [III\_15]).

$$(X_G - X_C)^2 + (Y_G - Y_C)^2 = d3^2$$

$$(X_G - X_F)^2 + (Y_G - Y_F)^2 = d5^2$$



[III\_15]



$$(x_G - x_C)^2 + (y_G - y_C)^2 = d3^2$$

$$(x_G - x_B)^2 + (y_G - y_B)^2 = d4^2$$

$$(x_G - x_F)^2 + (y_G - y_F)^2 = d5^2$$

Y ahora sí que se tiene un sistema de 6 ecuaciones con 6 incógnitas que son las siguientes d3, d4, d5, XG, YG, Rg. Puesto que se tiene en todas las ecuaciones los términos dx2 despejados se pueden igualar obteniendo:

$$(x_G - x_C)^2 + (y_G - y_C)^2 = R_C^2 + R_G^2 - R_C * R_G$$

$$(x_G - x_B)^2 + (y_G - y_B)^2 = R_B^2 + R_G^2 - R_B * R_G$$

$$(x_G - x_F)^2 + (y_G - y_F)^2 = R_F^2 + R_G^2 - R_F * R_G$$

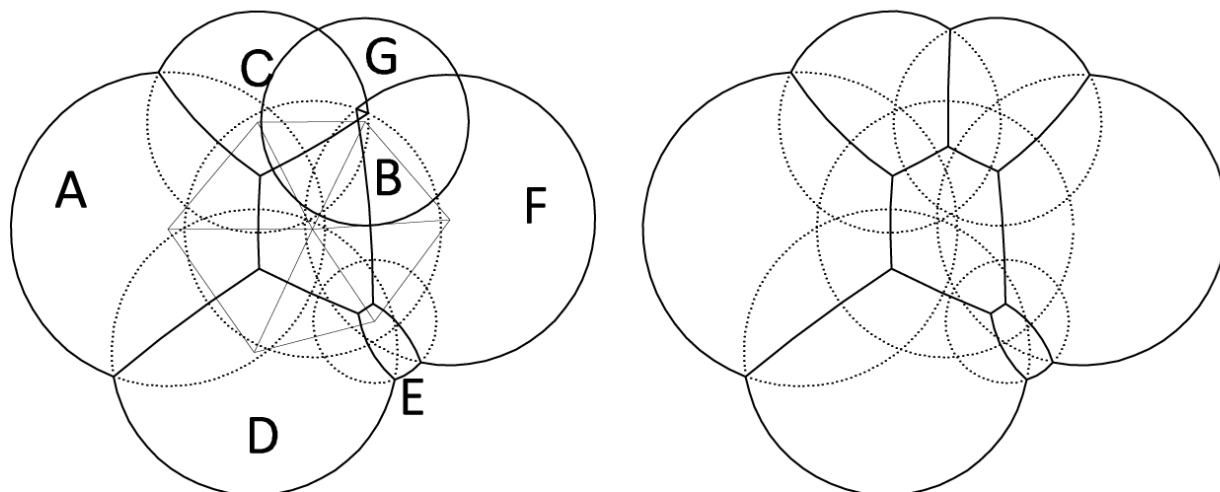
Un sistema de ecuaciones un poco complejo de resolver, que al resolverlo mediante el método de Newton Raphson da los siguientes resultados:

d3 = 2,196325  
 d4 = 2,419784  
 d5 = 2,66672  
 x<sub>G</sub> = 4,05098  
 y<sub>G</sub> = 2,176475  
 R<sub>G</sub> = 2,08877

Finalmente y tras obtener estos resultados se puede representar correctamente en su posición la circunferencia que representa a la pompa G y representar las películas intersección dos a dos con respecto de las pompas que la rodean ( C, B, F ) de la misma manera que se había procedido anteriormente (imagen [III\_16]).

IDENTIFICADOR	RADIO		DISTANCIA ENTRE CENTROS	RADIO CIRCUNF. INTERSECCIÓN
C	2,290026	CB	2,490575	16,793927
B	2,651599	BG	2,419784	9,84061
G	2,08877	CG	2,196325	23,767429

IDENTIFICADOR	RADIO		DISTANCIA ENTRE CENTROS	RADIO CIRCUNF. INTERSECCIÓN
B	2,651599	BF	2,844083	22,616448
F	3,003767	FG	2,66672	6,857048
G	2,08877	BG	2,419784	9,84061



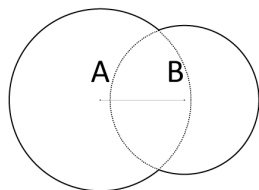


Una vez se tiene claro el proceso y el razonamiento manual a tener en cuenta para dibujar la simulación de la intersección de las pompas de jabón objeto de estudio se pasa a escribir lo que en el mundo de la informática se conoce como pseudo-código, y que no es otra cosa que un listado ordenado en lenguaje humano de las ordenes necesarias a ejecutar para conseguir la finalidad deseada.

El psudo-código quedará definido pues de la siguiente manera:

**PROCESO DE POSICIONAMIENTO DE POMPA A Y B** (imagen [IV\_1])

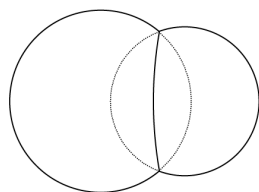
- 1.- Definir una lista con los valores de los radios de las circunferencias
- 2.- Elegir los dos primeros ítems de la lista
- 3.- Resolver las ecuaciones de Laplace-Young para esos dos ítems
- 4.- Colocar una circunferencia de radio ítem 1 en un lugar cualquiera del espacio (circunferencia A)
- 5.- Colocar una circunferencia de radio ítem 2 a una distancia determinada con respecto al centro de la anterior establecida por los resultados de las ecuaciones del apartado 3 (circunferencia B)



[IV\_1]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE A CON B** (imagen [IV\_2])

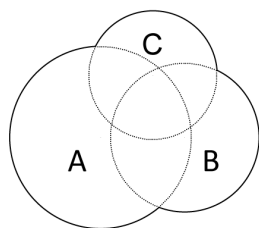
- 6.- Calcular los dos puntos intersección de ambas circunferencias (circunferencia A con B)
- 7.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 3
- 8.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 9.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio
- 10.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 3



[IV\_2]

**PROCESO INCORPORACIÓN POMPA C AL MONTAJE** (imagen [IV\_3])

- 11.- Elegir el tercero de los ítems de la lista del apartado 1
- 12.- Resolver las ecuaciones de Laplace-Young para el tercer ítem con respecto a los anteriores
- 13.- Colocar un punto en el espacio a una distancia del centro de la circunferencia A y del centro de la circunferencia B determinada por las ecuaciones del apartado 12 (circunferencia C)

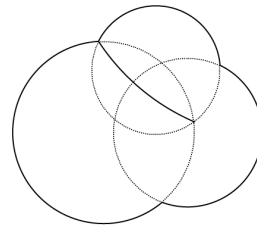


[IV\_3]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE A CON C** (imagen [IV\_4])

- 14.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia A con C)
- 15.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 12
- 16.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 17.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio

18.-Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 12



[IV\_4]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE B CON C (imagen [IV\_5])**

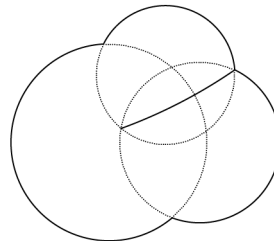
19.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia B con C)

20.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 12

21.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias

22.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio

23.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 12



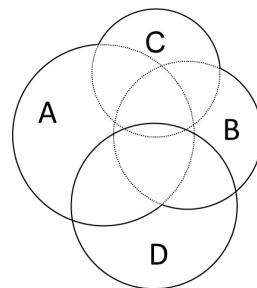
[IV\_5]

**PROCESO INCORPORACIÓN DE POMPA D AL MONTAJE (imagen [IV\_6])**

22.- Elegir el cuarto de los ítems de la lista

23.- Resolver las ecuaciones de Laplace-Young para el cuarto ítem con respecto a los ítems 1º y 2º

24.- Colocar un punto en el espacio a una distancia del centro de la circunferencia A y del centro de la circunferencia B determinada por las ecuaciones del apartado 23 y trazar la circunferencia correspondiente (circunferencia D)



[IV\_6]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE A CON D (imagen [IV\_7])**

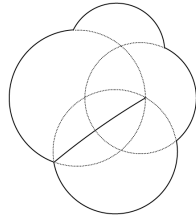
25.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia A con D)

26.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 23

27.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias

28.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio

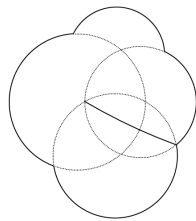
29.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias (A con D) con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 23



[IV\_7]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE B CON D** (imagen [IV\_8])

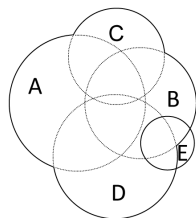
- 30.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia B con D)
- 31.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 23
- 32.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 33.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio
- 34.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias (B con D) con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 23



[IV\_8]

**PROCESO INCORPORACIÓN DE POMPA E AL MONTAJE** (imagen [IV\_9])

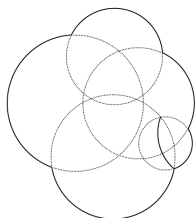
- 35.- Elegir el quinto de los ítems de la lista
- 36.- Resolver las ecuaciones de Laplace-Young para el quinto ítem con respecto a los ítems 4º y 2º
- 37.- Colocar un punto en el espacio a una distancia del centro de la circunferencia D y del centro de la circunferencia B determinada por las ecuaciones del apartado 36 y trazar la circunferencia correspondiente (circunferencia E)



[IV\_9]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE D CON E** (imagen [IV\_10])

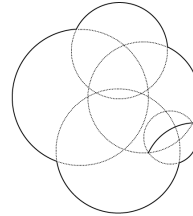
- 38.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia D con E)
- 39.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 36
- 40.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 41.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio
- 42.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias (D con E) con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 36



[IV\_10]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE B CON E (imagen [IV\_11])**

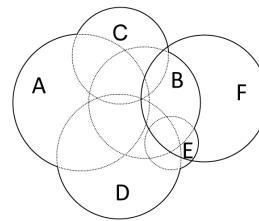
- 43.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia B con E)
- 44.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 36
- 45.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 46.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio
- 47.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias (B con E) con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 36



[IV\_11]

**PROCESO INCORPORACIÓN DE POMPA F AL MONTAJE (imagen [IV\_12])**

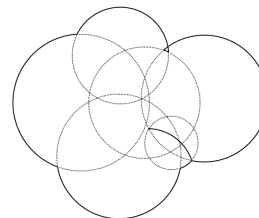
- 48.- Elegir el sexto de los ítems de la lista
- 49.- Resolver las ecuaciones de Laplace-Young para el sexto ítem con respecto a los ítems 5º y 2º
- 50.- Colocar un punto en el espacio a una distancia del centro de la circunferencia E y del centro de la circunferencia B determinada por las ecuaciones del apartado 49 y trazar la circunferencia correspondiente (circunferencia F)



[IV\_12]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE E CON F (imagen [IV\_13])**

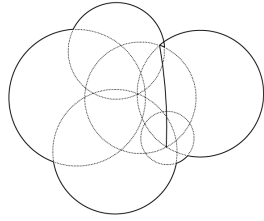
- 51.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia E con F)
- 52.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 49
- 53.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 54.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio
- 55.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias (E con F) con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 49



[IV\_13]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE B CON F (imagen [IV\_14])**

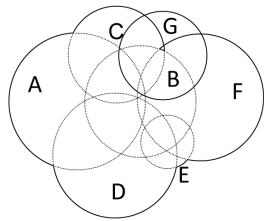
- 56.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia B con F)
- 57.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 49
- 58.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 59.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio
- 60.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias (B con F) con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 49



[IV\_14]

**PROCESO DE INCORPORACION DE POMPA G AL MONTAJE** (imagen [IV\_15])  
Llegado este punto tal y como he comentado en el apartado anterior (Explicación del método de Plateau) tengo que hacer un cambio de estrategia para poder provocar el cierre de la geometría.

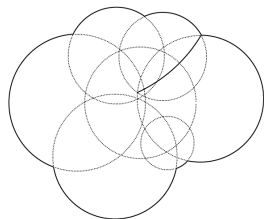
- 61.- Plantear un sistema de ecuaciones que debo resolver mediante el método de Newton Raphson para hallar el valor del radio de la nueva circunferencia (circunferencia G)
- 62.- Resolver las ecuaciones de Laplace-Young para el valor obtenido en el apartado 61 con respecto a los ítems 6º y 2º
- 63.- Colocar un punto en el espacio a una distancia del centro de la circunferencia F y del centro de la circunferencia B determinada por las ecuaciones del apartado 62 y trazar la circunferencia correspondiente (circunferencia G)



[IV\_15]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE F CON G** (imagen [IV\_16])

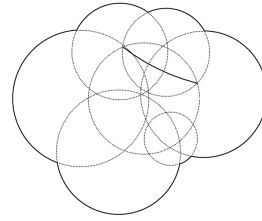
- 64.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia F con G)
- 65.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 62
- 66.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 67.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio
- 68.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias (F con G) con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 62



[IV\_16]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE B CON G** (imagen [IV\_17])

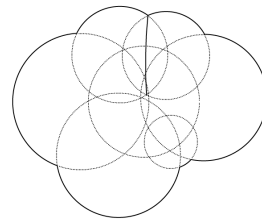
- 69.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia B con G)
- 70.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 62
- 71.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 72.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio
- 73.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias (B con G) con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 62



[IV\_17]

**PROCESO DE INTERSECCIÓN DE C CON G** (imagen [IV\_18])

- 74.- Hallar los dos puntos intersección de las circunferencias (circunferencia C con G)
- 75.- Trazar una circunferencia en cada uno de los puntos intersección con radio determinado por las soluciones de las ecuaciones del apartado 62
- 76.- Calcular las intersecciones de estas dos nuevas circunferencias
- 77.- Elegir entre las dos intersecciones la que me permite trazar la película intersección con la concavidad orientada hacia la circunferencia de menor radio
- 78.- Trazar la película intersección entre las dos primeras circunferencias (C con G) con el radio establecido por las ecuaciones del apartado 62

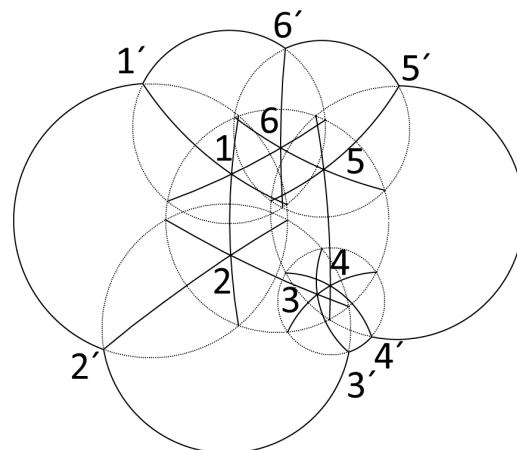


[IV\_18]

**PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS PELÍCULAS INTERSECCIÓN**

Hasta este punto quedan resueltas todas las intersecciones de las diferentes pompas que componen el cluster dos a dos (12 intersecciones en total) pero estas películas intersección son modificadas por la existencia de las vecinas, por lo tanto ahora hay que determinar los puntos de inicio y final de cada una de ellas para saber de que punto a que punto van y poderlas trazar correctamente para ello (imagen [IV\_19]):

- 79.- Se identifica la circunferencia central del cluster para poder a partir de ella saber como hay que trazar las películas intersección.
- 80.- Se identifica el punto intersección de las películas AB, AC, y BC (1)
- 81.- Se identifica el punto intersección de las películas AB, AD, y BD (2)
- 82.- Se identifica el punto intersección de las películas DB, DE, y BE (3)
- 83.- Se identifica el punto intersección de las películas EB, EF, y BF (4)
- 84.- Se identifica el punto intersección de las películas FB, FG, y BG (5)
- 85.- Se identifica el punto intersección de las películas GB, GC, y BC (6)
- 86.- Identifico el punto intersección exterior de las pompas A y C (1')
- 87.- Identifico el punto intersección exterior de las pompas A y D (2')
- 88.- Identifico el punto intersección exterior de las pompas D y E (3')
- 89.- Identifico el punto intersección exterior de las pompas E y F (4')
- 90.- Identifico el punto intersección exterior de las pompas F y G (5')
- 91.- Identifico el punto intersección exterior de las pompas G y C (6')



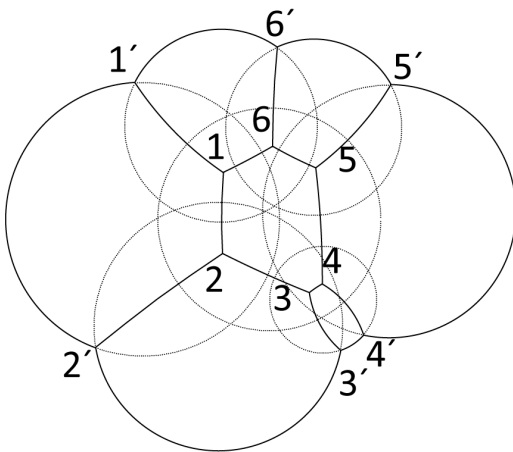
[IV\_19]



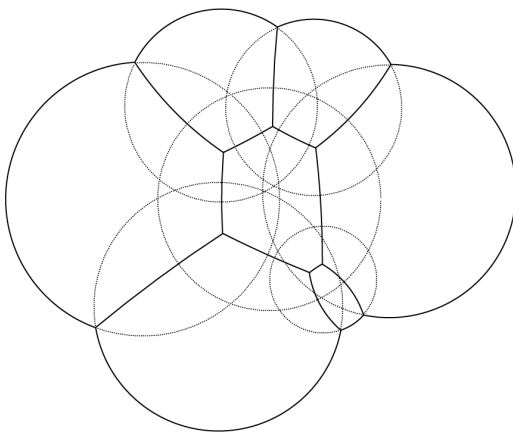
El último paso a realizar consiste en trazar de manera precisa cada una de las películas intersección desde su punto inicial a su punto final. Cabe señalar que en el caso de prolongar el algoritmo, los puntos que aquí se señalan con los identificadores X' se verán modificados por la existencia de clusters coalescentes (imágenes [IV\_20] [IV\_21]).

- 92.- Trazo la película que va de 1 a 2
- 93.- Trazo la película que va de 2 a 3
- 94.- Trazo la película que va de 3 a 4
- 95.- Trazo la película que va de 4 a 5
- 96.- Trazo la película que va de 5 a 6
- 97.- Trazo la película que va de 6 a 1
- 98.- Trazo la película que va de 1 a 1'
- 99.- Trazo la película que va de 2 a 2'
- 100.- Trazo la película que va de 3 a 3'
- 101.- Trazo la película que va de 4 a 4'
- 102.- Trazo la película que va de 5 a 5'
- 103.- Trazo la película que va de 6 a 6'

De esta manera termina el pseudo-algoritmo que permite representar el cluster de burbujas deseado. Una vez llegado a este punto el siguiente paso es hacer su traducción a grasshopper para poder automatizar el proceso y conseguir que el dibujo se realice de manera automática.



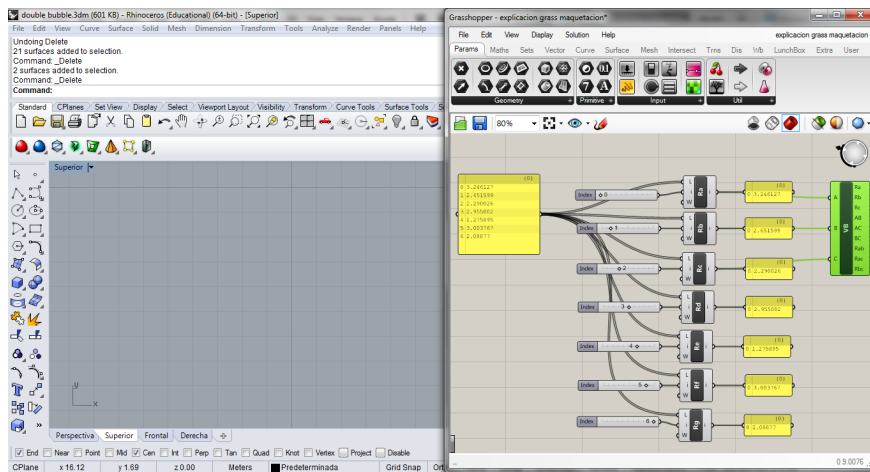
[IV\_20]



[IV\_21]

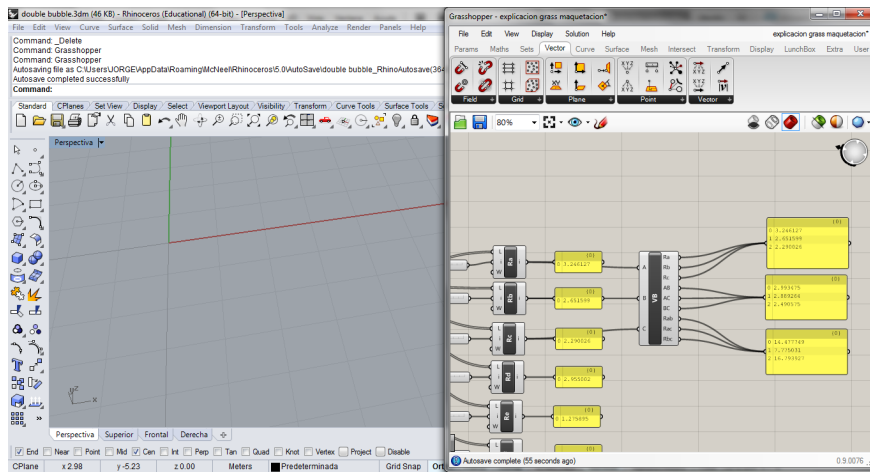


ARQUITECTURA PARAMÉTRICA Y DISEÑO PARAMÉTRICO. APLICACIÓN AL DISEÑO DE MOBILIARIO URBANO.



[V\_1]

En primer lugar se debe de colocar un componente con la lista de radios seleccionados para trabajar con ellos y a partir de estos se realiza un montaje de componentes que me permite disponer de cada uno de los datos de manera aislada (imagen [V\_1]). La potencia de Grasshopper reside precisamente en el trabajo con listas y en la gestión de cientos de datos simultáneamente, pero en este caso se realiza esta descomposición para poder hacer un primer acercamiento a la representación del algoritmo que se quiere con una simplificación de datos y sin tener que preocuparse por el momento por la gestión de los mismos.



[V\_2]

Sobre este montaje se coloca un componente denominado “Visual Basic Script” que permite programarlo internamente mediante líneas de código para que a partir de tres valores de radios de circunferencias que se le introducen como inputs devuelva como outputs los mismos valores sin modificar, la distancia entre centros dos a dos de cada una de las circunferencias, y el radio de la película intersección que se genera entre cada una de las circunferencias dos a dos (imagen [V\_2]).

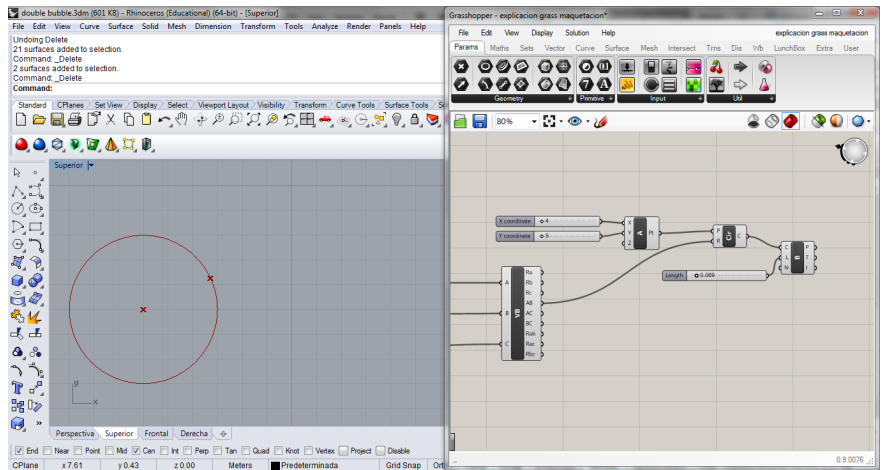
El detalle del código que lleva este componente en su interior es el siguiente:

```
Private Sub RunScript(ByVal A As Object, ByVal B As Object, ByVal C As Object,
ByRef Ra As Object, ByRef Rb As Object, ByRef Rc As Object, ByRef AB As Object,
ByRef AC As Object, ByRef BC As Object, ByRef Rab As Object, ByRef Rac As Object,
ByRef Rbc As Object)
```

```
Ra = A
Rb = B
Rc = C
```

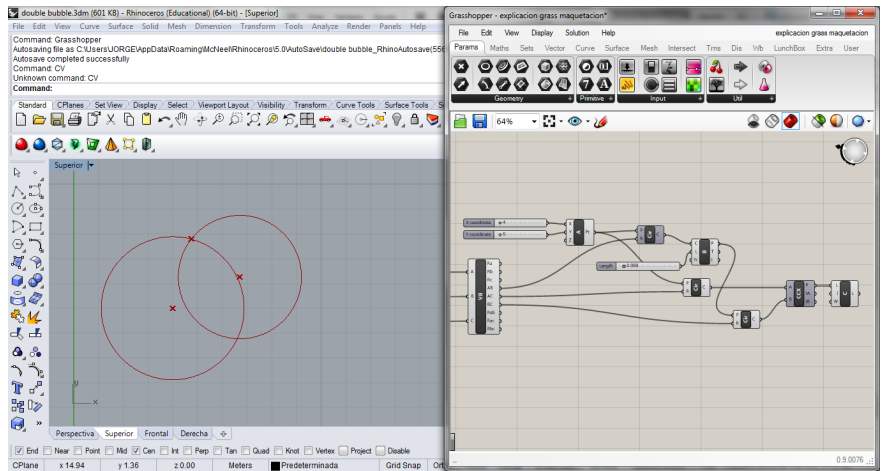
```
AB = ((Ra ^ 2) + (Rb ^ 2) - (Ra * Rb)) ^ (1 / 2)
AC = ((Ra ^ 2) + (Rc ^ 2) - (Ra * Rc)) ^ (1 / 2)
BC = ((Rb ^ 2) + (Rc ^ 2) - (Rb * Rc)) ^ (1 / 2)
```

```
Rab = (Ra * Rb) / (Ra - Rb)
Rac = (Ra * Rc) / (Ra - Rc)
Rbc = (Rb * Rc) / (Rb - Rc)
End Sub
```



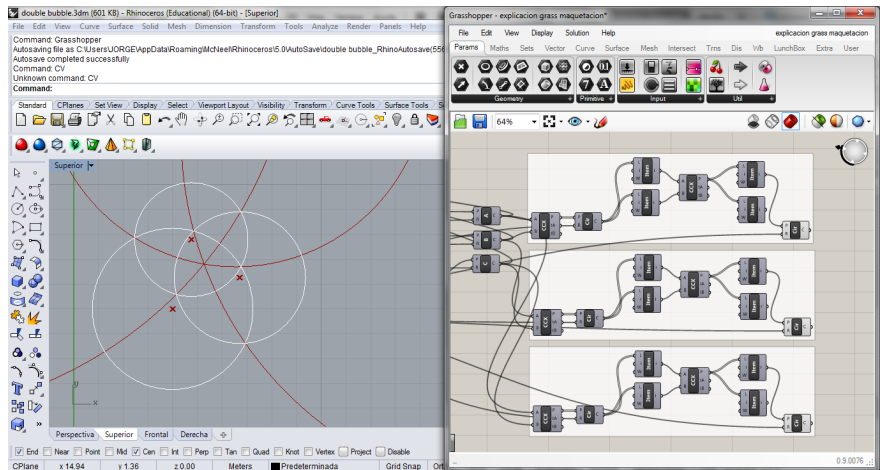
[V\_3]

Una vez que tengo todos los datos en Grasshopper los siguientes pasos consisten en colocar los componentes que generan la geometría. En primer lugar se coloca un punto (A) de coordenadas (0,0), sobre este punto se traza una circunferencia de radio AB y cualquier punto que pertenezca a esta circunferencia sirve como punto B (centro) para colocar la segunda circunferencia del montaje, que representara a la pompa B (imagen [V\_3]). Sobre los dos puntos que se tienen posicionados (A y B) se coloca una circunferencia de radio AC y BC respectivamente para calcular la posición del centro de la tercera circunferencia (C).



[V\_4]

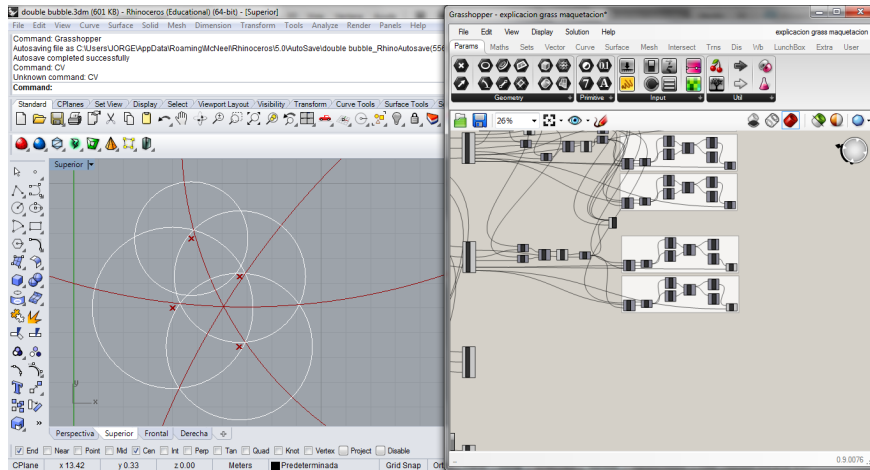
Después de colocar las circunferencias se coloca un componente que permite hallar la intersección de ambas y como se ve en la imagen (imagen [V\_4]) hay dos soluciones posibles, por lo tanto se coloca otro componente que discrimina y permite seleccionar una sola.



[V\_5]

Y una vez que se tienen los 3 centros definidos, lo que se debe hacer es colocar las circunferencias que representan las pompas de jabón en cada uno de sus centros y con su radio correspondiente (imagen [V\_5])

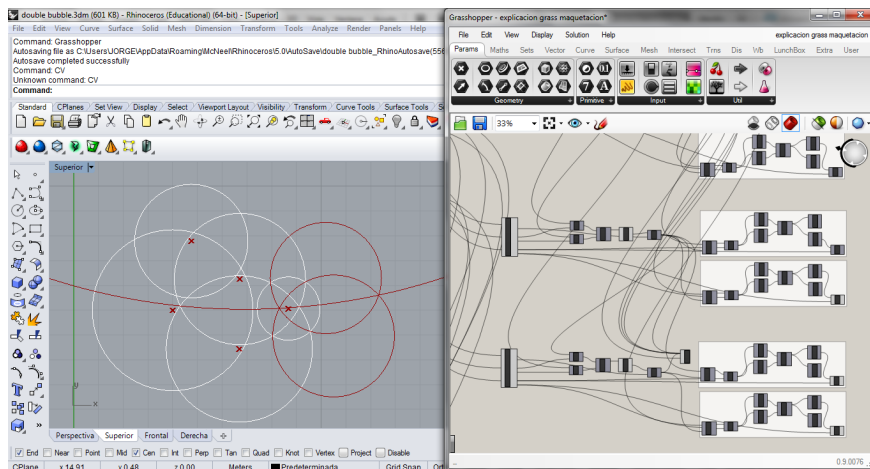
Una vez se tienen las tres circunferencias colocadas en sus correspondientes posiciones se procede a colocar una serie de componentes que permiten encontrar las películas intersección entre cada una de ellas. En primer lugar se seleccionan las pompas A y B, se coloca un componente para calcular la intersección entre ambas, y sobre estas intersecciones se dibuja una circunferencia de radio Rab. Se vuelve a intersecar estas dos circunferencias, se selecciona de las dos soluciones que salen aquella que permite dibujar la película intersección con la concavidad correcta y desde ese punto se trazo una circunferencia de radio Rab que será la película intersección. Se repite este mismo proceso para los otros dos pares de pompas AC y BC y se obtiene el resultado que se ve en la imagen (imagen [V\_6]).



[V\_6]

A partir de aquí lo que se debe hacer es repetir el proceso un número x de veces seleccionando cada vez tres radios como inputs en función de la posición en la que quiera colocar la nueva burbuja.

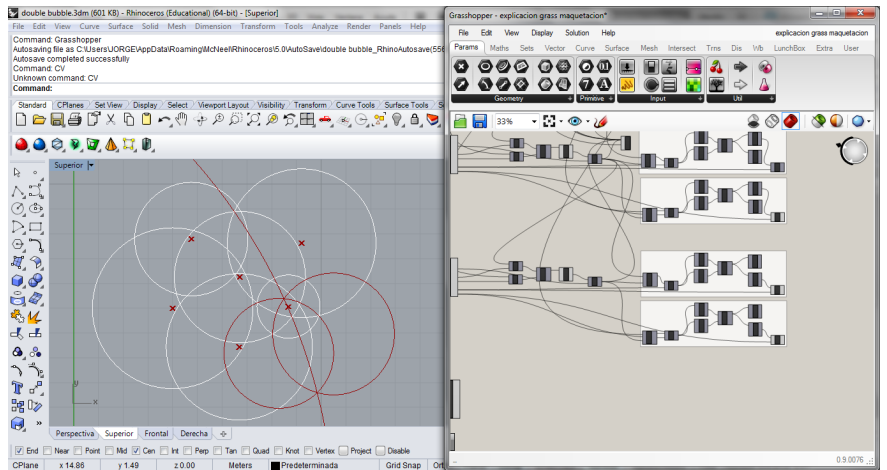
Para realizar el siguiente paso (introducir la pompa D) se debe decidir su posición relativa en el montaje. En este caso se toma la decisión de colocarla respecto a A y B de la misma forma que se ha hecho anteriormente con C, pero teniendo en cuenta que se debe elegir de los dos puntos posibles de posicionamiento el inferior, ya que se plantea el crecimiento del "cluster" de burbujas hacia la parte inferior. Una vez que esta nueva burbuja esta posicionada se vuelve a repetir el proceso para hallar las películas intersección para estas tres burbujas. La película intersección entre A y B ya está calculada anteriormente, por lo que ahora directamente se calculan las intersecciones entre A y D y entre B y D. De esta forma se obtiene la construcción geométrica que se observa en la figura (imagen [V\_6]).



[V\_7]

Para continuar el proceso se debe introducir una nueva burbuja denominada E, repitiendo el proceso en este caso para el trío de burbujas D B E y obteniendo el resultado que se observa en la figura (imagen [V\_7]).

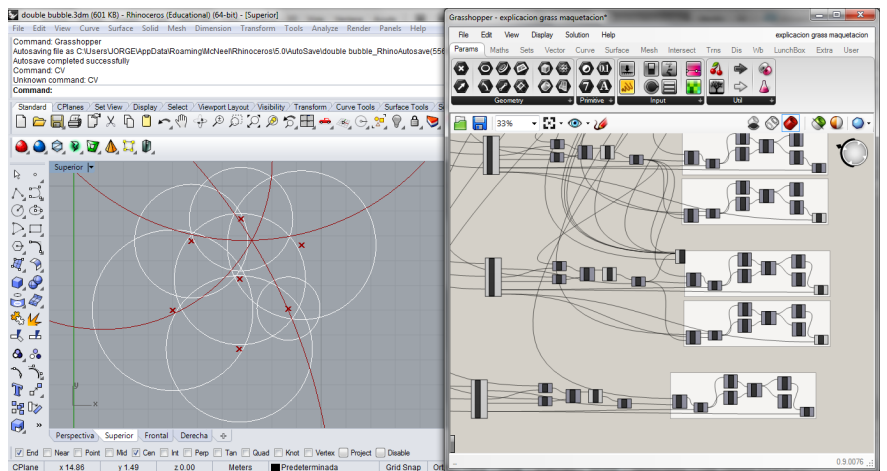
Se continua el proceso introduciendo otra nueva burbuja de radio F y repitiendo el proceso para el conjunto de burbujas E B F obteniendo el resultado que se observa en la figura (imagen [V\_8]).



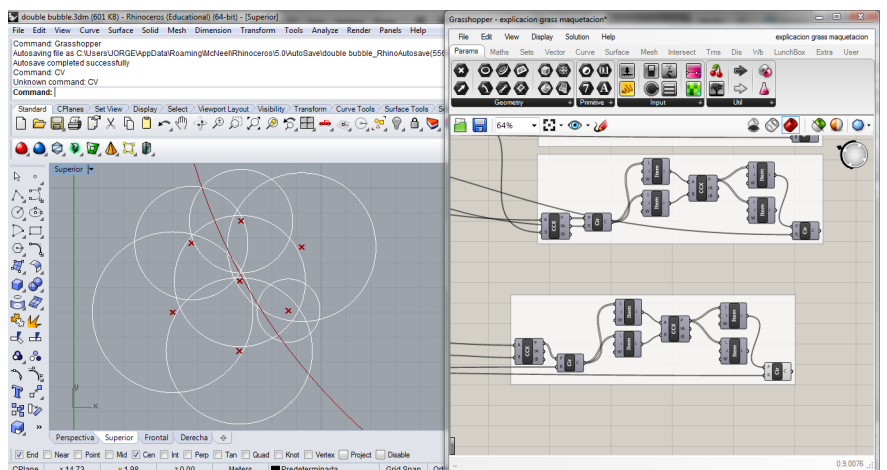
[V\_8]

Llegado este punto y al intentar colocar la siguiente pompa, la cual se identifica con la letra G, es el momento en que viene la máxima complejidad del proceso y es el punto clave en el cual este se complica el algoritmo por la cantidad de decisiones que hay que tomar y que para conseguir automatizarlo y que lo haga la computadora sola es muy complejo.

La primera decisión que se debe tomar es que esta pompa es la que va a producir el cierre del "cluster", por lo que su radio deberá de cumplir las leyes de Plateau-Laplace explicadas en el apartado 5.4 MÉTODO DE LAPLACE-PLATEAU de la memoria. Una vez hallado el valor exacto de la manera que se explica en el citado apartado se tratara de repetir el proceso explicado para las anteriores pompas, pero en este caso con el trío B F G por un lado (imagen [V\_9]) y con el trío C B G por otro (imagen [V\_10]). Un conjunto de decisiones las explicadas en este párrafo las cuales tienen una enorme dificultad de programación informática.



[V\_9]

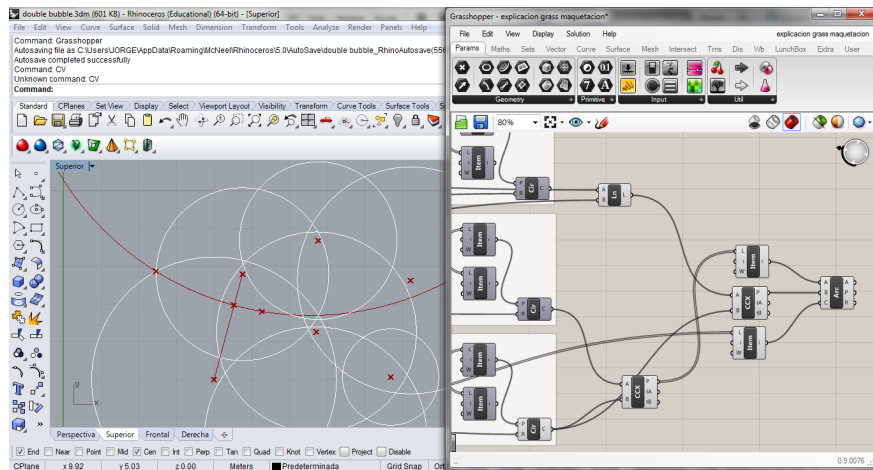


[V\_10]

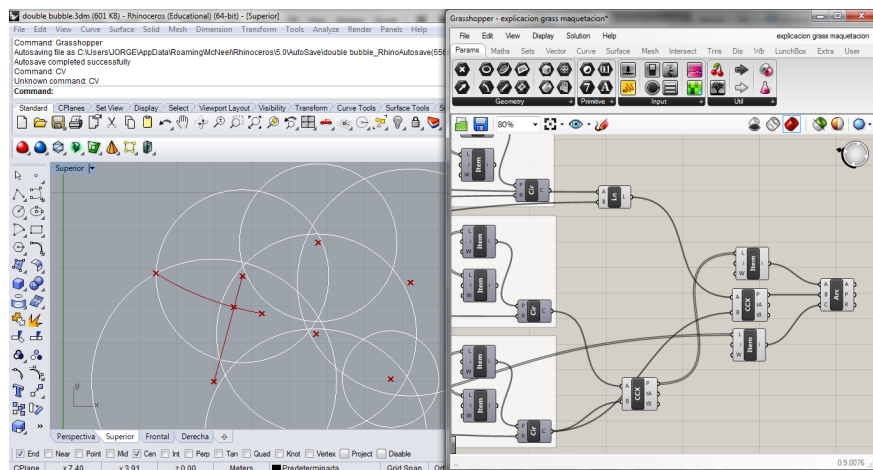
# ARQUITECTURA PARAMÉTRICA Y DISEÑO PARAMÉTRICO. APLICACIÓN AL DISEÑO DE MOBILIARIO URBANO.

Finalmente una vez resuelta la construcción geométrica es necesario colocar una serie de componentes que permiten seleccionar solo con los fragmentos de las películas intersección que interesan para poder tener una imagen del “cluster” obtenido mas clara.(imagenes [V\_11], [V\_12] y [V\_13]).

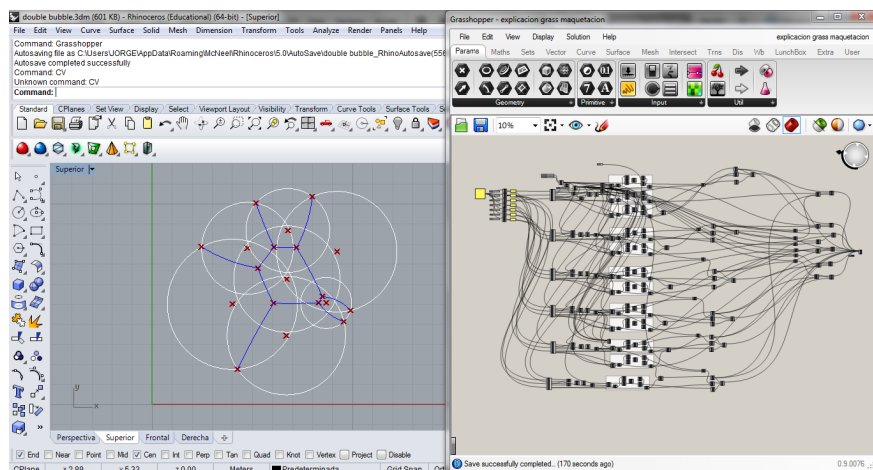
Para más detalle sobre la definición del algoritmo explicada se adjunta archivo en formato .gh que contiene la definición explicada.



[V\_11]



[V\_12]



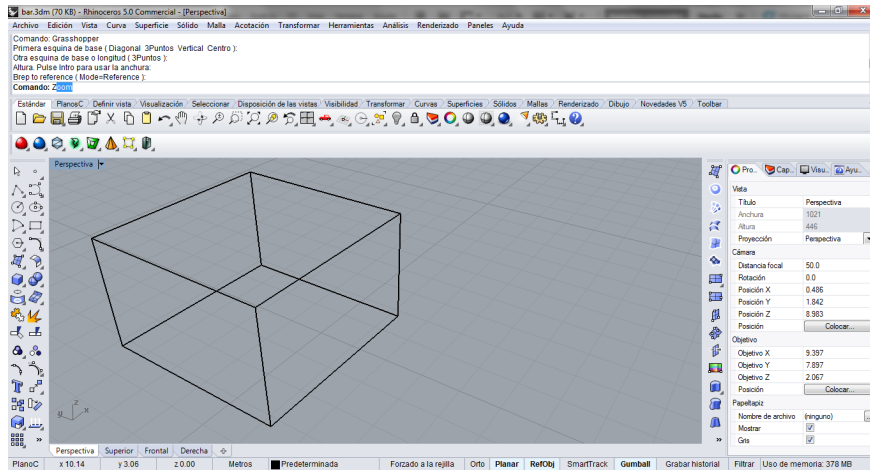
[V\_13]





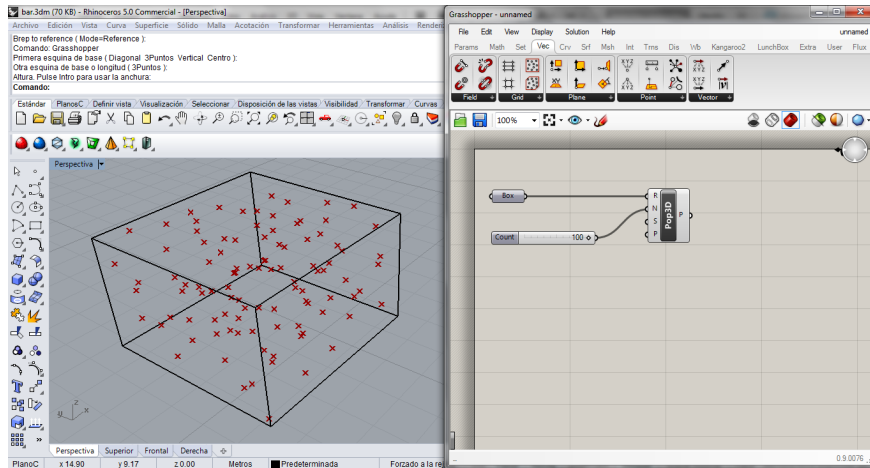
# ARQUITECTURA PARAMÉTRICA Y DISEÑO PARAMÉTRICO. APLICACIÓN AL DISEÑO DE MOBILIARIO URBANO.

Para la realización del caso practico se ha optado por partir de un volumen preestablecido con unas dimensiones de 5m x 5m en planta y de 3m de altura. Este volumen en primer lugar y para trabajar con el se debe de introducir en Rhinoceros 5.0 a través de sus herramientas de modelado básico -orden caja- (imagen [VI\_1]).



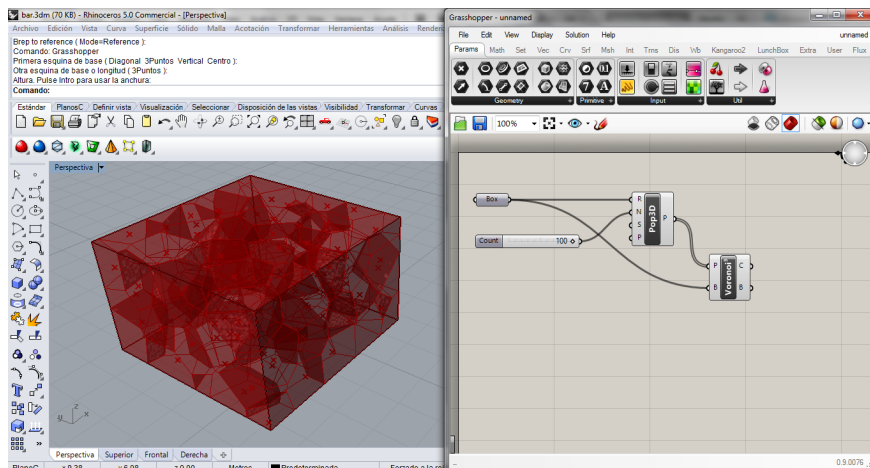
[VI\_1]

En segundo lugar para poder realizar modificaciones sobre el mismo utilizando Grasshopper se debe vincular la geometría de Rhinoceros 5.0 a un componente de Grasshopper -componente box-. La primera operación a realizar sera la de crear una población de puntos aleatorios contenidos dentro de dicho volumen y que servirán posteriormente como base para la realización de la subdivisión de la caja inicial mediante el método de Voronoi. (imagen [VI\_2])



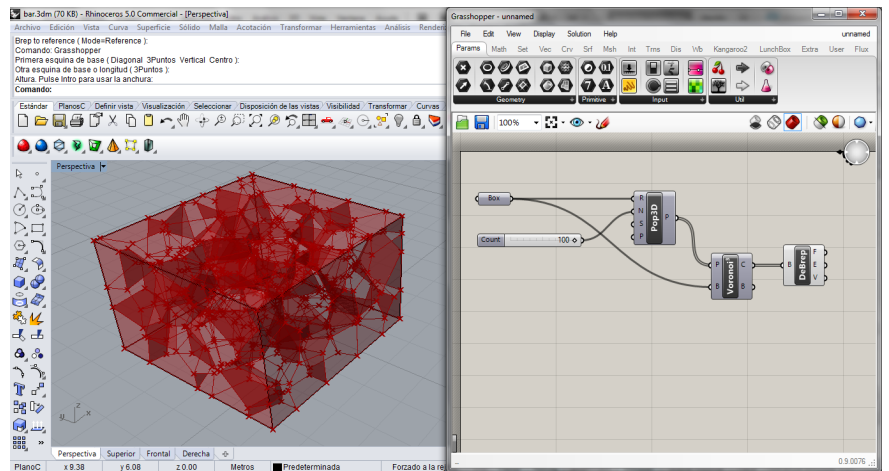
[VI\_2]

A continuación el siguiente paso es aplicar la función de Voronoi propiamente dicha sobre el paralelepípedo diseñado y con los puntos generados aleatoriamente. Para ello se hace uso del componente llamado Voronoi 3D obteniendo el resultado que se ve en la figura (imagen [VI\_3]). A nivel de datos de este componente se extrae una lista que contiene las células en las que ha quedado dividido el volumen.



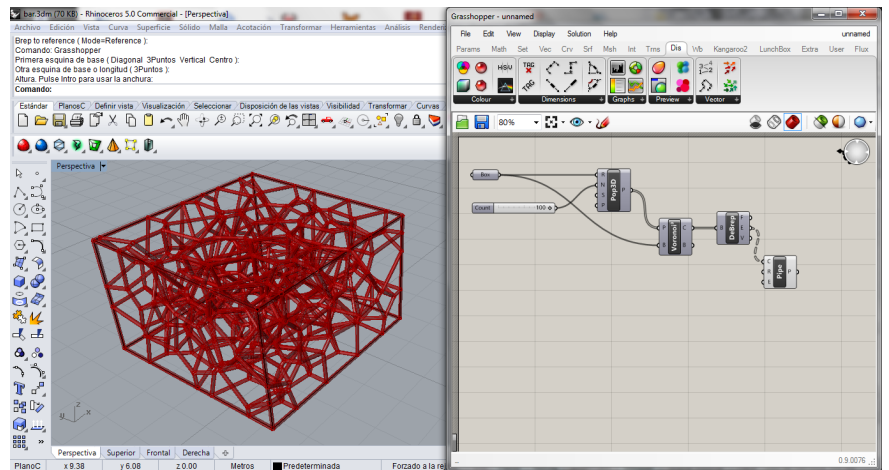
[VI\_3]

Llegado este punto lo que se debe realizar es la descomposición de esas células de tal forma que se obtenga una lista con las líneas que conforman las aristas de dichas células -componente DeconstructBeerep- (imagen [VI\_4]).



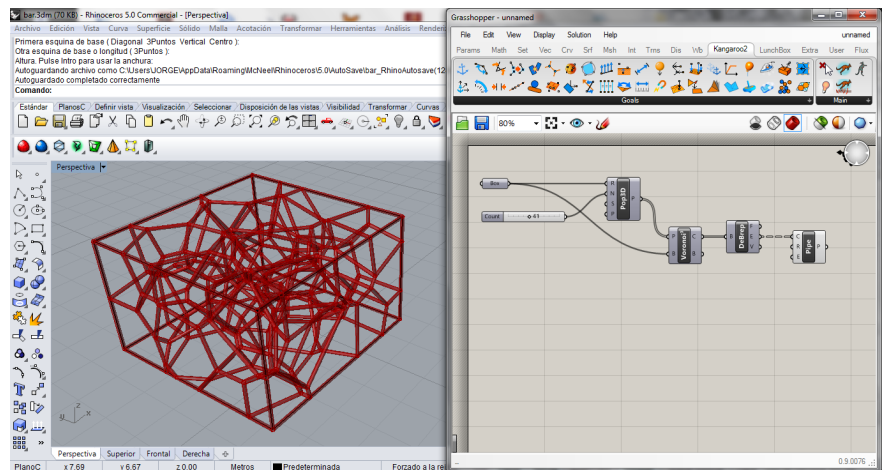
[VI\_4]

De tal forma que el siguiente paso en el proceso de consecución del diseño será el de construir unos tubos de 5 cm de diámetro a partir de las líneas que se tenían de la descomposición de las células -componente Pipe- (imagen [VI\_5]).



[VI\_5]

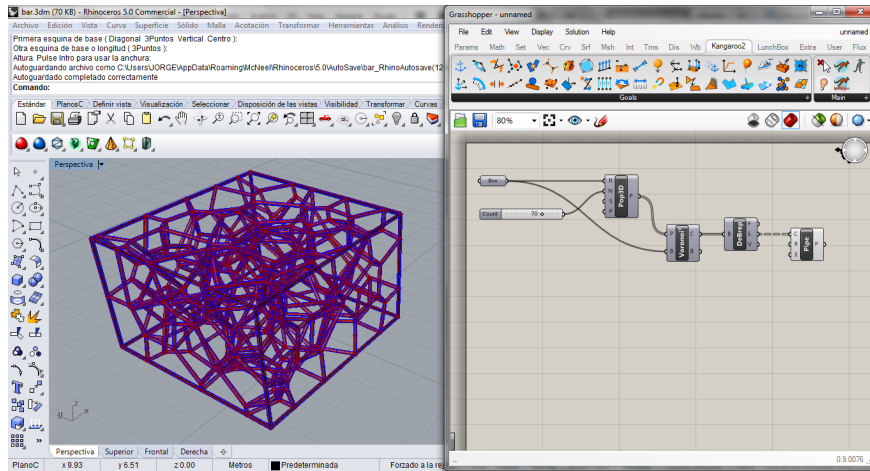
Llegado este punto cabe destacar que no se ha llegado a un diseño concreto sino que lo que se tiene en Grasshopper es un código informático que en función de unos inputs que se le introducen saca unos resultados. Prueba de ello son las figuras [VI\_5] y [VI\_6] ambas con el mismo volumen inicial pero con una variación sobre el numero de puntos que componen la población de puntos. En el caso de la imagen [VI\_5] con un valor de 100 y en el caso de la imagen [VI\_6] un valor de 41.



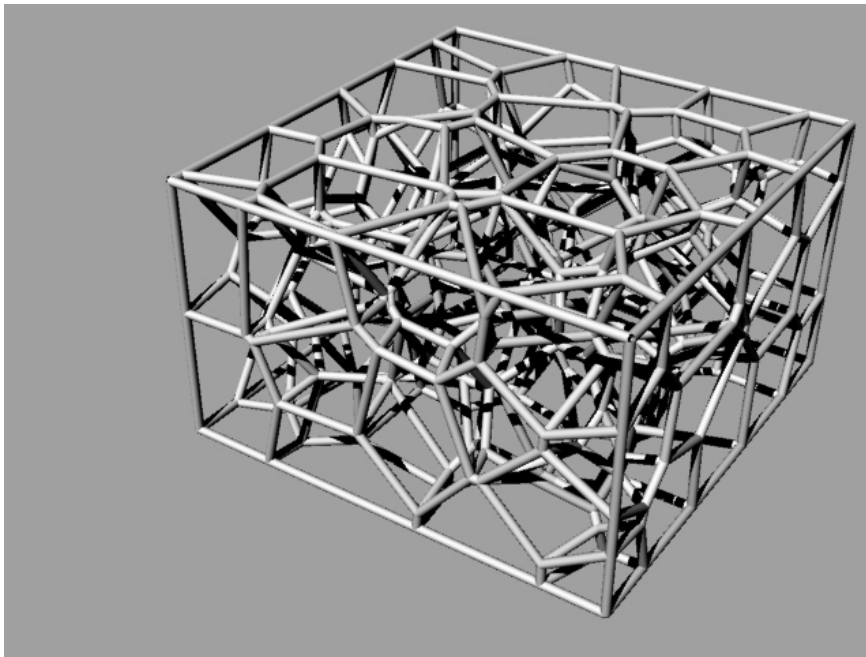
[VI\_6]

ARQUITECTURA PARAMÉTRICA Y DISEÑO PARAMÉTRICO. APLICACIÓN AL DISEÑO DE MOBILIARIO URBANO.

Finalmente el ultimo paso necesario consiste en ejecutar la orden bake de Grasshopper para que la geometría generada en esa plataforma pase a Rhinoceros y poder trabajar con ella para evolucionarla y poder llegar a realizar un proyecto de ejecución (imagen [VI\_3]) u obtener unas imágenes renderizadas del diseño realizado como la que se observa en la figura (imagen [VI\_8]).



[VI\_7]



[VI\_8]

En la imagen [VI\_8] puede verse el diseño final realizado, el cual se propone como posible pieza de arte urbano a colocar en un espacio público de cualquiera de nuestras ciudades y que se inspira en las intersecciones de las pompas de jabón.

## BIBLIOGRAFÍA

Burri, J. & Burri, M. (2012) *The New Mathematics of Architecture*  
London: Thames & Hudson

Demin D. & Turcaud S. *Packing of soap bubbles - Geometrical solutions of soap bubble clusters*. [http://www.academia.edu/11783885/Packing\\_of\\_soap\\_bubbles\\_-\\_Geometrical\\_solutions\\_of\\_soap\\_bubble\\_clusters](http://www.academia.edu/11783885/Packing_of_soap_bubbles_-_Geometrical_solutions_of_soap_bubble_clusters)

Durikovic, Roman. (2005) *Computer Animation: Animation of Soap Bubble Dynamics, Cluster Formation and Collision*. JAMSI

Epstein, D. (2012) *Lombardi Drawings of Graphs*  
*Journal of Graph Algorithms and Applications*

Epstein, D. (2012) *Planar Lombardi Drawings for Subcubic Graphs*  
*Department of Computer Science, University of California*

Epstein, D. (2012) *The Graphs of Planar Soap Bubbles*  
*Department of Computer Science, University of California*

Jabi W. (2013) *Parametric Design for Architecture*  
London: Laurence King Publishing Ltd

Khabazi Z. (2010) *Algoritmi Generativi con Grasshopper*  
Morphogenesisism

Payne A. & Issa R. (2009) *Grasshopper Primer - Spanish Ed.*  
<http://www.grasshopper.rhino3d.com>

Tedeschi, A. (2014) *ADD Parametric Strategies Using Grasshopper (2ªEd)*  
Brienza: Le Penseur Publisher

Valderrama, F. & Díaz, J. (2016) *Más allá del BIM y del cad: Del internet de las cosas al internet de las casas*. EUBIM2016 Libro de actas, 160-169

Wichiramala, W. (2002) *THE PLANAR TRIPLE BUBBLE PROBLEM*  
*University of Illinois at Urbana-Champaign*

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

## FUENTES DIGITALES

<http://www.selfassemblylab.net/FluidAssemblyFurniture.php>

<http://matter.media.mit.edu/environments/details/silk-pavillion#prettyPhoto>

<http://www.e-architect.co.uk/korea/expo-yeosu-pavilion>

[http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme\\_pavilion&parent=2#](http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme_pavilion&parent=2#)

<http://www.fablabhouse.com/>

[http://www.ted.com/talks/alastair\\_parvin\\_architecture\\_for\\_the\\_people\\_by\\_the\\_people?language=en#t-621476](http://www.ted.com/talks/alastair_parvin_architecture_for_the_people_by_the_people?language=en#t-621476)

<http://www.designbuild-network.com/projects/watercube/>

[http://www.ptw.com.au/ptw\\_project/watercube-national-swimming-centre/](http://www.ptw.com.au/ptw_project/watercube-national-swimming-centre/)

<http://www.wikipedia.com/>

## ÍNDICE DE IMÁGENES

### [MEMORIA]

- [1].- Mandelbrot Manía v3.4
- [2].- Water Cube (Vista aérea)
- [3].- Water Cube + Estadio Nacional de Pekín( Infografía aérea de conjunto)
- [4].- Watercube ( Infografía Interior)
- [5].- Water Cube ( Detalle fachada en esquina)
- [6].- Intersecciones de pompas de jabón
- [7].- Water Cube (Vista de fachada)
- [8].- Water Cube (Detalle de fachada)
- [9].- Ilustración teselado de Voronoi
- [10].- Ilustración teselado de Voronoi
- [11].- Teselado de Voronoi en Grasshopper
- [12].- Metodo de Laplace-Plateau
- [13].- Método de Laplace-Plateau (Vista final "cluster" sencillo)
- [14].- Método de Laplace-Plateau en Grasshopper
- [15].- Water Cube (Vista de Fachada)
- [16].- Método de Laplace-Plateau (Vista final "cluster" doble)
- [17].- Maqueta conceptual Watercube
- [18].- Resultado Caso Practico
- [19].- Resultado Caso Practico

[ANEXO I]

- [I\_1].- Fluid Assembly Chair (Fotogramas)
- [I\_2].- Silk Pavilion (Vista General)
- [I\_3].- Theme Pavilion (Detalle Fachada)
- [I\_4].- Fab-Lab House (Vista General)
- [I\_5].- Wiki House (Vista General Ejemplo)

[ANEXO II]

- [II\_1].- Captura de Pantalla
- [II\_2].- Captura de Pantalla
- [II\_3].- Captura de Pantalla
- [II\_4].- Captura de Pantalla
- [II\_5].- Captura de Pantalla
- [II\_6].- Captura de Pantalla
- [II\_7].- Captura de Pantalla

[ANEXO III]

- [III\_1].- Diagrama explicativo
- [III\_2].- Diagrama explicativo
- [III\_3].- Diagrama explicativo
- [III\_4].- Diagrama explicativo
- [III\_5].- Diagrama explicativo
- [III\_6].- Diagrama explicativo
- [III\_7].- Diagrama explicativo
- [III\_8].- Diagrama explicativo
- [III\_9].- Diagrama explicativo
- [III\_10].- Diagrama explicativo
- [III\_11].- Diagrama explicativo
- [III\_12].- Diagrama explicativo
- [III\_13].- Diagrama explicativo
- [III\_14].- Diagrama explicativo
- [III\_15].- Diagrama explicativo
- [III\_16].- Diagrama explicativo

[ANEXO IV]

- [IV\_1].- Diagrama explicativo
- [IV\_2].- Diagrama explicativo
- [IV\_3].- Diagrama explicativo
- [IV\_4].- Diagrama explicativo
- [IV\_5].- Diagrama explicativo
- [IV\_6].- Diagrama explicativo
- [IV\_7].- Diagrama explicativo
- [IV\_8].- Diagrama explicativo
- [IV\_9].- Diagrama explicativo
- [IV\_10].- Diagrama explicativo
- [IV\_11].- Diagrama explicativo
- [IV\_12].- Diagrama explicativo
- [IV\_13].- Diagrama explicativo
- [IV\_14].- Diagrama explicativo
- [IV\_15].- Diagrama explicativo
- [IV\_16].- Diagrama explicativo
- [IV\_17].- Diagrama explicativo
- [IV\_18].- Diagrama explicativo
- [IV\_19].- Diagrama explicativo
- [IV\_20].- Diagrama explicativo
- [IV\_21].- Diagrama explicativo

[ANEXO V]

- [V\_1].- Diagrama explicativo
- [V\_2].- Diagrama explicativo
- [V\_3].- Diagrama explicativo
- [V\_4].- Diagrama explicativo
- [V\_5].- Diagrama explicativo
- [V\_6].- Diagrama explicativo
- [V\_7].- Diagrama explicativo
- [V\_8].- Diagrama explicativo
- [V\_9].- Diagrama explicativo
- [V\_10].- Diagrama explicativo
- [V\_11].- Diagrama explicativo
- [V\_12].- Diagrama explicativo
- [V\_13].- Diagrama explicativo

[ANEXO VI]

- [VI\_1].- Captura de Pantalla
- [VI\_2].- Captura de Pantalla
- [VI\_3].- Captura de Pantalla
- [VI\_4].- Captura de Pantalla
- [VI\_5].- Captura de Pantalla
- [VI\_6].- Captura de Pantalla
- [VI\_7].- Captura de Pantalla
- [VI\_8].- Captura de Pantalla

## PROCEDENCIA DE IMÁGENES

### [MEMORIA]

- [1].- Elaboración propia
- [2].- [http://www.ptw.com.au/ptw\\_project/watercube-national-swimming-centre/](http://www.ptw.com.au/ptw_project/watercube-national-swimming-centre/)
- [3].- [http://www.ptw.com.au/ptw\\_project/watercube-national-swimming-centre/](http://www.ptw.com.au/ptw_project/watercube-national-swimming-centre/)
- [4].- [http://www.ptw.com.au/ptw\\_project/watercube-national-swimming-centre/](http://www.ptw.com.au/ptw_project/watercube-national-swimming-centre/)
- [5].- <http://www.designbuild-network.com/projects/watercube/>
- [6].- [blogmarzuca.blogspot.com](http://blogmarzuca.blogspot.com)
- [7].- <http://www.designbuild-network.com/projects/watercube/>
- [8].- <http://www.designbuild-network.com/projects/watercube/>
- [9].- [http://www.wikid.eu/7/7b/Lv\\_wiki4.png](http://www.wikid.eu/7/7b/Lv_wiki4.png)
- [10].- <http://www.mathematica.stackexchange.com/questions/61021/triangulated-mesh-from-voronoi-diagram>
- [11].- Elaboración propia
- [12].- Elaboración propia
- [13].- Elaboración propia
- [14].- Elaboración propia
- [15].- <http://www.designbuild-network.com/projects/watercube/>
- [16].- Elaboración propia
- [17].- [http://www.ptw.com.au/ptw\\_project/watercube-national-swimming-centre/](http://www.ptw.com.au/ptw_project/watercube-national-swimming-centre/)
- [18].- Elaboración propia
- [19].- Elaboración propia

[ANEXO I]

- [I\_1].- Elaboración propia
- [I\_2].- <http://matter.media.mit.edu/environments/details/silk-pavillion#prettyPhoto>
- [I\_3].- <http://www.e-architect.co.uk/korea/expo-yeosu-pavilion>
- [I\_4].- <http://www.fablabhouse.com/>
- [I\_5].- <http://www.wikihouse.cc/>

[ANEXO II]

- [II\_1].- Elaboración propia
- [II\_2].- Elaboración propia
- [II\_3].- Elaboración propia
- [II\_4].- Elaboración propia
- [II\_5].- Elaboración propia
- [II\_6].- Elaboración propia
- [II\_7].- Elaboración propia

[ANEXO III]

- [III\_1].- Elaboración propia
- [III\_2].- Elaboración propia
- [III\_3].- Elaboración propia
- [III\_4].- Elaboración propia
- [III\_5].- Elaboración propia
- [III\_6].- Elaboración propia
- [III\_7].- Elaboración propia
- [III\_8].- Elaboración propia
- [III\_9].- Elaboración propia
- [III\_10].- Elaboración propia
- [III\_11].- Elaboración propia
- [III\_12].- Elaboración propia
- [III\_13].- Elaboración propia
- [III\_14].- Elaboración propia
- [III\_15].- Elaboración propia
- [III\_16].- Elaboración propia

[ANEXO IV]

- [IV\_1].- Elaboración propia
- [IV\_2].- Elaboración propia
- [IV\_3].- Elaboración propia
- [IV\_4].- Elaboración propia
- [IV\_5].- Elaboración propia
- [IV\_6].- Elaboración propia
- [IV\_7].- Elaboración propia
- [IV\_8].- Elaboración propia
- [IV\_9].- Elaboración propia
- [IV\_10].- Elaboración propia
- [IV\_11].- Elaboración propia
- [IV\_12].- Elaboración propia
- [IV\_13].- Elaboración propia
- [IV\_14].- Elaboración propia
- [IV\_15].- Elaboración propia
- [IV\_16].- Elaboración propia
- [IV\_17].- Elaboración propia
- [IV\_18].- Elaboración propia
- [IV\_19].- Elaboración propia
- [IV\_20].- Elaboración propia
- [IV\_21].- Elaboración propia

[ANEXO V]

- [V\_1].- Elaboración propia
- [V\_2].- Elaboración propia
- [V\_3].- Elaboración propia
- [V\_4].- Elaboración propia
- [V\_5].- Elaboración propia
- [V\_6].- Elaboración propia
- [V\_7].- Elaboración propia
- [V\_8].- Elaboración propia
- [V\_9].- Elaboración propia
- [V\_10].- Elaboración propia
- [V\_11].- Elaboración propia
- [V\_12].- Elaboración propia
- [V\_13].- Elaboración propia

[ANEXO VI]

- [VI\_1].- Elaboración propia
- [VI\_2].- Elaboración propia
- [VI\_3].- Elaboración propia
- [VI\_4].- Elaboración propia
- [VI\_5].- Elaboración propia
- [VI\_6].- Elaboración propia
- [VI\_7].- Elaboración propia
- [VI\_8].- Elaboración propia