

# Restaurante los manantiales: rigor creativo hacia formas contemporáneas

Alfredo Flores Pérez\*,  
Pedro Jesús Villanueva Ramírez<sup>a</sup>, Armando Suárez Salazar<sup>a</sup>,  
Diemel Hernández Unzueta<sup>a</sup>

\*Profesor Investigador Asociado D. Depto. de Tecnología y Producción. UAM-X.  
MÉXICO D.F. – MÉXICO  
Email aflore@gmail.com

<sup>a</sup> Profesor Investigador. Depto. de Tecnología y Producción. UAM-X.

## Abstract

This paper attempts to explain the creative rigour employed by the architect Félix Candela in the majority of his projects, and specifically the Restaurant Los Manantiales. This rigour is widely associated with a type of mathematical precision that allowed to Félix Candela drive his architectural forms to new levels of experimentation and to stand out from their immediate context. Today, these forms have had considerable influence on current forms of conceiving the space for human development. These contemporary forms may appear to be free, or even capricious, however they are influenced by the same creative rigour.

**Keywords:** Paraboloide hiperbólico, parábola e hipérbola, generatriz y directriz, superficie reglada, proporción aurea, programación paramétrica.

## 1. Introducción

La riqueza formal que presenta la arquitectura contemporánea tiene una historia que ha evolucionado de manera progresiva y constante. En esta historia hay ejemplos que, si bien parecen modestos, son producto de un riguroso trabajo que combina por un lado una experimentación formal, a partir de generar interesantes desarrollos geométricos; un entendimiento de los materiales que permiten optimizar su trabajo y una gran intuición creativa. Un claro ejemplo es el restaurante Los manantiales de Félix Candela y Joaquín Álvarez Ordoñez.

En esta investigación se presenta una breve reflexión para explicar, a nivel histórico, su gran importancia en el manejo formal y material. Se presenta el análisis morfológico, es decir el análisis formal y de proporción dimensional. Se desarrolla también el análisis de proporción dimensional, el cual resulta muy coherente con las teorías de proporcionalidad tradicional. Posteriormente se hace el análisis geométrico de las curvas que definen la silueta de la bóveda de arista así como su construcción tridimensional mediante superficie reglada. Por último se analiza la manera de obtener la forma geométrica de la bóveda de arista octagonal a partir de 4 hipars intersectados lo cual se realiza mediante dos métodos diferentes: El primero se basa en el proceso geométrico que, se infiere, es el que empleó el Arq. Candela. El segundo se basa en programación paramétrica. Este método permite mostrar que el desarrollo geométrico tiene una complejidad que esta adelantada a su tiempo. Para finalizar se muestran algunos ejemplos que se pueden considerar herederos de esta forma de trabajo que es compleja y muy interesante en la búsqueda de la riqueza espacial contemporánea.

## 2. El espacio contemporáneo

El desarrollo contemporáneo del espacio arquitectónico presenta una gran riqueza formal gracias a una serie de conocimientos acumulados. Estas nuevas formas buscan expresar intensas búsquedas teóricas, metodológicas, históricas, sociales, técnicas, tecnológicas y conceptuales. Es decir, tratan de expresar nuevas formas de concebir y crear espacio arquitectónico para el desarrollo humano en este complejo momento de la historia y también para las propuestas a futuro, donde se prevén importantes cambios.

En la actualidad se busca integrar un mayor número de variables para desarrollar un diseño arquitectónico mucho más completo y más orgánico. Esta concepción orgánica va ligada a un rigor técnico y tecnológico. Conceptos tales como diseño morfogenético, se plantean para expresar que el espacio determinado por el hábitat

humano debe buscar la integración con lo orgánico y crear así un ecosistema mucho más equilibrado. Existen muchos ejemplos que reflejan estas preocupaciones, las cuales afectan la concepción formal y que sin embargo van más allá, para concebir un ambiente acorde con el modo de vida que se prevé hacia el futuro.

La obra de Candela se ubica en una búsqueda que abrió las posibilidades de reflexión sobre la optimización de materiales a partir de la forma y cómo esta optimización formal trae consigo interesantes resultados a nivel estructural, lo que permite al mismo tiempo nuevas experimentaciones. Otra cuestión a recalcar es que combina un rigor geométrico matemático, con un acercamiento a formas orgánicas, lo cual ha empujado al espacio a la riqueza que presenta actualmente. En el caso específico de Los manantiales se puede considerar como paradigmático dentro del desarrollo de sus propuestas, representó un manejo del espacio adelantado a su época.

Un autor que está aportando grandes ideas y soluciones en la arquitectura actual es el ingeniero Cecil Balmond quien ha transmitido sus experiencias como ingeniero innovador en algunos textos; justo uno de sus textos también podrían servir como referencia para explicar lo que Candela desarrolló e innovó en el restaurante:

Lo informal no es lo aleatorio ni arbitrario, sino que se basa en la superposición para poner de manifiesto series de certezas cambiantes. Su lógica es contingente respecto de las condiciones iniciales. El caos es considerado como una sucesión de órdenes, bastante diferentes de la idea que tenemos de "atrapar" lo arbitrario y llamarlo "orden".

Las vueltas que de una cinta de Moebius hacia adentro y hacia afuera son informales. Una cubierta que se convierte en una pared o en el suelo, un suelo que es una piel, donde el límite no significa línea de margen. (Balmond, Cecil; [1])

Al analizar el espacio que construyó Candela para Los Manantiales, es posible reconocer algunos de estos conceptos de manera clara. En su aparente simpleza se puede apreciar la riqueza formal que servirá como referencia para futuras experimentaciones.

### 3. El análisis. Contexto histórico explicación general

El Restaurante Los Manantiales se puede considerar la obra arquitectónica más emblemática del Arq. Félix Candela (en colaboración con Joaquín Álvarez Ordóñez), ubicada en el embarcadero de Nativitas de Xochimilco, al sur de la Ciudad de México, construida en 1958. Esta obra es la culminación de una serie de experimentaciones que inician con el pabellón de rayos cósmicos de 1951, en cuya cubierta se presentaba lo que sería característico en su obra y que desarrollaría y refinaría en las siguientes obras hasta llegar a Los manantiales en 1958. Nos referimos específicamente al paraboloides hiperbólico ó hypar que, gracias a la doble curvatura, permite una gama de variables nuevas y diferentes en la definición espacial, estructural y constructiva, además de la optimización del material que juega un papel importante en la eficiencia estructural gracias al binomio forma-material. Estas formas son el resultado de las experimentaciones con el material, pero sobre todo, fue el inicio de una experimentación más profunda, la configuración morfológica. Si bien esta búsqueda fue empírica, al mismo tiempo fue rigurosa y sistemática.

En el contexto histórico la gran aportación de la obra de Félix Candela, está enmarcada dentro de una tradición y de un grupo de personajes que experimentaron en una serie de edificaciones donde lograron empujar la capacidad del concreto para crear estructuras de grandes claros. Algunos de ellos son: Eugene Freyssinet, Eduardo Torroja, Robert Maillart, Nicolas Esquillan ó Pier Luigi Nervi. En comparación, el restaurante Los manantiales se ve como algo modesto. La diferencia se presenta con las formas con que trabajaron estos autores: bóvedas de curvatura simple, cúpulas y arcos, herencia que ha estado presente desde hace mucho tiempo. En este sentido Candela lleva esta tradición a otro nivel.

Por otro lado la construcción del restaurante ha sido reconocida como una gran influencia para las siguientes generaciones tal como lo explica David P. Billington (Billington [2]) "... la cubierta, con su espesor de 4 centímetros, es la estructura entera. Estructura y forma son una, y la esbeltez es expresada tan poderosamente que resulta difícil creer que la construcción es de hormigón. .... Además, es realmente original y obviamente un divertimento constructivo... Su influencia en la siguiente generación de artistas estructurales ha sido profunda."

El resultado del diseño de la cubierta fue un cascarón de concreto armado tipo bóveda de arista de ocho gajos idénticos compuesta por la intersección de cuatro hypars que cubre una planta octogonal. El restaurante se diseñó para albergar un gran salón formado por una planta octagonal de 745.58 m<sup>2</sup> inscrita en un círculo de 30 metros de diámetro. Dicho salón presenta la cubierta conformada por la bóveda extendiéndose 42.3 metros en su longitud mayor.

#### 4. Geometría de la planta arquitectónica y de la cubierta

A continuación se presenta el análisis morfológico, es decir el análisis formal y de proporción dimensional que permite explicar cómo se transforma la forma de geometría simple hasta llegar a la complejidad final.

El proceso que se sigue para la configuración geométrica de la planta es bastante simple: 1.Trazo de un círculo de 30 m de diámetro, 2.Trazo de un octágono inscrito en el círculo, 3.Trazo de un cuadrado de 30 x 30 m, circunscrito en el círculo, 4.Copia, en giro de 45°, del cuadrado circunscrito.

Respecto a la bóveda de arista, cada uno de los ocho gajos que la conforman, están girados 45° respecto al eje horizontal de la planta, tienen un ancho de 12.43 m en sus apoyos y de 21.15 m, desde el inicio de su desarrollo hasta el punto medio de la parábola inclinada (longitud media del cuadrado en sus esquinas). Su altura, en su centro es de 5.8396 m, mientras que en los puntos más altos alcanza los 9.9332 m.

#### 5. Análisis de proporción dimensional del restaurante los manantiales

En el trinomio espacio-forma-estructura interactúan elementos que dan sentido estético, estático y funcional al diseño arquitectónico. Dentro de esto, los principios compositivos juegan un papel primordial desde el aspecto de la plástica-formal. De acuerdo a Villagrán García (Villagrán[5]) estas calidades plásticas formales han sido un medio importante y necesario para hacer de los espacios un objeto arquitectónico estético. Este autor clasifica estas calidades como: mórfica o figura, métrica o dimensión, cromática o color y háptica o táctil (Villagrán[5]). En este caso el análisis de los principios compositivos está dirigido a enunciar las características implícitas en la unidad básica del trinomio espacio-forma-estructura del restaurante, que sirven como punto de partida o, de las intenciones formales que en su momento buscó el Arq. Candela y sus colaboradores.

Respecto al perfil resultante de los volúmenes que definen el espacio arquitectónico del restaurante es por definición mixta. El perfil de la planta arquitectónica se generó a partir de las figuras básicas: círculo, octágono y dos cuadrados. El perfil de la cubierta, está compuesto por líneas diagonales que giran alrededor de un punto en su eje central y se unen en su otro extremo, mediante curvas parabólicas (cóncavas y convexas), producto de una substracción volumétrica del hyper de borde recto, tal como se explica mas adelante. El plano elevado curvo que se genera de la superficie alabeada, unifica jerárquicamente los espacios interiores del restaurante a partir de su eje central, propiciando una focalidad en el sentido de sus curvas directrices, dando como resultado una expresión dinámica. En cuanto a los principios de ordenamiento la cubierta, tanto en su planta como en su alzado, es una figura simétrica y axial (tanto geométrica como estructural), permitiendo, mediante una repetición radial, una organización formal-espacial a partir de sus ejes ortogonales (x e y).

En todo el desarrollo geométrico de la cubierta se presenta proporción áurea. En la planta se tiene una proporción áurea de sección cuadrada, mientras que en su alzado, se tiene una proporción áurea de configuración cuadrada en su parte media, mientras que en sus extremos se obtienen secciones áureas de rectángulo horizontal.

#### 6. Desarrollo del modelado tridimensional de la Cubierta (intradós)

Se describen dos métodos que permiten definir el desarrollo geométrico de la cubierta

**6.1 Método 1.** Este método, considerado como el que empleó el Arq. Félix Candela, consiste en 2 hypars unidos en su punto central obtenidos de cinco planos de corte de un paraboloide hiperbólico de borde recto: Un plano de corte en el plano horizontal a nivel cero, dos planos de corte diagonales que se intersectan, en el extremo superior, con el vértice medio del borde libre (misma que coincide, en planta, con la esquina del cuadrado girado a 45°) y en el otro extremo con el vértice del octágono (apoyos de la cubierta a nivel cero). Los otros dos planos de corte cruzan de forma diagonal el nuevo paraboloide hiperbólico intersectando sus respectivos vértices con los vértices del octágono (apoyos)

El hyper de borde recto se obtuvo con la ecuación matemática  $z=kxy\text{sen}(\omega)$ , donde k es una constante que representa el alabeo unitario (cambio unitario de pendiente) del hyper [ $k=AA'/(OB*OH*\text{sen}(\omega))$ ]. Los ejes x

e y sólo serán perpendiculares cuando  $a = b$ , en ese caso  $\omega$  será igual a  $90^\circ$ .

Otra manera de obtener el hyper de borde recto es a través de los puntos medios de un paraboloid

hiperbólico del tipo silla de montar cuya ecuación matemática genérica es:  $\frac{y^2}{b^2} - \frac{x^2}{a^2} - z = 0$

Si se considera que los parámetros  $a=b=1$ , la ecuación, en el origen  $(0,0,0)$  se reduce a  $z = x^2 - y^2$

Convirtiendo esta ecuación explícita en paramétrica e incluyendo los parámetros de longitud, ancho y alto del hyper, la ecuación obtenida para el paraboloid hiperbólico que define la bóveda de arista del restaurante los manantiales es  $1.8017(v^2 - u^2)$

**6.2 Método 2.** Mediante el empleo de programación paramétrica y algoritmos generativos es posible, de manera dinámica y en tiempo real, abordar diversas soluciones en la búsqueda de forma geométrica, en este caso de tipo anticlásticas, así como de nuevas formas que surgen de éstas.

La herramienta digital que se utilizó como editor de programación visual es el plug-in Grasshopper el cual está estrechamente integrado con el modelado del software Rhino. Su principal virtud es que permite diseñar algoritmos que operan con datos y geometría obtenidos a partir de comandos y funciones del propio Rhino. Para la geometría del restaurante los manantiales se tomó la rutina 'candelacurves.ghx' diseñada por Pieter Segeren (Segeren [4]), se modificó de acuerdo a los propios requerimientos formales de esta investigación, dando como resultado la rutina Formas\_candela.ghx, El resultado es la geometría 3D de la silueta que define los bordes de la cubierta de los ocho gajos de la bóveda arista. (figura 1).

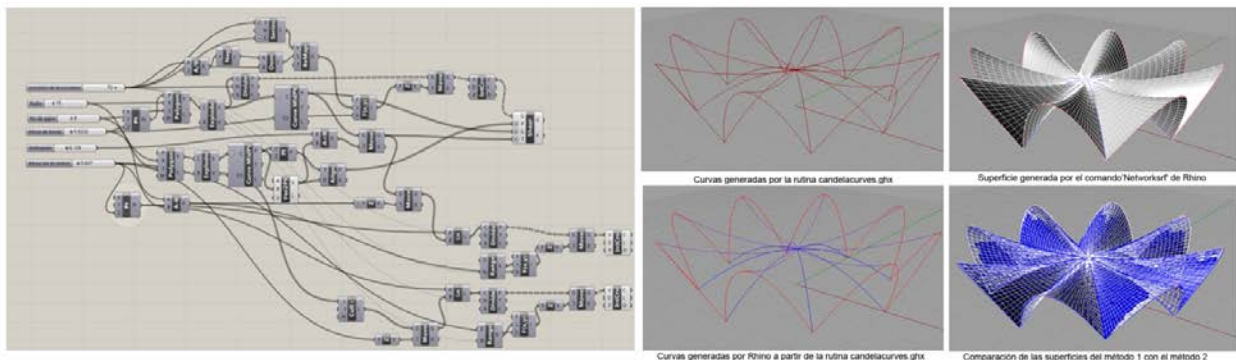


Figura 1. Rutina de Grasshopper candelacurves.ghx modificada, proceso de creación de la cubierta con la rutina y comparativa con el modelo 3D obtenido del método 1

## 7. Análisis geométrico de uno de los gajos de la bóveda de arista

Un paraboloid hiperbólico se puede generar de dos maneras: La primera cómo superficie reglada, trasladando las generatrices recta sobre las dos directrices curvas.

La segunda es trasladando una parábola, generatriz, a lo largo de una segunda parábola, directriz. Las dos parábolas situadas en planos perpendiculares entre sí y tienen la concavidad en sentidos contrarios.

Cortando un paraboloid hiperbólico por un plano vertical paralelo al plano OXZ, se obtiene una parábola convexa (cóncava hacia arriba), sí se corta por un plano vertical paralelo al plano OYZ, se obtiene una parábola cóncava. Cortando el paraboloid hiperbólico por un plano horizontal (paralelo al plano OXY) se obtiene una hipérbola.

Generatrices y curvas directrices

Tomando como referencia la definición de las generatrices del hyper de borde recto que forman un ángulo de  $24^\circ$  entre ellas (líneas 0-4-6, 0-5-7, 1-2-4 y 1-3-5), mismas que son paralelas a cada uno de sus planos directores verticales, se obtienen ecuaciones matemáticas de las curvas directrices (parábolas e hipérbola) proyectadas en sus respectivos planos directores. Para ello, primero es necesario localizar los puntos de intersección entre las generatrices y sus respectivas directrices de la superficie alabeada analizada.

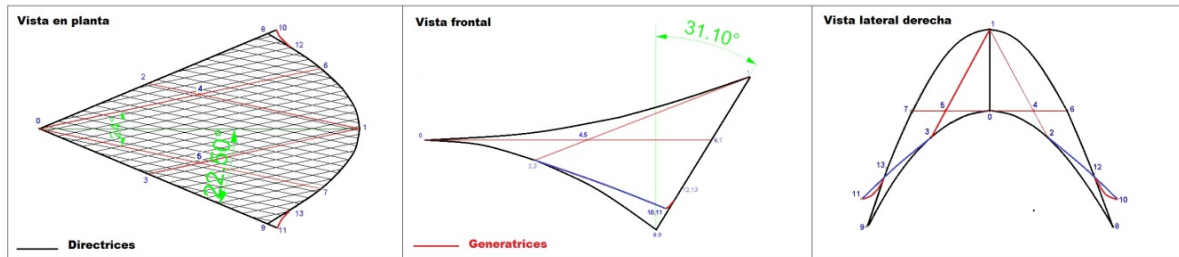


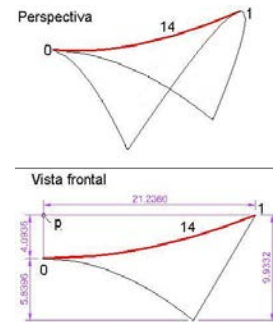
Figura 2. Líneas Generatrices y curvas directrices de la silueta que generan la superficie alabeada

Como se puede observar en la figura 2, la curva 0-1 representa la parábola convexa que pasa por el eje x del gajo analizado y que trabaja a tracción. Las curvas 0-2-8 y 0-3-9, representan las parábolas que coinciden con los apoyos y el vértice central y que trabajan a compresión. La curva 9-13-7-1-6-12-8 representa la parábola diagonal a 58.9° con respecto al plano horizontal, que define el borde libre de la cubierta. La curva 8-14-9 representa la parábola arqueada por plano vertical entre los apoyos, misma que trabaja como un arco triarticulado. Las líneas 2-4-1 y 3-5-1, son la generatrices del hyper que pasan por los extremos del gajo analizado y se intersectan con las curvas directrices. También se puede observar que las curvas 10-12 y 11-13, tangenciales a la curva del borde recto, son las que, en una óptica desde el exterior (trasdós), dan la apariencia de continuidad al cascarón de concreto armado.

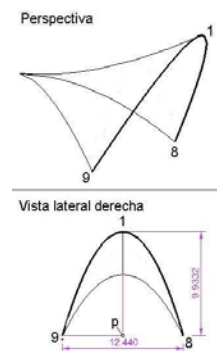
**7.1 Ecuaciones matemáticas de las directrices proyectadas para la construcción de la superficie alabeada (reglada de doble curvatura)**

Del análisis anterior se deducen ecuaciones matemáticas de las curvas directrices proyectadas en sus respectivos planos directores: La parábola convexa 0-14-1 curvada por el eje del gajo de la bóveda de arista proyectada en el plano frontal, una de las parábolas que conecta con los apoyos y el vértice del origen (0-9) cuyo plano vertical esta a 22.5° con respecto al eje horizontal en su plano OXY (vista en planta) y la parábola vertical (8-1-9) que definen el borde libre de la cubierta con una inclinación de 58.9° con respecto al eje y, en su plano OXZ.

Parábola convexa curvada por el eje del gajo de la bóveda de arista, vista frontal						
$x^2=4az; a=27.540; x^2=110.161z$						
No.	z	a	4a	4az	$x=\sqrt{4az}$	x,y,z
1	0	27.540	110.161	0.000	0.000	0,0,0
2	0.25	27.540	110.161	27.540	5.248	5.248,0,0.25
3	0.5	27.540	110.161	55.081	7.422	7.422,0,0.5
:	:	:	:	:	:	:
8	4.09363	27.540	110.161	450.959	21.236	21.236,0,4.09363



Parábola cóncava vertical en vista lateral derecha, girada 58.9° con respecto al eje horizontal del plano OXZ y origen diferente de cero en el eje z								
$y^2=-4^a(z-k); a=0.9737, k=4.09363; y^2=3.895(z-k)$								
No	z	a	4^a	k	(z-k)	$4^a(z-k)$	$-y=\sqrt{4^a(z-k)}$	x,y,z
8	4.0936	0.9737	3.895	4.0936	0	0.000	0.000	21.236,0,0,4.093
9	4	0.9737	3.895	4.0936	-0.093	0.365	-0.603	21.177,-0.603,4,0
:	:	:	:	:	:	:	:	:
21	-5.839	0.9737	3.895	4.0936	-9.933	38.68	-6.220	15.0,-6.22,-5,839





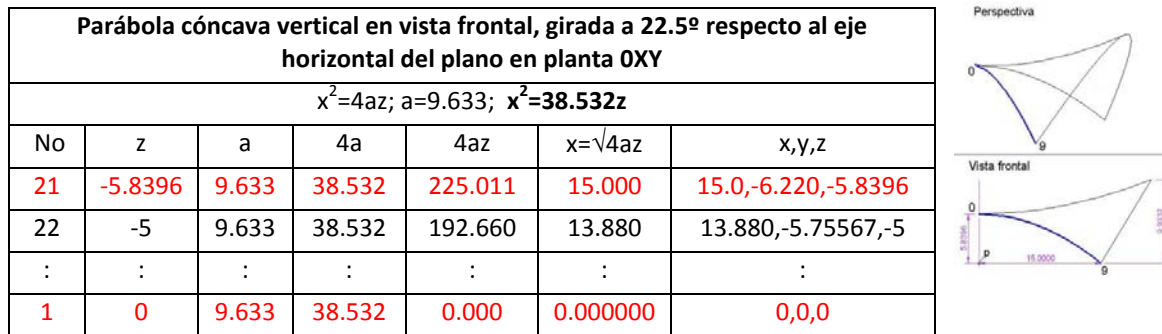


Figura 3. Tablas que muestran los valores de las ecuaciones matemáticas que definen la construcción de la superficie alabeada (reglada de doble curvatura)

Con las coordenadas (x,y,z) indicadas en la última columna de cada una de las tablas anteriores, se trazan las respectivas curvas resultando en la mitad de la silueta del gajo analizado. Para completar la silueta 3D se copian, en forma de espejo, la curva 0-9 y 1-9, tomando como referencia el eje x en su plano horizontal (vista en planta) y el eje y en su plano vertical (vista lateral derecha) respectivamente.

Para construir la superficie alabeada basada en una superficie reglada de doble curvatura inversa, se trazan líneas diagonales espaciales paralelas a una de las generatrices que definen el hyper de borde recto (12º respecto al eje x en su plano superior). Estas generatrices intersectan las tres curvas directrices que definen la silueta, en sus planos directores respectivos.

## 8. Polimorfismo de la cubierta del restaurante los manantiales

Se puede clasificar la búsqueda de la forma en 3 posturas: Complejidad formal, derivada de la interacción de configuraciones espaciales, estructurales y bioclimáticas específicas, Las deformaciones morfológicas continuas y polimorfismos a partir de fuerzas dinámicas y Morfo-ecologías y diseño morfogénético. Todas ellas desarrolladas gracias al manejo de algoritmos generativos paramétricos. De estas tres posturas, el polimorfismo es una cualidad que se puede utilizar en la tecnología digital dentro del proceso de diseño arquitectónico para generar múltiples estados de la forma de manera dinámica, a partir de uno o más procesos ejecutados dentro de un software, ya sea considerando la deformación debido a las solicitaciones estructurales que se le presentan o a otras condicionantes como las bioclimáticas. Además, el empleo de animación tridimensional basada en simulación de sistemas de partículas o de cinemática inversa (inverse Kinematics) genera distintas posibilidades formales a partir del movimiento y deformación de objetos, lo que se conoce como Morphing, permitiendo, si se emplea en ecuaciones matemáticas, buscar formas que dependen de los parámetros manejados por dichas ecuaciones.

El método 2, expuesto anteriormente -empleo de programación paramétrica y algoritmos generativos mediante el plug-in Grasshopper- que se utilizó para la generación de la cubierta de Los manantiales, se retoma para generar polimorfismos, ya sea de superficies sinclásticas como anticlásticas, a partir de la manipulación dinámica de sus parámetros geométricos: Precisión de la curvatura, Radio, no. de gajos, Altura de borde, Inclinación (del borde libre) y Altura (en el centro de la cubierta). A continuación se presentan algunos ejemplos obtenidos con la rutina *formas\_candela.ghx*

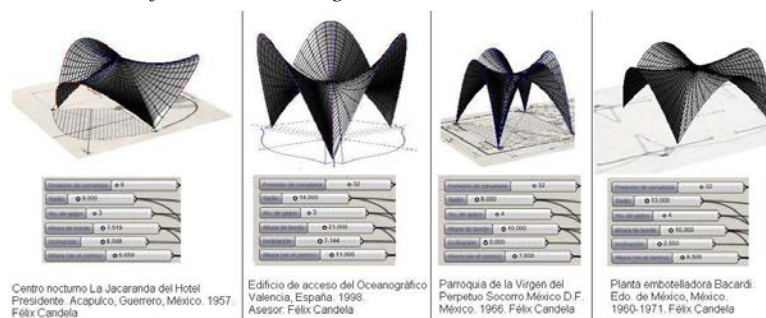


Figura 4. Ejemplos de polimorfismo obtenidos con la rutina de Grasshopper *formas\_candela.ghx*

Al variar dinámicamente los parámetros que definen la geometría de la bóveda de arista de la cubierta dentro de la función matemática del paraboloides hiperbólico con centro en el origen ( $z = x^2 - y^2$ ), no solo se obtuvo la geometría de la cubierta del restaurante, sino que se aplicó polimorfismo de superficies semejantes, para obtener superficies sinclásticas y anticlásticas de radios diferentes, de 3, 4, 5 o n gajos, de altura, en el centro geométrico, de mayor dimensión que la altura de borde o viceversa y con inclinación de la curva de borde negativa, positiva o sin inclinación; una gran gama de posibilidades útiles para el diseñador.

Los métodos de análisis formal presentados en este trabajo corroboran lo planteado por Candela: La eficiencia de los cascarones de concreto armado no está dada sólo por el material con que se construyen, ni por los elementos estructurales, sino por su propia morfología generada por la doble curvatura del hyper, que es responsable, junto con los dos factores antes mencionados aunque en menor grado, de ofrecer a las cargas una ruta fácil para fluir hasta la cimentación y a la vez un significado plástico-estético y funcional. En este sentido, uno de los aspectos principales que hacen del paraboloides hiperbólico un elemento geométrico destacado y que haya sido muy recurrida por Félix Candela en sus diseños y construcciones, es el hecho de ser una superficie cercana a la superficie mínima. De acuerdo a Frei Otto (Otto [3]) "La superficie mínima es aquella que dado un perímetro determinado, está limitado por éste, siendo su área la menor posible". *El producto de las curvaturas, mínimas y máximas, ya sean positivas o negativas, en cada punto de una superficie mínima será siempre nula...*"La obtención plástica de las superficies mínima... Se pueden obtener... mediante láminas de agua jabonosa"

Lo anterior se puede comprobar empleando análisis gaussiano que define el grado de curvatura de una superficie mediante la función de gama de colores que muestran los grados de curvatura (entre los valores que se especifiquen) de las curvaturas principales de cualquier punto que pertenezca a la superficie, es decir, el grado de curvatura gaussiana es el producto de las curvaturas principales, mínima y máxima, respectivamente (ya sean positivas o negativas) que está determinada por los siguientes colores: Color rojo muestra áreas donde se producen puntos con valor de curvatura principal positiva –máxima- (forma cóncava); Color azul indica áreas con puntos de valor de curvatura principal negativa –mínima- (forma convexa) y los puntos con valor de curvatura a la mitad del valor especificado (un valor de cero o negativo) se verán de color verde, lo que significa que la superficie es plana al menos en una dirección.

En el caso de la cubierta del restaurante los manantiales el grado de curvatura gaussiana se encuentra entre los valores de + 0.007485 y -0.007485, lo que denota un acercamiento a una superficie de curvatura media constante (CMC), es decir, el valor del promedio de las curvaturas principales (mínima y máxima) en cualquier punto dentro de ésta área (de color verde) siempre será el mismo, por lo que la curvatura gaussiana valdrá cero o tendrá un valor negativo cercano al cero. Se puede apreciar que aparece sólo un porcentaje mínimo de área en color azul, ejemplo de una curvatura negativa, que se presenta en el valle (parte superior de cada uno de los 8 gajos). El color verde, que cubre casi toda la superficie, indica áreas de mediana curvatura, lo que muestra una superficie mínima ya que el producto de las curvaturas principales (mínima y máxima) en cualquiera de los puntos del área de color verde es de cero.

## 9. La herencia en la búsqueda formal.

Lo que desarrolló el arq. Candela sirvió para nuevas experimentaciones. Uno de los casos más importantes, ya que llegó a nuevos niveles de complejidad, es Frei Otto, quien da continuidad, profundizando y combinando nuevas posibilidades mediante el uso de herramientas computacionales, incorporando las capacidades de estas herramientas para desarrollar propuestas más arriesgadas con gran rigor. Gracias a esto fue posible realizar el cálculo de dichas estructuras. Un gran ejemplo es El Multihalle de Mannheim; este proyecto presenta características interesantes que sirven para explicar el contexto donde desarrolló la evolución de estas formas. Este proyecto iniciaría en 1973, pero debido a problemas de cálculo, los programas computacionales no estaban aún desarrollados para tener la eficacia suficiente, se tuvo que posponer hasta 1975. El resultado es una impresionante estructura de 80 metros de largo; se puede observar la herencia de las dobles curvaturas que Candela desarrolló años antes.

Por último, un ejemplo del arq. Shigeru Ban. Se trata del Museo Pompidou en Metz, Francia del año 2010, el edificio presenta una conformación formal muy rica e incluso con formas caprichosas. Sin embargo existen una serie de condiciones que tiene que ver con un gran número de variables que al final conforman este tipo de espacios. Dichas variables van desde aspectos conceptuales, hasta la definición de los materiales, todo con una finalidad muy clara. Al apreciar la envolvente del edificio se observa la conformación de doble curvatura, que parte de las columnas hasta la cubierta curva, atravesada por volúmenes rectangulares. En este edificio colaboró

Cecil Balmond en la definición estructural. La estructura principal es de madera lo que implicaba un reto estructural y formal, se consiguió optimizar el trabajo estructural. A nivel de planta se puede observar que existe un trazo simple a partir del hexágono, cuatro columnas coinciden con cuatro esquinas de dicho hexágono, por lo que la solución se consigue con trazos simples; al desarrollar el espacio a nivel tridimensional se transforma y permite resaltar la estructura y al mismo tiempo imponer un espacio de gran riqueza y funcionalidad para los propósitos que se plantearon. Si bien es posible que no exista una influencia directa, ya que las tradiciones estéticas se ligan quizá por el trabajo de Frei Otto, lo cierto es que el rigor creativo es evidente. En este caso el rico juego de volúmenes responde a una serie de condicionantes relacionadas con el lugar, con la ciudad y su historia, así como los requerimientos de exhibición. Por último se pensó en una cubierta muy ligera que permitiera una calidad en la iluminación natural para darle diferentes conformaciones de día y de noche, se propuso de fibra de vidrio translúcido y textiles de teflón que cubren 8.000 metros cuadrados, dejando pasar la luz natural durante el día y en la noche con la iluminación del edificio se enmarca tanto los espacios como la estructura.

## 10. Conclusión

Dentro de las muchas tendencias que se abren camino en la actualidad, existen algunas que buscan formas complejas, pero que al mismo tiempo permitan optimizar los procedimientos técnicos y tecnológicos. Muchas de estas formas presentan un rigor geométrico mucho más profundo, esto es posible gracias al uso de geometrías y desarrollo matemáticos complejos; esta manera de abordar el diseño arquitectónico tiene una amplia tradición con un diseño más integral, que responda a las nuevas y ricas condiciones espaciales que requiere la sociedad contemporánea. Existe una gran tradición, es preciso estudiarla y profundizar su análisis con el fin encontrar nuevas soluciones.

## Referencias

1. Balmond, Cecil; Aparece en: <http://es.paperblog.com/ar/cecil-balmond-1999-la-nueva-estructura-y-lo-informal-parte-2-734602/>; consultado mayo 2014.
2. Billington, David P.: *The Tower & the Bridge*. Princeton University Press, 1983, obtenido del artículo *El borde libre y Félix Candela* de Luis Javier Sanz Balduz y coautores. Revista de obras públicas, No. 3.383. Enero de 1999.; pp. 24,25.
3. Otto, Frei y Conrad Roland, *Estructuras*, España, Gustavo Gili, 1973, p. 8
4. Segeren, Pieter La rutina se obtuvo del link:  
[http://api.ning.com/files/HfVW1LsR0tPBDxI\\*HilmvEWrJoSNJ9vGRKVjD9xEYI\\*hs8Z6E6kAQy4pqKb0mlqTFsK5ls0AUPrx6tFuNgpPzhioN748t-\\*x/candelacurves\\_PSG.ghx](http://api.ning.com/files/HfVW1LsR0tPBDxI*HilmvEWrJoSNJ9vGRKVjD9xEYI*hs8Z6E6kAQy4pqKb0mlqTFsK5ls0AUPrx6tFuNgpPzhioN748t-*x/candelacurves_PSG.ghx)
5. Villagrán García, José; Teoría de la arquitectura (notas para estudiantes). Ed. UNAM, Facultad de Arquitectura; 1ra reimpresión, México, 1989, pp.58.

## Bibliografía

- Moreyra Garlock, Maria E, David P. Billington. **Félix Candela, Engineer, Builder, Structural Artist**. Princeton University Art Museum. Yale University Press. 2008.
- Bechthold, Martin, **Innovative Surface Structure**. Taylor & Francis LTD Publisher. UK. 2008
- Ching, Francis D. K., **Arquitectura, Forma, Espacio y Orden**. Editorial Gustavo Gili. 13ª edición. México. 2002.
- Colin Faber. **Las estructuras de Candela**. Compañía Editorial Continental, México. 1970.
- De Anda Alanís, Enrique X.. **CANDELA**. Editorial Taschen American Lic. 2008.
- Kolarevic, Branko. **Architectural in the digital age - Design and Manufacturing-**. Taylor & Francis LTD Publisher. UK. 2003.
- Moussavi, Farshid, Daniel López, Garrick Ambrose, Ben Fortunato, Ryan Ludwig, Ahmadreza Schricker. **The function of form**. ACTAR, Harvard Graduate School of Design. USA.
- Otto, Frei y Conrad Roland. **Estructuras**, España, Gustavo Gili, 1973.
- Pinochet Puentes, Diego Ignacio. **Forma digital / Forma construida, Diseño y construcción de sistemas paramétricos a partir de algoritmos generativos. Tesis Proyectual**. Pontificia Universidad Católica de Chile Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos Escuela de Arquitectura. Santiago, Chile. Abril 2009.