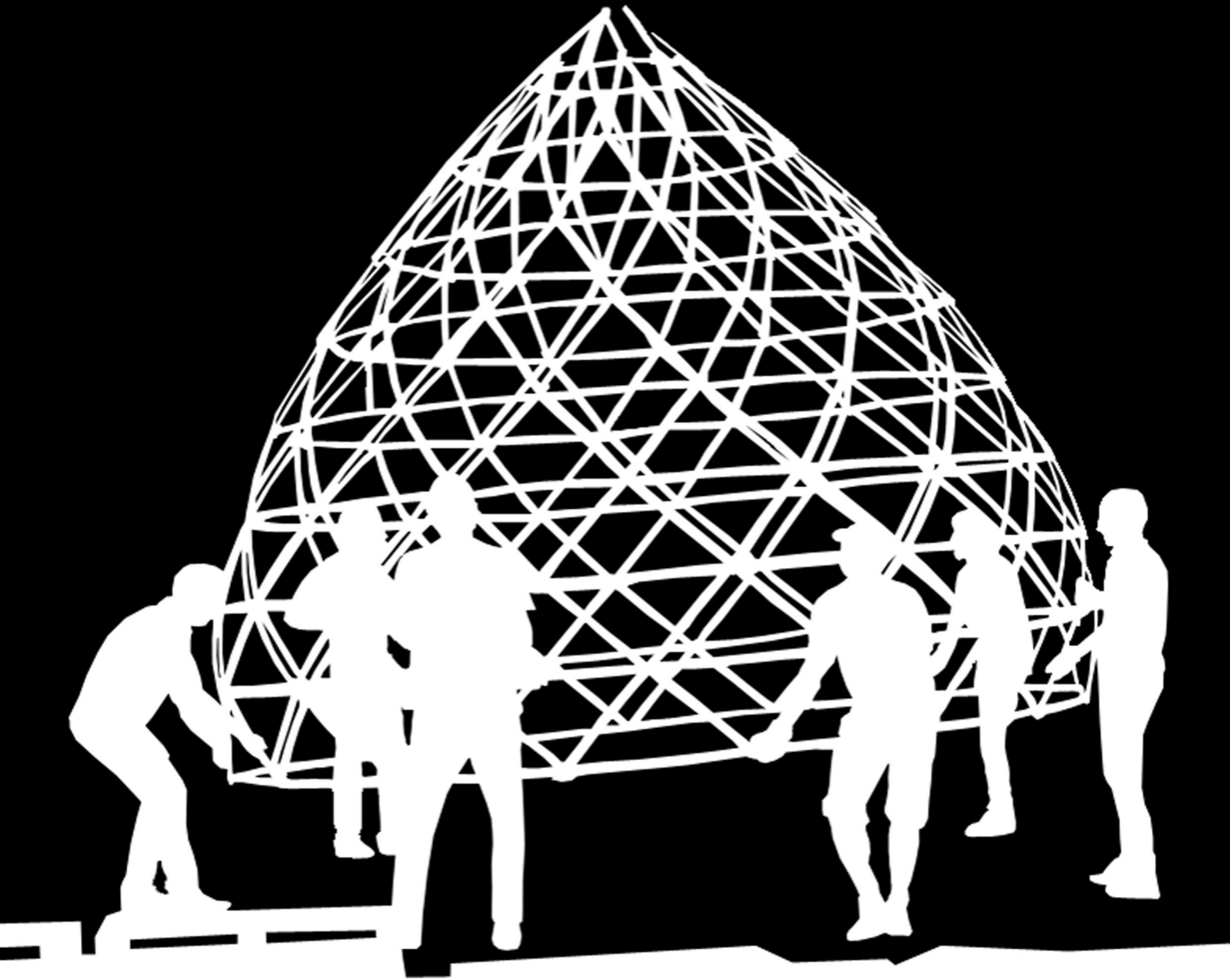


PROGRAMA DE DOCTORADO EN ARQUITECTURA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA. UNIVERSIDAD DE SEVILLA



Geometrías Geodésicas y Sistemas Constructivos. Diseño e implementación de sistemas low-tech

Doctorando: Gianluca Stasi

Tutora: Ángela Barrios Padura

Directoras: Ángela Barrios Padura, Marta Molina Huelva

PROGRAMA DE DOCTORADO EN ARQUITECTURA
Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Sevilla



Geometrías Geodésicas y Sistemas Constructivos.
Diseño e implementación de sistemas low-tech

Doctorando: Gianluca Stasi

Tutora: Ángela Barrios Padura

Directoras: Ángela Barrios Padura, Marta Molina Huelva

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VIII
<u>CAP 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</u>	01
1.1 Objeto y Alcance	01
1.2 Antecedentes. Justificación	02
1.3 Objetivos	03
1.4 Estado del arte	04
1.4.1 Experiencias	07
1.5 Metodología	08
1.5.1 Programas utilizados	10
1.5.2 Recursos Humanos y materiales	11
Recursos Humanos	11
Recursos Materiales	11
1.6 Trayectoria del doctorando: Actividades	12
1.7 Organización del contenido	15
<u>CAP 2 GEOMETRÍAS GEODÉSICAS</u>	18
2.1 Subdivisión de la esfera y método de trabajo	21
2.1.1 Sistemas de subdivisión del PPT	21
2.1.1.1 Métodos de subdivisión del PPT	23
2.1.1.2 Poniendo en práctica la mallas geodésicas	24
2.1.2 Método de trabajo. Tetrahedron Set System y Principal Tetrahedral Triangle	27
2.1.2.1 Ejemplo práctico, método GoodKarma	30
2.1.2.2 Ángulo Ortodiedro Principal, análisis y comparación de datos	36
2.1.2.2.1 Comparación entre Ángulos Ortodiedros Principales y Ángulos Internos	36
Evaluación de la comparación entre POA y AI	38
2.1.2.2.2 Comparación POA con Manuales	39
2.1.2.2.3 Comparación AI con Manuales	41
2.1.2.3 Conclusiones sobre el método de trabajo	42

2.2 Relación entre poliedros y geometrías geodésicas	43
2.2.1 Relaciones entre poliedros	43
2.2.2 Geometrías Geodésicas	48
2.3 Conclusiones del capítulo	52
<u>CAP 3 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS</u>	53
3.1 Sistema Tecnológico Unión Puntual	55
3.2 Sistema Tecnológico Unión Radial	59
3.2.1 El Método Constructivo de Barra Flexible	62
3.3 Sistema Tecnológico Unión Tangencial	64
3.3.1 El método constructivo Brujodesico	65
3.4 Ángulos	68
3.4.1 Sin ángulos	68
3.4.2 Ángulos Planos	70
3.4.3 Ángulos Compuestos	73
3.4.3.1 Variaciones del método GoodKarma	80
3.4.4 Ángulo perpendicular a la cuerda	90
3.4.4 Ángulos complejos	93
3.5 Otros factores	94
3.5.1 Tipo de geometría, del arco o de la cuerda	94
3.5.2 Número de mallas y posición recíproca	94
3.6 Tabla de Catalogación (y su uso)	96
Sección 1: Tecnología	97
Sección 2: Geometría / Diseño	97

<u>CAP 4 EXPERIENCIAS</u>	99
4.0 Descripción de la ficha de las experiencias	100
4.1 Experiencias	101
Experiencia 01 Centro Cultural elNodo	102
Experiencia 02 Temazcal, sauna de vapor tradicional	104
Experiencia 03 Prototipo método Brujodésico	106
Experiencia 04 La casa de Marcello	108
Experiencia 05 Estructura experimental Instituto Ambiente Total	110
Experiencia 06 Festival Internacional de Arquitectura Eme3	112
Experiencia 07 Prototipo GoodKarma para juego infantil	114
Experiencia 08 Curso Geometrías Geodésicas Festival Easa	116
Experiencia 09 Equipamiento para huerta urbana: El Árbol	118
Experiencia 10 A gota de agua, atrapaniebla	120
Experiencia 11 Curso Geometrías Geodésicas Escala Local	122
Experiencia 12 Invernadero Jaulas abiertas	124
Experiencia 13 Lámpara Agua, prototipo experimental	126
Experiencia 14 Curso Geometrías Geodésicas ETSA Sevilla	128
Experiencia 15 Oca do currumin	130
Experiencia 16 Estructura experimental Sito da Toca	132
Experiencia 17 - 18 Curso Geometrías Geodésicas infantil	134
Experiencia 19 Equipamiento Comunitario Sorbole	136
Experiencia 20 Prototipo Z-désico para Lyon	138
Experiencia 21 Invernadero Brujodésico	140
Experiencia 22 Biennale de Lyon / Equipamiento Parcc Oasis	142
Experiencia 23 Curso Geometrías Geodésicas infantil Lyon	144
Experiencia 24 Curso Geometrías Geodésicas infantil Climact	146
Experiencia 25 Domus Lacum, equipamiento para vivienda rural	148
4.2 Reflexiones	150
<u>CAP 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS. CONCLUSIONES</u>	151
5.1 Discusión de resultados	151
5.1.1 Proceso de investigación	152
5.1.2 Geometría	154
5.1.3 Sistemas constructivos	156
5.1.4 Experiencias	158
5.2 Conclusiones y futuras líneas de investigación	160
<u>CAP 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	161

Agradecimientos

Esta investigación no habría sido posible sin las muchas comunidades que abrieron sus puertas y se involucraron en los procesos propuestos: la asociación elNodo, el colectivo Tripulación, la fundación Mundo Sustentable, el Instituto Ambiente Total, la asociación de vecinos El Naval, la asociación Verdes del Sur, la Comarca, la granja La Fleur de Vie, el centro de permacultura Sítio Toca da Onça, la plataforma Nomad Garden, la huerta Parcc Oasis y los niños (y menos niños) de la asociación LesArchiMinots.

Sin embargo hay también nombres propios que han sido una inspiración para este trabajo como Massimo Mazzone, Ian Lodge, Luciano Furcas, Ivan Cervantes, Carlos Espinoza, Antonio Sáseta (y el grupo Melancólicos Poliedros) y Michele Pecoraro.

A Franca Bossalino, Cinzia Abbate, Simone Sfriso y Emiliano Gandolfi por el apoyo y las oportunidades que me han brindado.

A Mario Etxanobe, Jose Mendoza Milara, Alessandro Zorzetto, Alejandro Bonasso, David Juarez Latimer-Knowles con los que he tenido la suerte de trabajar codo a codo durante los últimos años.

A Ángela Barrios Padura y Marta Molina Huelva por haber tenido la valentía de embarcarse conmigo en esta aventura. Por su constante seguimiento, su interés y sus críticas, que han sido sin duda una contribución fundamental para la mejora del trabajo que se presenta.

A mis mi compañeros de doctorado y amigos Francisco Jesus Lizana Moral y Antonio Serrano Jiménez con los que he compartido gran parte de este recorrido.

*A todo los profesores que, con suertes alternas, han intentado enseñarme algo.
A Lamberto Nasini por haberme introducido a la geometría.
Un agradecimiento especial a Edward Popko por su trabajo, su interés y su atención.*

Al programa Movin'Up de la Associazione per il Circuito dei Giovani Artisti Italiani en colaboración con el Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo.

Un agradecimiento personal a Ignacio por los consejos que me daba sin saberlo y a Marcos Romero Dacal, Michela Ghislanzoni, Miguel Torres García, Javier Rodríguez López y Manuel Rodríguez Peinado por el apoyo y el soporte constante.

Al espacio de coworking la Bañera que me ha acogido durante los últimos siete años.

Este trabajo es deudor de todos ellos, sin embargo no habría sido posible sin los corrales de artesanos, espacios urbanos de fundamental importancia para el desarrollo de la creatividad y del talento local, cuya existencia cada día pelagra más por dinámicas de homologación y especulación reticentes a entender su profundo valor de creación de tejido social y cultural.

Resumen

En la primera parte del siglo XX Walther Bauersfeld y Richard Buckminster Fuller presentaron al mundo la tecnología geodésica para la construcción de cúpulas. Las estructuras geodésicas permiten cubrir grandes luces sin soportes intermedios y con una elevada robustez en comparación con el peso y las características de los materiales constituyentes.

A finales de los años '60, el movimiento de contracultura estadounidense se apropió de ellas como símbolo de libertad e independencia. Sin embargo la historia de la aplicación low-tech de esta tecnología está plagada de patologías recurrentes, debidas en muchos casos a la difusión de conocimientos obtenidos de forma poco científica y organizada, más bien folclórica, que hoy en día sigue produciendo errores y problemas constructivos.

El estado del conocimiento analizado presenta una información parcial y fragmentada, en la que las estructuras geodésicas se consideran regidas por una única geometría y como un único sistema constructivo. A lo largo del estudio, sin embargo, se demuestra que en realidad no es así.

El objetivo principal de la presente tesis doctoral ha sido estructurar y completar la información disponible sobre sistemas tecnológicos y métodos constructivos aplicables a la construcción de estructuras geodésicas, para reducir la fragmentación de la información detectada en la bibliografía existente y establecer las correctas relaciones entre las diferentes áreas de estudio aplicables a la construcción de estructuras geodésicas, para contribuir a favorecer su accesibilidad en comunidades y entornos low-tech en los que pueden tener grandes oportunidades de implementación en autoconstrucción..

Para alcanzar este objetivo se han alternado fases teóricas y de estudio, con veinticinco experiencias de trabajo de campo que han permitido la continua verificación y revisión de los resultados teóricos obtenidos en todos los campos del conocimiento involucrados, incluida la mejora de la adaptabilidad de las propuestas a entornos específicos y la mejora de los protocolos de transferencia tecnológica a las comunidades locales.

El desarrollo de la investigación ha evidenciado la necesidad de considerar y definir un amplio abanico de matices y especificidades tanto para el análisis de los métodos constructivos como para las diferentes geometrías.

La correcta comprensión y consideración de las peculiaridades propias de cada método constructivo ha sido fundamental para poder dejar de considerar las estructuras geodésicas como un sistema constructivo high-tech y empezar a trabajar sobre esquemas de construcción de baja tecnología y sobre la compilación de protocolos de empoderamiento de simple y rápida implementación.

Este proceso al principio algo difuso por la cantidad y variedad de datos a considerar, se ha ido concretando y consolidando a lo largo de la investigación gracias a la compilación de la "Tabla de caracterización tecnológica de métodos constructivos para estructuras geodésicas" [TCT] que, en sus diferentes fases de desarrollo, ha demostrado ser una herramienta útil para estructurar y comprender los resultados obtenidos y plantear los siguientes retos.

Contemporáneamente se ha desarrollado en esta tesis el Sistema de Conjunto de Tetraedro [SST] una herramienta creada a medida para trabajar en la definición de la geometría geodésica específica de cada método constructivo.

Paralelamente a estas herramientas el doctorando ha desarrollado métodos constructivos propios con el objetivo de que su realización se pudiera llevar a cabo adaptándose a las realidades locales que iba conociendo en su actividad profesional. Es el caso del Método de Barra Flexible [FSM], del sistema Unión Radial, el único método constructivo para estructuras geodésicas que se puede construir sin considerar ángulos, o del Método Brujodésico [BJM], del sistema Unión Tangencial, el único método constructivo de este sistema que utiliza exclusivamente ángulos planos transversales.

Las experiencias de campo, a través de cinco prototipos, trece proyectos a escala real y siete actividades de formación, reflejan en su conjunto cómo, a lo largo de los últimos diez años, se ha ido avanzando en la configuración de modelos que a través de la transferencia de conocimientos permitan y promuevan el empoderamiento de las comunidades, la generación de auto-empleo y la posibilidad para los ciudadanos, involucrados en los procesos propuestos, de jugar un papel activo en intervenciones de mejora o reconstrucción de sus entornos vitales, partiendo de los comunitarios, para luego aplicar los conocimientos adquiridos a los personales, como los habitacionales o laborales.

La aplicación de los planteamientos propuestos demuestra su capacidad de implementar en comunidades reales procesos constructivos rápidos, inclusivos y que no necesiten de medios auxiliares especiales, a través de operaciones muy básicas de preparación y puesta en obra.

La metodología empleada se ha demostrado apropiada para cumplir los objetivos de la investigación. Cada ciclo, cada fase de estudio y cada realización han supuesto un avance real y sustancial para la misma. A lo largo de la investigación se ha podido comprobar, a través de las experiencias prácticas, el descenso del nivel tecnológico involucrado y el aumento de la inclusividad de los modelos propuestos, sin que éstos hayan visto mermar la calidad de su diseño o sus dimensiones, que por el contrario han ido aumentando. Las últimas actividades realizadas con niños han demostrado cómo a lo largo de la investigación se han conseguido reducir de forma radical las exigencias tecnológicas y de formación previa requeridas, lo que supone una aportación de gran interés.

Abstract

In the early part of the 20th century, Walther Bauersfeld and Richard Buckminster Fuller presented the technology for the geodesic dome construction to the world. Such structures allow a to cover large spans without intermediate supports and with a high robustness compared to the weight and characteristics of the constituent materials.

At the end of the 1960s, the American counter-culture movement took geodesic designs as a symbol for freedom and independence. However, the history of low-tech application of this technology is plagued by recurrent pathologies, due in many cases to the diffusion of knowledge obtained in an unscientific, unorganized and rather folkloric way, which today continues to produce constructive errors and problems.

The analyzed state of knowledge presents a partial and fragmented information, in which geodesic structures are considered to be ruled by a single geometry and as a unique construction system. Throughout the study, however, it is demonstrated that this is not the case.

The main objective of this doctoral thesis has been to structure and complete the available information on technological systems and construction methods for the construction of geodesic structures, to reduce the fragmentation detected in the existing bibliography and to establish the correct relations between the different areas of study applicable to the construction of geodesic structures, in order to contribute to favour their accessibility in low-tech communities and environments in which they may have great opportunities for self-construction implementation.

In order to achieve this objective, theoretical and study phases have been alternated with twenty-five field work experiences that allowed the continuous verification and revision of the theoretical results obtained in all the involved areas of knowledge, including the improvement of the adaptability of the proposals to specific environments and the improvement of the protocols for technology transfer to local communities.

The development of the research has highlighted the need to consider and define a wide range of nuances and specificities both for the analysis of construction methods and for the different geometries.

The correct understanding and consideration of the peculiarities of each construction method has been fundamental to be able to stop considering geodesic structures as a high-tech construction system and start working on low-tech construction schemes and on the compilation of empowerment protocols of simple and quick implementation.

This process, initially rather diffuse due to the quantity and variety of data to be considered, has been concretized and consolidated throughout the research thanks to the compilation of the "Technological Characterization Table of construction methods for geodesic structures" [TCT] which, in its different phases of development, has proved to be a useful tool to structure and understand the results obtained and to pose the following challenges.

At the same time this thesis, developed the Tetrahedron Set System [SST] a custom-made tool to work on the definition of the specific geodesic geometry of each construction method.

Parallel to these tools, the doctoral student has developed his own construction methods with the aim of making them adaptable to the local realities that he was getting to know in his professional activity. This is the case of the Flexible Bar Method [FSM], that belongs to the Radial Union system, the only construction method for geodesic structures that can be built without considering angles, or the Brujodesic Method [BJM], that belongs to the Tangential Union system, the only construction method of this system that uses exclusively transverse plane angles.

The field experiences, through five prototypes, thirteen real scale projects and seven training activities, reflect how, over the last ten years, progress has been made in the configuration of models that through the transfer of knowledge allow and promote the empowerment of communities, the generation of self-employment and the possibility for citizens, involved in the

proposed processes, to play an active role in interventions to improve or rebuild their living environments, starting from community spaces, to then apply the acquired knowledge to personal ones, such as housing or work spaces.

The application of the proposed approaches demonstrates their capacity to implement rapid and inclusive constructive processes, that do not need special auxiliary means, through very basic operations of preparation and implementation, in real communities.

The methodology used has proven to be appropriate to meet the objectives of the research. Each cycle, each phase of study and each accomplishment have meant a real and substantial advance for it. Throughout the research it has been possible to verify, through practical experiences, the decrease of the technological level involved and the increase of the inclusiveness of the proposed models, without these having seen the quality of their design or their dimensions diminished, which on the contrary have been increasing. The latest activities carried out with children have shown how, throughout the research, the technological and prior training requirements have been radically reduced, which is a very interesting contribution.

CAP 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Objeto y Alcance

La presente investigación se centra en el estudio de la versión low-tech de las **estructuras geodésicas** y sus potencialidades en intervenciones de autoconstrucción.

La configuración espacial de estas estructuras, mediante mallas de tensiones multidireccionales, permite cubrir grandes luces sin soportes intermedios y las dota de una elevada robustez en comparación con el peso y las características de los materiales constituyentes, permitiendo reducir las dimensiones de sus elementos.

En la información disponible en diversas fuentes documentales, incluidas las principales páginas de referencia en internet, las estructuras geodésicas, se presentan como un único sistema constructivo configurado bajo una única geometría. No se considera la gran variedad de parámetros que definen y diferencian cada forma de implementarlas, con la consecuencia de relegar estos sistemas a su vertiente high-tech o con la recurrente aparición de incongruencias en los procesos de montaje y la aparición de patologías en la vida útil de las edificaciones construidas.

A través del estudio de los diferentes factores involucrados en el diseño y en la implementación de estas estructuras, esta investigación propone la definición y caracterización de los diferentes sistemas y métodos constructivos aptos para la construcción de estructuras geodésicas, y a partir de esta caracterización evaluar los sistemas más adecuados para ser desarrollados en entornos de limitados recursos y procesos constructivos con la participación de la comunidad.

La investigación que se presenta queda respaldada por una amplia experiencia profesional en este ámbito del doctorando desde el año 2010, que demuestra la capacidad de implementar en comunidades reales procesos constructivos rápidos, inclusivos y que no necesiten de medios auxiliares especiales, a través de operaciones muy básicas de preparación y puesta en obra.

Los sistemas presentados, gracias a su alta eficiencia, se han podido realizar a partir de materiales reutilizados o localmente accesibles como la madera de pallets, lamas de persianas de PVC, secciones de bambú, y pletinas metálicas, eliminando el riesgo de sufrir las lesiones típicas de estos sistemas. También admiten la prefabricación de las piezas, o de porciones de las estructuras, y su posterior transporte y ensamblaje en el lugar de instalación, para centralizar la producción o para transportarlas hacia lugares de difícil acceso o en los que ésta no sería posible, como es el caso de zonas de emergencia humanitaria o afectadas por desastres naturales.

1.2 Antecedentes. Justificación

Las estructuras geodésicas son un sistema de construcción eficiente y robusto que presenta características propias y distintas respecto a las de los sistemas tradicionales, siendo, según los contextos, una ventaja.

Presentadas al gran público al final de los años 60, fueron apropiadas por el movimiento de contracultura estadounidense como símbolo de libertad e independencia. Al mismo tiempo, su empleo en situaciones de emergencia ha arrojado resultados muy prometedores probando ser una alternativa válida debido a características como su rápido montaje, elementos de base de dimensiones y peso reducido, facilidad de transporte y sencillez de ensamble.

Se han utilizado de forma difusa en cubiertas high-tech de grandes infraestructuras, sin embargo, la historia de la aplicación low-tech de esta tecnología está plagada de patologías recurrentes, debidas en muchos casos a la difusión de conocimientos obtenidos de forma poco científica y organizada, más bien folclórica, que hoy en día sigue produciendo errores y problemas constructivos.

Las experiencias de autoconstrucción de espacios habitables con estructuras geodésicas de los años 60 y 70 en Estados Unidos no resultaron ser un antecedente positivo. Llois Kahn, figura representativa en este campo y autor de algunos de los primeros libros sobre el tema, llegó incluso a renegar del sistema (Khan, 1973). Los prototipos se desarrollaron en situaciones precarias, sin la organización, el planeamiento y los conocimientos necesarios, contruidos por el impulso del entusiasmo por la carrera espacial y en medio de revoluciones sociales que elevaron estos sistemas a símbolo de libertad.

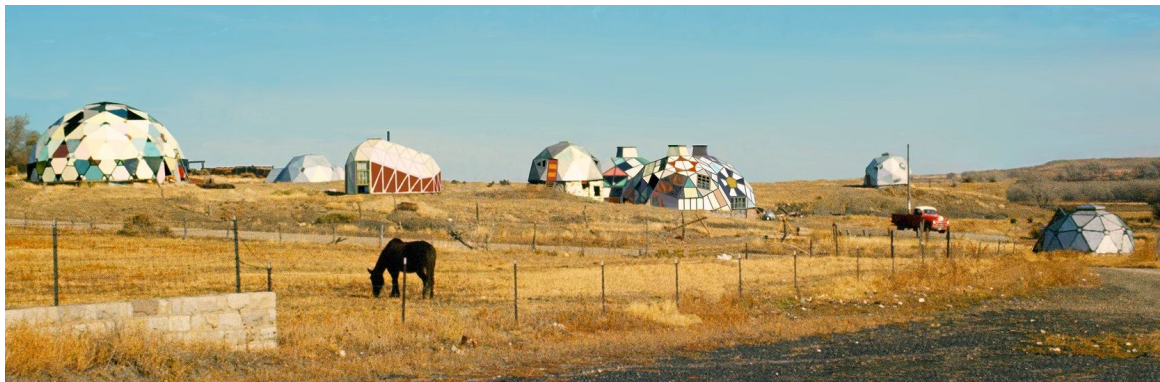


Fig 1.1 Drop City Panorama, 1966, Colorado, EE.UU. Foto de Clark Richert [www.clarkrichert.com/drop-city]

En la actualidad asistimos a un resurgir de los procesos de "Autoconstrucción", "Hágalo usted mismo" o "Do it yourself", como procesos generadores de tejido urbano, rural y social que intervienen positivamente en el desarrollo socio-económico local, a la vez que aumentan el compromiso del individuo con la construcción de su hábitat. Al mismo tiempo estos procesos poseen una amplia aplicabilidad en casos de construcción de viviendas o espacios comunitarios en áreas devastadas por catástrofes o simplemente en lugares donde las circunstancias socio-económicas lo requieran.

Por ello, se estima oportuno recuperar esta tecnología, para dotarla del soporte tecnológico necesario. Pasados cincuenta años desde las primeras iniciativas, el doctorando ha podido comprobar sus potencialidades en las diferentes ocasiones en las que ha intervenido en proyectos participativos en lugares y situaciones donde no se disponía de los medios necesarios para la implementación de sistemas constructivos convencionales.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de la presente tesis doctoral es contribuir a la mejora de la accesibilidad a los sistemas tecnológicos y métodos constructivos aplicables a la construcción de estructuras geodésicas.

El estado del conocimiento analizado al iniciar esta investigación presenta una información parcial y fragmentada, en la que las estructuras geodésicas se consideran regidas por una única geometría y como un único sistema constructivo. Por ello, y para alcanzar el objetivo principal, la presente tesis doctoral tiene como objetivos específicos los siguientes:

1º. Identificar y caracterizar los distintos campos del conocimiento implicados e identificar la variedad de geometrías geodésicas, sistemas tecnológicos y métodos constructivos que existen. Establecer las conexiones necesarias entre ellos, y analizar los factores y parámetros que inciden en la concepción e implementación de los métodos constructivos aptos para ser aplicados a estas geometrías, con el objetivo de evidenciar cómo detrás del término genérico “estructura geodésica”, se incluye actualmente una asombrosa diversidad de sistemas espaciales y métodos constructivos.

2º. Establecer las bases para la caracterización tecnológica de los sistemas y métodos constructivos, que recoja y ordene de forma estructurada, todos los factores y parámetros involucrados en el diseño e implementación de estas estructuras, como herramienta de evaluación del nivel tecnológico requerido, catalogación de la tecnologías existentes y soporte del diseño de nuevas propuestas.

3º. Crear un herramienta específica que permita trabajar sobre las geometría en su definición concreta y adaptada a cada método constructivo, enumerando los operadores, los conceptos y los factores implicados y necesarios para su uso. Analizar y comparar los planteamientos geométricos y los datos disponibles en la actualidad, con los datos obtenidos a través de la aplicación de las herramientas propuestas y registrar las diferencias.

4º Constatar empíricamente en experiencias de campo en comunidades reales los avances en todos los campos del conocimiento involucrados, incluida la resiliencia a entornos específicos.

5º Generar protocolos de transferencia tecnológica a comunidades locales incluyendo el detalle de diseños y métodos constructivos, así como los ajustes en procesos de producción y ensamblaje, con el fin de garantizar el empoderamiento de personas sin formación específica previa.

1.4 Estado del arte

En 1922 Walther Bauersfeld ingeniero de la compañía óptica Carl Zeiss diseña y construye la primera estructura geodésica en Jena, Alemania, como encofrado perdido para un planetario, obteniendo la patente en 1925 (patente Alemana n.415395).

A mediados de los años 50, Richard Buckminster Fuller vuelve a patentar esta tecnología (Patente EE.UU. N°2682235) y continuó produciendo otras en los treinta años siguientes.

Kenner en su libro "Geodesic Math and how to use it" (Kenner, 1976) de 1976 manifiesta cómo hasta 1966 algunas figuras aparecidas en la revista 'Popular Science Monthly' (Rhine, 1966) eran todo lo que podía poner en sus manos cualquiera fuera del círculo de los licenciarios de Fuller. Debido a que el desarrollo de estos sistemas constructivos está relacionado, a principios del siglo pasado, con usos y tecnologías militares, los conocimientos eran mantenidos como secreto de estado, y para su manejo se requería la máxima discreción, con el objeto de evitar que pasasen al bando enemigo.

Eso contribuyó a que las experiencias de autoconstrucción de los años 60 y 70, que ya se estaban desarrollando en situaciones precarias, sin organización y construidas por el impulso del entusiasmo por la carrera espacial y en medio de revoluciones sociales que elevaron estos sistemas a símbolo de libertad, se desarrollaran sin disponer de los conocimientos necesarios. Los conocimientos relacionados con la construcción de este tipo de estructuras se difundían en publicaciones autoeditadas e informales, que fueron el impulso de las construcciones recogidas posteriormente en publicaciones más estructuradas.

Para el estudio de este campo se debe considerar que, aunque en la narrativa general se identifiquen estos sistemas con la figura de Richard Buckminster Fuller, en realidad hubo un considerable grupo de personas que, trabajando en colaboración con él o de forma completamente independiente, contribuyeron fundamentalmente al desarrollo de estas tecnologías.

Caben destacar como ejemplos las contribuciones de Duncan Stuart al desarrollo de los esquemas de subdivisión Class I y Class II a finales de los 40 y principios de los 50, publicando en 1955, en la revista estudiantil de su escuela de diseño, el artículo "On the Orderly Subdivision of Spheres" (Stuart, 1955) en que presentaba diferentes estrategias para la subdivisión de las esferas, o la publicación de "Geodesics" (Popko, 1967) por parte de Popko en 1967 en la que proponía presentar las geometrías geodésicas y al mismo tiempo sus posibilidades constructivas en un manual de diseño y construcción a servicio de una sociedad que estaba abrazando de forma entusiasta la filosofía del "do it yourself".

En 1968 Steve Baer recoge las experiencias realizadas con la construcción de Drop City (figura 1.1) en el "Dome Cookbook" (Baer, 1968) un libro auto-publicado que es entre un manual informal de geometría y un diario descriptivo de aquellas experiencias.

Joseph Clinton, pionero de la sistematización de las geometrías geodésicas, preparó para la NASA entre 1965 y 1971 diversos informes. En 1970 entregó un informe titulado "Advanced Structural Design Concepts for Future Space Missions" (Clinton, 1970) en el que propuso la terminología de trabajo que, expandida y actualizada, se sigue empleando a día de hoy.

No fue hasta la publicación por Khan del primer "Domebook" (Khan, 1970) en 1970 cuando los datos necesarios para su construcción, los factores de cuerda, se pusieron a disposición del público en general convirtiéndose en referencia e impulsando la ola de construcciones geodésicas emblemáticas del movimiento "Back to land" de la contracultura estadounidense de los 70. El año siguiente Khan publicó el "Domebook 2" (Khan, 1971) para completar, profundizar y expandir los contenidos, analizándolos de forma mucho más holística y organizada. Ambos volúmenes presentaban una introducción a las geometrías geodésicas, y una serie de ejemplos de construcciones a escala real, relatado de forma epistolar por sus propios autores y anexos con las tablas de datos de subdivisión para cuya preparación fue llevada a cabo por Clinton, autor de la sección "Chord Factors and Angle" del Domebook y de la "Geodesic Math", en el Domebook 2.

El mismo autor en 1973 en el "Domebook 3" (Khan, 1973) escribe: *"En 1971, mientras compilábamos el Domebook 2, comenzamos a sentirnos algo insatisfechos. Había transcurrido ya suficiente tiempo como para poder abordar una evaluación de nuestras experiencias. Delante de las cúpulas habíamos construido pequeños edificios de madera y empezábamos ahora a considerar con mayor respeto este trabajo anterior"* y también: *"El Domebook 2 presentaba este tipo de construcción como algo demasiado fácil, como la solución genial, demasiado excitante"*. También describió como esta desilusión acabó disgregando los principales grupos de construcción e investigación sobre el tema.

Cabe subrayar que estas reflexiones se desarrollaron a sólo tres años de la publicación del primer volumen de la serie. No obstante la serie de publicaciones de los Domebook constituyó un avance fundamental en la difusión de la construcción de estructuras geodésicas, contribuyendo además a la difusión de muchas confusiones.

Los factores de cuerda publicados en estos volúmenes no correspondían con los de las patentes de Fuller [1951 y siguientes], además se afirmaba que las frecuencias impares no podían tener una base plana. Curiosamente fue el manual "Dome cookbook of geodesic Geometry" (Kruschke, 1972) autoeditado por David Kruschke, un profesor de matemáticas, que demostró lo contrario y puso por primera vez orden en el asunto. Como se escribe en el prólogo de este pequeño libro autoeditado "Por extraño que parezca, esta confusión y este libro habrían sido innecesarios si Fuller hubiera publicado sus derivaciones". El trabajo de Kruschke abrió la posibilidad de un uso práctico de las frecuencias impares.

En 1973 se publicó el "The Dome Builder's Handbook" (Prenis, 1973) y en 1978 el "The Dome Builder's Handbook 2" (Yarnal, 1978). El primer volumen sigue las pautas de los Domebook aunque profundizando de forma más detallada en los aspectos técnicos de los proyectos. El segundo en cambio es una verdadera guía para el auto-constructor de cúpulas geodésicas proponiendo al lector un test para entender si está preparado para la construcción de una estructura de estas características y analizando las condiciones legales y los permisos, las relaciones con las administraciones, contratistas y proveedores, y todos los pasos necesarios para su construcción.

Estos volúmenes no contribuyeron a organizar la información geométrica y técnica sobre el tema. Fue un crítico literario especializado en Joyce, Hugh Kenner apasionado por el trabajo de Fuller que con su publicación "Geodesic Math and how to use it" (Kenner, 1976) se propuso poner orden en el tema geométrico para atajar las confusiones y las informaciones erróneas. Este volumen describe de manera cristalina los conceptos involucrados en la subdivisión en una superficie esférica y las herramientas necesarias para hacerlo.

En 1979 casi treinta años después de la publicación de los estudios de Stuart, Magnus Wenninger completaría la clasificación propuesta por Stuart para las subdivisiones de las esferas añadiendo la definición del esquema de subdivisión Class III en su libro "Spherical Models" (Wenninger, 1979).

En 1981 el arquitecto y auto-constructor Vitor Lotufo y Joao Mario Almedia Lopes auto-publican una introducción a las estructuras geodésicas "Geodésicas & Cia" (Lotufo. Lopes, 1981) que aunque se nutre de forma sustancial de información anterior, la reorganiza, estructura y completa con muchas ilustraciones originales, proponiendo al lector un cuadro del tema mucho más claro.

Cuarenta y cinco años después de "Geodesics" (Popko, 1967), Popko publicó en 2012 el libro "Divided Spheres" (Popko, 2012) en el que condensa una vida de investigación sobre la división de la esfera. Este libro, que incluye notas históricas y un glosario, ha sido junto con el de Kenner fundamental para el desarrollo de esta tesis. Para la definición de nuevos conceptos y parámetros se ha seguido la estructura propuesta por Popko.

Hoy en día Internet proporciona la posibilidad de acceder a una enorme cantidad de material y documentación, de tal forma que las diferentes páginas web están sustituyendo a las publicaciones autoeditadas.

Sin embargo es muy difícil, y virtualmente imposible para quienes se acercan por primera vez a estos sistemas constructivos, seleccionar estudios rigurosos o descifrar la información de las teorías promulgadas y repetidas sin fundamento ni análisis crítico.

El aumento de la potencia de cálculo de los equipos informáticos experimentado en este periodo de tiempo, no ha servido para la resolución de estos aspectos, ya que los límites de los planteamientos se encuentran a nivel de análisis conceptual y de adaptación de las herramientas matemáticas utilizadas en los casos específicos de aplicación.

La computación puede ser un medio importante, sin embargo no es la solución y tampoco en el cálculo residen los problemas detectados hasta el momento. El mismo Kenner advertía del peligro de confiar demasiado en la computación afirmando que "*También he tenido la gran ventaja de no tener acceso a una gran computadora digital. Las computadoras en el pasado han ayudado a ofuscar el tema haciendo métodos inadecuados, viables*".

La página www.desertdomes.com, creada por Tara Landry en 1998, propone una herramienta de cálculo para la medida de las barras basándose en los factores de cuerda de Clinton. Las medidas y los modelos son los extraídos de la subdivisión geométrica sin considerar bases planas para frecuencias impares. Sólo se presentan datos para las frecuencias de subdivisión uno a seis del icosaedro.

La página www.simplydifferently.org, fue creada por René K. Müller en 2006. Se presentan los factores de cuerda derivados a partir de un gran número de sólidos de base y presenta un gran número de frecuencias para cada uno. La web se complementa con diferentes ejemplos de experiencias constructivas y de otros tipos de construcciones.

En 2009 apareció el portal www.acidome.ru para el cálculo del diseño de estructuras geodésicas. En él se ofrece la posibilidad del uso de una gran variedad de métodos constructivos y de subdivisión del icosaedro, llegando hasta la frecuencia 14, sin embargo se proporcionan datos sin caracterizar, de forma que resulta complicado evaluar su calidad. La información disponible es constantemente revisada y ampliada. La web, que inicialmente era un portal en ruso con unos pocos modelos, hoy en día se ha traducido en seis lenguas y se ha añadido un gran número de modelos.

En 2011 se publicó la web www.domerama.com, un portal que se estructura como una enciclopedia sobre el tema. Sin embargo y a pesar de reportar muchos conceptos, se presentan sin profundizar, en muchas ocasiones de forma confusa y contribuyendo a la vigencia de errores del pasado.

Existen un gran número de webs a nivel nacional e internacional que ofrecen la venta de manuales para la configuración de la subdivisión frecuencia 4 del icosaedro con el método constructivo GoodKarma. Como ejemplo se reporta www.domosgeodesiccos.es creada en 2012. En estas webs se considera principalmente la frecuencia 4 del icosaedro, aunque algunas expanden a la 6 y a las 8, afirmando que las impares son opciones poco viables para la construcción.

Los modelos propuestos comparten supuestos y resultados, en los que se repiten patrones que pueden provocar patologías recurrentes en estos modelos.

A pesar de que han transcurrido más de cuarenta años desde las primeras publicaciones (Kruschke, 1972; Kenner, 1976; Popko, 1967 y 2012), las aportaciones de estos pioneros no han sido incorporadas a las referencias publicadas hoy día en medios electrónicos ó físicos (manuales) y a los conocimientos populares transmitidos en cursos y eventos.

A día de hoy persisten la confusiones alrededor de los diferentes sistemas y métodos de subdivisión, en cuyos resultados se centran muchas discusiones y a cuya precisión se imputan los problemas en las fases de montaje y construcción, así como la concepción de que las frecuencias impares no pueden tener una base plana.

El análisis documental presenta las geodésicas como un único sistema constructivo regulado por una única geometría, sin caracterizar las diferentes formas de construir estas estructuras. De esta forma, sin una comprensión actualizada de las diferentes áreas del conocimiento involucradas, se promociona la aparición de las patologías, las dificultades de acceso y la repetición de los patrones que condujeron al abandono de estos sistemas constructivos.

1.4.1 Experiencias

A nivel nacional hay que subrayar el trabajo del arquitecto español Emilio Pérez Piñero. Aunque su trabajo se centró sobretodo en estructuras transportables, itinerantes y desplegadas, también diseñó la cúpula geodésica del Teatro Museo Salvador Dalí, que acabó su hermano tras su muerte en 1972.

A nivel internacional en el ámbito de estudio y aplicación de este tipo de estructuras en ambientes marginales o de alivio de situaciones de emergencia, destaca la experiencia llevada a cabo en Chile en 2010: *“Tres días después del terremoto del 27 de febrero de 2010 en la zona central de Chile, la Unidad de Arquitectura Extrema, ARQ-X, del Departamento de Arquitectura de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), propuso un programa de acción rápido que fuese capaz, en el corto plazo de la post emergencia, de desarrollar dentro de su marco de investigación en geodésicos un sistema productivo y de montaje de coberturas geodésicas muy baratas, que permitiesen cubrir rápidamente enseres, reuniones y actividades escolares en los pueblos más afectados.”* [Serrano Rodríguez, Perdo. “Geodésicos post terremoto”. Investigación aplicada en la emergencia, Revista INVI vol.26 no.72 Santiago ago. 2011]

1.5 Metodología

La investigación se inició con el análisis de los textos producidos por el movimiento contracultural de los años 60 y 70 de Estados Unidos, como referentes de geometrías geodésicas en contextos low-tech y de autoconstrucción.

A partir de estos textos se empezó el estudio del trabajo de los autores que desarrollaron las principales aportaciones en los campos de las matemáticas y geometrías presente en ellos, con el principal objetivo de organizar los sistemas y métodos de subdivisión geométrica y diseño de estas estructuras que hasta el momento no lo estaban.

La investigación documental se inicio con el libro “Geodesic Math and how to use it” de Kenner publicado en 1976, y continuo con “Divided Spheres” de Popko (autor en 1967 de Geodesics) publicado en 2012, referente principal en la tesis doctoral de las cuestiones matemáticas, presentando de forma muy ordenada y estructurada un trabajo de mas de cuarenta años sobre la subdivisión de la esfera. Esta tesis se ha beneficiado no sólo de sus contenidos, que incluyen también un completo glosario de la terminología específica necesaria para trabajar con las geometrías geodésicas, sino también de la estructura de los conceptos que presenta y de las definiciones utilizada por Popko.

El libro de Kenner fue también relevante para profundizar el estudio de los aspectos matemáticos del Sistema de Coordenadas Esféricas [SCS]. Este sistema es la base de los cálculos que han permitido la compilación de las tablas de factores de cuerdas y la subdivisión regular de las esferas en general.

En esta tesis se ha sustituido el SCS por el **Sistema de Conjunto de Tetraedros [TSS]**, pensado específicamente para facilitar el diseño de estructuras geodésicas simplificando la aplicación de la geometría esférica para la definición de conjuntos geodésicos a través de pocas operaciones repetitivas y respecto a muy pocas variables. En general el TSS facilita y hace accesible el análisis, matemático y visual, de los factores implicados sin necesitar de grandes esfuerzos de abstracción. Eso permitió detectar de forma inmediata los errores conceptuales introducidos por la aplicación de los postulados de la geometría Euclidiana sobre superficies esféricas y empezar a trabajar sobre su resolución. Sin embargo la creación del SST fue posible sólo gracias al acceso al SCS proporcionado por el texto de Kenner.

Paralelamente se identificaron y analizaron los manuales prácticos y las guías de montaje existentes para la construcción de estructuras con el sistema GoodKarma. Aunque se trata de manuales de poco valor científico y que con el paso de los años se han ido reproduciendo sin el análisis crítico necesario para corregir los errores que arrastran, se consideró fundamental su estudio debido a que son la base de la que parten la mayoría de las personas que se acercan a las geometrías geodésicas con la intención de autoconstruir una estructura.

El análisis de los datos de estos manuales se desarrolló presentando la comparación entre los datos reportados y los obtenidos con la adaptación específica al método GoodKarma de la geometría genérica a través de la herramienta del SST, así como las diferencias detectadas con la geometría genérica misma. Los resultados de este proceso de comparación han servido para detectar los patrones que provocan aparición de desviaciones y eliminarlos.

Al mismo tiempo para analizar el panorama de los métodos de autoconstrucción de cúpulas geodésicas, aparte de la bibliografía formal, se buscó entre los ejemplos disponibles de forma desorganizada en un gran número de páginas web. A veces lo único que se pudo encontrar fue una fotografía. Cada uno de los ejemplos, a pesar de configurar geometrías similares, produce propiedades estructurales y necesidades tecnológicas y de infraestructuras muy diferentes que necesitan ser comprendidas y analizadas para caracterizarlos. Durante diez años el doctorando recopiló estas referencias. A partir de su análisis y de los resultados de las experiencias constructivas propias del doctorando, éste trabajó con el objetivo de encontrar los patrones comunes en sus diseños y definir los indicadores necesarios para su caracterización.

Este trabajo permitió la compilación de la **Tabla de caracterización tecnológica de métodos constructivos para estructuras geodésicas [TCT]** que organiza los métodos constructivos definiendo tres sistemas tecnológicos según la orientación del ensamblaje de los elementos constructivos de base de cada uno para conformar las estructuras geodésicas.

A la creación del TCT, que se puede considerar la primera herramienta específica de catálogo para métodos constructivos aplicables a la construcción de estructuras geodésicas, se ha acompañado la definición de la terminología apropiada y necesaria para su uso. Para ello se han investigado, analizado y definido los factores involucrados en la configuración de los diversos sistemas y métodos constructivos. Esta herramienta en sus diferentes fases de desarrollo, demostró ser una herramienta valiosa no sólo para estructurar y comprender los resultados obtenidos, sino también para plantear los siguientes retos.

Los avances y las intuiciones producidos durante las fases de estudio e investigación se aplicaron en la **fase experimental de la investigación** que proponía experiencias reales de construcción de estructuras. Al mismo tiempo las evidencias obtenidas de las experiencias construidas, producían datos y aportaciones fundamentales para analizar el trabajo propuesto y seguir con el desarrollo de las fases teóricas.

El doctorando ha desarrollado desde 2004 experiencias de autoconstrucción y un trabajo continuado con comunidades y personas sin formación, lo que ha permitido el avance de la investigación y la comprobación de las mejoras producidas. El doctorando comenzó a trabajar en la construcción de estructuras geodésicas en el año 2010.

La construcción de las primeras experiencias a escala real sirvió de base para un estudio más profundo de la geometría y de los sistemas constructivos. La experiencia y los conocimientos adquiridos a partir de la observación y de la detección de las principales irregularidades de diseño y construcción que sirvieron de base para la mejora de las construcciones realizadas hasta la actualidad. Las primeras construcciones se desarrollaron a partir del contacto con diferentes comunidades en el norte de México, como elNodo o Mundo Sustentable, desarrollando modelos en base a las necesidades planteadas por ellas.

A partir de 2014 en que comienza la presente tesis doctoral se produce una sistematización y una organización del trabajo ya realizado lo que ha dado lugar a la configuración de nuevas geometrías, métodos constructivos propios y avanzando en el desarrollo de las herramientas de trabajo específicas para el diseño y la realización de estructuras geodésicas.

Las veinticinco experiencias realizadas han evidenciado la necesidad de considerar y definir un amplio abanico de matices y especificidades tanto para el análisis de los métodos constructivos aplicables a las geometrías geodésicas como para las diferentes geometrías que los generan, contribuyendo, junto a las fases de investigación, a la creación y a la mejora de las herramientas del SST y del TCT propias de esta investigación. Al mismo tiempo el desarrollo de estas herramientas contribuía a su vez a la comprensión de los resultados obtenidos y a la redefinición de los límites de la investigación y de la experimentación misma. Se creó de esta forma un esquema de trabajo que, concluyendo ciclos completos desde la concepción a la construcción, permitió avanzar en todos los aspectos involucrados en la autoconstrucción de este tipo de estructuras en entornos low-tech.

De forma específica, la realización de experiencias en comunidades reales permitió recoger datos sobre las herramientas necesarias para la transferencia tecnológica de estos métodos constructivos a personal sin formación previa y para reducir las exigencias tecnológicas y de infraestructuras involucradas en su implementación.

Las diferentes experiencias que el doctorando realizó en comunidades reales alrededor del mundo permitieron establecer las premisas y condicionantes de la presente investigación, como son el empleo de herramientas y materiales básicos sin la necesidad de grandes medios auxiliares, disponer de la flexibilidad en el uso de los materiales y permitir la prefabricación y consolidación evolutiva de las estructuras.

Dando prioridad a aquellos métodos constructivos que siguen patrones simples y repetitivos, sin la necesidad de formación previa o excesiva fuerza física, utilizando elementos de medidas y peso limitados y no necesitaran mano de obra especializada.

En definitiva a partir de la demostración de que los problemas relacionados con estos métodos constructivos no residen en la complejidad de los métodos de subdivisión, sino en la adaptación de los resultados a los diferentes sistemas y métodos constructivos que se puedan utilizar para la construcción, esta tesis se ha enfocado en la definición de las características de cada uno de ellos en la búsqueda de métodos constructivos aptos para ser autoconstruidos en entornos low-tech en colaboración con las comunidades locales y de acuerdo con las tecnologías y los materiales presentes en cada territorio.

Para alcanzar este objetivo, a partir del estudio de lo existente, se crearon las herramientas y definido los conceptos necesarios que también han ido evolucionando de forma radical a lo largo de la trayectoria investigadora. Del análisis de los factores que permiten una mejor adaptabilidad a los supuestos de la tesis y una mejor transferencia en comunidades reales el doctorando ha podido definir dos métodos constructivos propios realizando diferentes estructuras a partir de diferentes evoluciones y configuraciones de los mismos. Algunas de la experiencias se realizaron de inicio a fin con la participación activa de niños y adolescentes y su exitoso desarrollo demostró la efectiva reducción de los requerimientos tecnológicos y de formación previas obtenidas a través de la metodología propuesta.

1.5.1 Programas utilizados

Al principio de esta investigación los programas de diseño asistido por ordenador (CAD, Computer Assisted Drawing) constituían la herramienta principal para el desarrollo de los esquemas geométricos y de los modelos necesarios para la experimentación con los modelos construidos propuestos.

Sin embargo, a lo largo de la misma su protagonismo se redujo de forma inversamente proporcional a la mayor comprensión de los factores matemáticos y geométricos involucrados en su diseño, y a la mayor confianza que el doctorando adquirió a través de las experiencias.

Para las primeras se produjeron modelos tridimensionales e imágenes virtuales basadas en ellos, con el objetivo de mejorar la comprensión visual de las propuestas.

Al avanzar la investigación, se dejaron de producir ya que las fotografías de los modelos construidos eran más eficaces.

Los diferentes módulos del paquete de software de oficina libre y de código abierto LibreOffice, y específicamente los programas "Calc" y "Math", han ido en cambio aumentando su protagonismo, siendo a día de hoy herramientas principales en la preparación de los diseños y modelos propuestos.

De todas formas se acompañan siempre por diseños CAD esquemáticos, como herramienta de control y verificación de los resultados obtenidos.

No se ha precisado el uso de programas paramétricos y se ha decidido no utilizarlos. Esta decisión se motiva por la necesidad del doctorando de mantener el control completo sobre los aspectos del diseño que permiten su implementación en el marco de los supuestos de esta investigación y de la actividad profesional del doctorando y sobre los factores que los generan.

Esto fue particularmente importante para estructurar de forma coherente el desarrollo conceptual de las operaciones necesarias para el diseño de cada método constructivo y a partir de ahí entender los factores involucrados y generar el esquema plasmado en el TCT.

1.5.2 Recursos Humanos y Materiales

La precariedad de medios, la limitación de los tiempos de ejecución y la escasez de recursos en las que se desarrolló la implementación de los prototipos o de los proyectos concretos, lejos de influir negativamente sobre el desarrollo de la investigación configuraron un marco para el coherente desarrollo de la misma.

La investigación se desarrolló en sus distintas fases de implementación de prototipos o proyectos concretos con los siguientes medios:

Recursos humanos

Las experiencias propuestas se llevaron siempre a cabo entre un número reducido de personas y en un marco temporal acotado, debido a que en los contextos en que se operó las situaciones laborales y sociales de las personas que podrían involucrarse en los procesos propuestos les impedían hacerlo de forma plena, constante y continuada.

La rapidez de formación y la posibilidad de intercambio de los ejecutores de las distintas operaciones fueron fundamentales para que distintos sujetos pudieran participar de forma activa y eficaz durante periodos de tiempos limitados. En los ámbitos de implementación planteados ha sido además necesario no alargar demasiado los procesos, y plantearlos de forma que produzcan resultados en un corto plazo para fomentar la participación a través de la producción de resultados concretos y tangibles y evitar el cansancio de los agentes que intervienen con procesos demasiado largos en el tiempo.

Las experiencias se desarrollaron con un máximo de diez personas acompañando al doctorando. En los casos de cursos u ocasiones en las que había un número superior, éstas no operaban al mismo tiempo, sino alternándose.

Los modelos propuestos y los esquemas de trabajo se plantearon de forma que se pudieron desarrollar con un número reducido de personas, lo que implica también un número reducido de herramientas y espacios de trabajo de pequeñas dimensiones.

Recursos materiales

Los materiales utilizados en las experiencias se eligieron por su disponibilidad y accesibilidad a largo plazo en el territorio de intervención, considerándolas no sólo respecto al material en si mismo sino también a los medios necesarios para su transporte y manipulación, y en general respecto a todo el ciclo de implementación.

A pesar de la complejidad de alguna de las producciones, los materiales y las operaciones empleadas en su preparación fueron siempre muy básicos, tanto que algunos de ellos ni siquiera son considerados materiales aptos para la construcción.

La primera experiencia se realizó a partir de perfilierías metálicas y operaciones de manipulación más industrializadas, a partir de la siguiente los materiales utilizados fueron pletinas metálicas, tablas tipo pallet, lamas de persianas de PVC y secciones de bambú y los procesos de manipulación se fueron simplificado siempre más así como las especificidades exigidas a los materiales mismos.

De esta forma no sólo se pudieron realizar las experiencias propuestas, sino que mientras se iban adaptando las propuestas y reduciendo las exigencias, se aumentaba su adaptabilidad y aplicabilidad en diferentes contextos.

1.6 Trayectoria del doctorando: Actividades

La actividad profesional que el doctorando ha desarrollado a lo largo de los últimos quince años ha sido muy heterogénea. Sin embargo la forma de acercarse a las realidades en las que interviene, con la puesta en valor del trabajo de los agentes que ya están trabajando en los territorios y los recursos ya presentes en ellos, constituye un hilo conductor que dota de coherencia a la actividad en su conjunto, que sigue y desarrolla una visión social de la arquitectura, enfocada sobre las personas y en los entornos socioculturales locales.

El trabajo directo y de campo, descrito en el cuarto capítulo, ha sido desarrollado paralelamente, en estrecha sinergia y como resultado, del desarrollo de investigaciones específicas exigidas por cada una de las situaciones en que se operó con este tipo de planteamiento.

Estas actividades se han integrado con la participación en congresos, debates, publicaciones, exposiciones y festivales, con el desarrollo de la actividad docente y manteniendo un contacto constante con las instituciones académicas.

Las temáticas tratadas han sido principalmente:

- El urbanismo y la arquitectura participativa
- Las arquitecturas del re-utilizo, las de autoconstrucción, profundizando la investigación en los campos de la arquitectura basada en los materiales rescatados de los ciclos productivos y de los naturales
- Las arquitecturas efímeras y las temporales

En general el interés del doctorando se ha enfocado en los conocimientos necesarios para apoyar la puesta en marcha por parte de una comunidad local de procesos sociales resilientes y con perspectiva de continuidad. Su objetivo ha sido el de acercarse a una comunidad local aportándole herramientas para apoyar su desarrollo y resiliencia, y tratando de evitar la dependencia que a menudo acompaña a este tipo de procesos.

Estas actividades se han desarrollado tanto en el ámbito nacional como internacional, permitiendo al doctorando construir a lo largo de los años una red de contactos y de personas afines que, en diversas ocasiones, ha servido de soporte a las actividades planteadas.

A partir de la participación en el **workshop Ciudad X**, organizado en Saltillo, México, por la asociación local **InpubliXpace** en el **Tecnológico de Monterrey**, Campus Saltillo, el doctorando se estableció en **México** por dieciocho meses, repartidos en tres estancias entre 2010 y 2011, para el desarrollo del proyecto del Centro Cultural elNodo.

Durante su permanencia se desarrollaron diferentes actividades docentes como el **“Laboratorio urbano de participación comunitaria”** realizado en **Noviembre 2010** en **Tampiquito (Nuevo León)** para el **Instituto Municipal Planificación Urbana de San Pedro**, el taller **“Arquitectura Acción”** desarrollado en **Junio 2011** en **Santa Catalina (Nuevo León)** para el **Centro de Estudios Superiores de Diseño de Monterrey** o el **workshop “Arquitectura, comunidad y recursos”** llevado a cabo en **Agosto 2011** en **Chihuahua (Chihuahua)** para la **Escuela de Arquitectura y Diseño de América Latina y el Caribe**.

Los proyectos desarrollados en este periodo han sido publicados en diferentes medios internacionales como en el n°36 de la revista **“Chinese and Oversea Landscape “** (Jiangsu people's publishing LTD - Pekin, China, 2011) con un artículo de Zhang Zhucun, en el n°122 de la revista **“Summa+”** (Donn S.A., Buenos Aires - Argentina, Junio 2012) con un artículo de Eugenia Soria, en el n°5 de la revista **“Officina”** (Officina, ArTec - Università luav, Venezia - Italia, Marzo – Abril 2015) con un artículo de Michelangelo Sabuzi, o el n°100 de la revista **“Zeppelin”** (Asociația Zeppelin & Q-Group Proiect, Bucarest – Rumania, Noviembre 2013) con un artículo del doctorando.

Finalmente el proyecto elNodo recibió la cualificación de **“Good Practice”** en el **“Dubai International Award for Best Practices”** de **United Nations Human Settlements Programme** y se reconoció como

“Práctica Promisoria” por el **Centro Nacional de Prevención del Delito y Participación Ciudadana (CNPdPC)** y **Programa para la Convivencia Ciudadana (PCC)”** de México.

En 2012 desarrolló un período de formación y de investigación en el Instituto Californiano de Arte y Arquitectura en Tierra fundado por **Nader Khalili**, más conocido por la técnica **"superadobe"**, completando su programa de formación a largo plazo sobre la técnica. De esta experiencia nació una relación estable, llevando a cabo la actividad docente del instituto en Europa hasta mediados de 2013, destacando la dirección de más de diez talleres teórico/prácticos completos sobre la técnica del superadobe y la conferencia **“Superadobe. La tierra se convierte en oro en manos del sabio”** en Junio 2013 en el **Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC)**, en **Madrid (España)**.

Al terminarse la colaboración debido al deseo del doctorando de volver a involucrarse en procesos sociales de larga duración, empezó con el desarrollo de actividades a escala local y se activaron colaboraciones estables con Brasil y Marruecos que, siguen vigentes a día de hoy.

En Brasil se estableció una colaboración con el **Instituto Ambiente Total** y a través de ellos con el **Proyecto Viveiros**, colaborando durante cinco estancias para la organización y el desarrollo en diferentes actividades como los workshop **“BioArquitectura e Tecnologias Socioambientais”** en Enero y Octubre 2013, el **“Festival Locomotiva”** en 2015 en **Piracicaba (Sao Paulo)** o el workshop **“Construcción ligera en Bambú”** en **Carmo do Rio Claro (Minas Gerais)**. Al mismo tiempo se llevaron a cabo actividades docentes en el **Curso Arquitectura e Urbanismo** de la **UNIP (Campus Limeira)** y con la **Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo** de la **Unicamp** así como en colaboración con el **Sindicato dos Arquitectos no Estado de São Paulo**.

En Marruecos se estableció una colaboración con la asociación **Maroc Integral** que enfoca su actividad en la agricultura regenerativa, la construcción ecológica y la gestión del ciclo del agua. El doctorando colabora al proyecto de una granja ecológica para experimentar con los principios de la permacultura en un ambiente desértico. A día de hoy llevaron a cabo una decena de estancias para la formación del personal local en las técnicas necesarias para la construcción de los equipamientos de las granjas, con el desarrollo de diferentes propuestas basadas exclusivamente en los materiales y las tecnologías disponibles localmente.

Mientras tanto se ha desarrollado una continua actividad divulgativa también en Europa. En Mayo de 2011 el doctorando tuvo la oportunidad de participar en la mesa redonda internacional **“Le culture della differenza”** en **Milano (Italia)** en el marco del **Festival ExPolis 2011** de la **Triennale di Milano**, así como en Junio en el workshop **“Estructuras habitacionales de emergencia”** en **La Valletta (Malta)** para el **Simposio internacional “Back to a new future”** y durante la primavera en la exposición colectiva **“Urbanités Inattendues - Evénements construits et appropriations de l'espace”** en **Toulouse (Francia)** organizada por el **Centre Méridional de l'Architecture et de la Ville**.

En Marzo de 2012 participó en la mesa de debate **“Nuevas maneras de trabajar en red”** en Barcelona (España) en el **Colegio de Arquitectos de Barcelona**. En Junio en la exposición colectiva **“Devir Menor - Arquitecturas e práticas espaciais críticas na ibero-america”** en **Guimarães (Portugal)** organizada por la **Sociedade Martins Sacramento** y en la mesa redonda **“Micro-práticas espaciais e processos de produção”** organizada por la **Escuela de Arquitectura de “Universidade do Minho”** en el marco del mismo evento.

En Junio 2013 participó en el **“Festival Internacional de Arquitectura Eme3 - Topias: Utopias becoming Real”** celebrado en el espacio **Fabra i Coats** de **Barcelona (España)** con una estructura geodésica de diseño propio que recibió el tercer premio del evento.

De particular interés en el marco de esta investigación es la participación del doctorando en Agosto de 2014 en el **“Сѣмбиоза - 34th European Architecture Students Assembly Festival (EASA)”** que se celebró en **Veliko Tarnovo (Bulgaria)**. Fundada en Liverpool en 1981 por estudiantes de arquitectura, la asamblea EASA está vinculada al concepto de escuela de invierno, que organiza talleres similares en Reino Unido para estudiantes de arquitectura. EASA celebra desde entonces e ininterrumpidamente cada verano su evento en un país diferente, siendo un referente en los festivales de autoconstrucción por recorrido y tamaño llegando a congregarse más de 500

estudiantes. El festival tiene una duración aproximada de dos semanas y está organizado por estudiantes de arquitectura para estudiantes de arquitectura bajo una mecánica colaborativa. Invitado por la asamblea EASA el doctorando desarrolló el **programa docente “Geometrías Geodésicas”** y se construyó una estructura de ocho metros de diámetro con los estudiantes, siendo la primera ocasión docente en la que el doctorando pudo presentar los avances de su recorrido investigador al público.

En Mayo del mismo año formó parte de la exposición colectiva **“ExPolis 2014”** en las **Scuderie Aldobrandini del Museo Tuscolano de Frascati, (Italia)**.

En Abril de 2015 participó en el proyecto internacional de ciudadanía activa **“PI.G.S”** desarrollado por Escuela Moderna y expuesto en el **Auditorium Arte, “MAAM” Museo dell’altro e dell’altrove de Metropoli de Roma (Italia)**. En Octubre desarrolló un **workshop “Geometrías Geodésicas”** en el marco del **“I Workshop Internacional Escala Local: ecologías de la autoconstrucción”** organizado por el **Campus de Excelencia Internacional Andalucía TECH** y la **Asociación Lógicas Locales “Escala Local”** en **Málaga (España)** y en diciembre volvió a la **Facultad de Arquitectura** de la misma ciudad para impartir la **conferencia “Ciudades en evolución. El arquitecto acompañando al proceso”**.

En Mayo de 2016 el doctorando participó activamente en dos exposiciones en **Venecia (Italia)** y en los múltiples eventos, inauguraciones, presentaciones y conferencias que se celebraron alrededor de ellas. La primera fue **“Taking Care, Progettare per il bene comune / Designing for the common good”**, la **Exposición oficial del Pabellón de Italia para la Bienal**, comisariado por TAMassociati, para el **Padiglione Italia de la Bienal de Venecia de Arquitectura 2016**. La segunda fue **“Spazi d'eccezione”** organizado por S.a.L.E-Docks y Escuela Moderna, celebrado en las **S.a.L.E – Docks**. El mismo año participó en el programa **“Luces de Barrio”** del Ayuntamiento de Sevilla produciendo el equipamiento **“Sorbole”** que fue publicado en el nº121 de la revista **“Entrerayas”** (Grupo Editorial Entre rayas, C.A., Caracas – Venezuela, Septiembre/ Octubre 2017) con un artículo del doctorando.

En Junio de 2017 participó en la **exposición oficial** de la **Biennale d'Architecture de Lyon** titulada **“Atelier Utopies”** en **Lyon (Francia)** con la construcción de una estructura de lamas de persianas y un workshop infantil. Ambas iniciativas se basaron en los avances teóricos desarrollados durante la trayectoria de la presente investigación.

A principios del 2018 participó en la **“Mathematical Art Gallery”**, la **exposición del “2018 Joint Mathematics Meetings”** organizado por la **Mathematical Association of America** y la **American Mathematical Society** que se celebró en **San Diego (Estados Unidos)** en Enero.

Más adelante la **“Bridges Organization”** que organiza la **“Annual Bridges Conference”** sobre conexiones matemáticas en arte, música, arquitectura, educación y cultura, seleccionó un video producido por el doctorando durante el festival **Сymbиоза** para el **“Bridges Short Film Festival”** celebrado en el **Museo Nacional de Ciencia y Tecnología de Estocolmo (Suecia)**.

La participación en eventos de este calibre demuestran el interés interdisciplinar y la relevancia internacional de las propuestas y de los planteamientos del doctorando en diferentes áreas del conocimiento.

En **2017**, la trayectoria profesional de doctorando fue reconocida con el **Curry Stone Design Prize**, premio internacional que busca destacar, honrar y recompensar, las trayectorias profesionales de los que practican la arquitectura desde un enfoque social para contribuir a la mejora de las condiciones de vida de las comunidades de todo el mundo.

El doctorando ha sido **Asistente Honorario de Departamento de Estructuras de la Edificación e Ingeniería del Terreno de la Universidad de Sevilla** durante los cursos académicos 2016/2017, 2017/2018 y 2018/2019 y miembro del grupo de investigación **TEP954 In-Fact de la Universidad de Sevilla**, en el ámbito del cual desarrolla su investigación.

Las producciones del doctorando se pueden encontrar en la página web **“Ctrl+Z”** [www.ctrlz.net]

1.7 Organización del contenido

Esta tesis titulada “Geometrías Geodésicas. Sistemas constructivos low-tech” presenta en su **primer capítulo, Introducción y objetivos**, un cuadro general del objeto, así como la presentación de los antecedentes y objetivos.

Se describe el estado del arte indicando las principales fuentes consultadas y la principales carencias detectadas para la aplicación de estos sistemas en entornos low-tech y bajo esquemas de autoconstrucción.

La metodología se presenta detallando la alternancia entre las fases teóricas y de estudio y las experimentales y de trabajo de campo, que han permitido la continua verificación y revisión de los resultados en todos los campos del conocimiento involucrados incluida la mejora de la adaptabilidad de las propuestas a entornos específicos y la mejora de los protocolos de transferencia tecnológica a las comunidades locales. También se presentan las principales herramientas de trabajo propias de esta investigación.

En la descripción de las experiencias se detallan los recursos humanos y materiales que se utilizaron para su realización, siendo un indicador importante en el marco de los supuestos de esta tesis y su reducción, uno de los objetivos de la presente investigación.

También se introduce la trayectoria profesional del doctorando como parte integrante de la investigación y para la comprensión de la misma .

El capítulo termina presentado la organización de los contenidos de la tesis a lo largo de sus cinco capítulos.

La primera parte del segundo capítulo titulado “Geometrías Geodésicas” presenta el problema de la distribución uniforme de puntos sobre una superficie esférica. A partir de ello introduce las diferentes familias de sólidos regulares y semirregulares así como los conceptos y términos principales necesarios para utilizarlos como base para la subdivisión de una superficie esférica y los métodos tradicionales utilizados para tal fin.

Uno de los objetivos de la presente investigación es el de configurar un sistema de diseño que, gracias a su simplicidad, pueda facilitar la definición de sistemas esféricos complejos.

Para ello, **la segunda parte del capítulo** propone la introducción del SST “**Sistema de Conjunto de Tetraedros**” como una nueva forma de concebir el problema, un punto de partida y un banco de trabajo más eficaz para la gestión de sistemas esféricos.

Este sistema identifica y define el número mínimo de tetraedros esféricos necesarios para describir el sistema geodésico en su totalidad. Este conjunto de tetraedros es capaz de cubrir una superficie esférica sin huecos o solapes y, a partir de cualquier subdivisión, permite definir un sistema con precisión sin requerir conocimientos de trigonometría esférica.

El SST permite, a través de pocos elementos simples y representativos, definir conjuntos muy complejos. La geometría de estos tetraedros, siendo tetraedros esféricos, se rige por normas y sigue procedimientos de cálculo específicos que se analizan y estudian detenidamente para entender sus propiedades y características, destacando las peculiaridades del trabajo sobre un sistema esférico y no euclidiano.

El trabajo local sobre cada tetraedro del conjunto, promueve la detección de la configuración geométrica apropiada y evidencia los datos específicos necesarios para la correcta aplicación en cada sistema constructivo. Al mismo tiempo, este trabajo local repercute sobre el conjunto global ya que la combinación ordenada de estos elementos de base, forma un patrón que describe el sistema completo.

Junto al SST se introducen nuevos conceptos y un nuevo vocabulario, necesarios para operar sobre una superficie esférica. Estos son únicos y se han definido de forma específica para poder trabajar con el sistema propuesto.

La bibliografía ofrece diferentes clases de mallas de subdivisión geodésica, el SST se puede configurar a partir de cualquiera de ellas o generar una propia. Aunque el SST pueda servir perfectamente como herramienta de subdivisión, se ha concebido principalmente para crear los puentes y lazos de continuidad que faltan entre la geometría y su aplicación práctica en los sistemas constructivos.

Las geometrías geodésicas de cada sistema constructivo poseen sutiles diferencias, pequeños detalles que pueden llevar a errores de gran magnitud. En los años '60, cuando se concibieron muchas de las referencias que tenemos hoy en día, el acceso al cálculo computacional era complicado, caro y lento. Hoy día no constituye un gran desafío y puede llevarse a cabo rápidamente en cualquier ordenador o incluso en un terminal móvil.

La potencia de cálculo, sin embargo, no pone remedio a los errores conceptuales que han acompañado y siguen acompañando a estos sistemas constructivos desde su aparición, pudiéndose calcular con extrema precisión datos erróneos.

El SST trata de poner remedio a esta situación, reduciendo las operaciones de adaptación a simples rutinas matemáticas, que pueden ser resueltas incluso gráficamente y son de fácil visualización para promover su mejor comprensión e entendimiento.

La tercera parte de este capítulo se enfoca sobre el aspecto fundamental de la **relación entre la geometría y los sistemas constructivos**. Analiza como ejemplo uno de los sistemas más difundidos para la autoconstrucción de estructuras geodésicas llamado popularmente GoodKarma.

Una vez calculados los datos referentes a este sistema para las frecuencias de subdivisión más comunes (de v_1 a v_4) y de las menos comunes (de v_5 a v_8), se comparan previamente con los obtenidos a partir de la geometría pura (no adaptada al sistema constructivo específico) y a continuación con los adaptados que aparecen en los manuales. Esta comparación evidencia cómo, en estos manuales, la falta de comprensión de la geometría que regula el diseño de estas estructuras con la aplicación, en una superficie esférica, de axiomas y postulados de la geometría euclidiana, acaba empeorando la configuración incluso respecto a los datos propuestos por la geometría pura, o no adaptada a un sistema constructivo específico.

De esta forma se muestra la necesidad de una configuración geométrica específica para cada sistema constructivo y cómo la falta de esta adaptación puede llevar a la aparición de importantes patologías constructivas.

El capítulo dos termina con una **cuarta parte** dedicada a las **geometrías geodésicas** con el objetivo de unir y vincular los conocimientos geométricos teóricos con su aplicación práctica en los diferentes sistemas constructivos.

Se presentan un total de ocho geometrías, algunas de ellas son cerradas y por ello se pueden configurar sistemas geodésicos independientes a partir de ellas, otras son abiertas y se pueden utilizar sólo de forma subordinada en combinación con otras mallas o geometrías.

Las geometrías se presentan juntas y a partir de las relaciones que existen entre diferentes sólidos, y hacen referencia a la primera parte del capítulo, ya que la relación entre varias de las geometrías, siguen y reflejan las existentes entre sólidos de diferentes familias. La mayoría de los sólidos Arquimedianos se pueden obtener aplicando a sólidos Platónicos algunas de las geometrías de subdivisión propuestas y todos los sólidos de Catalán se pueden derivar gracias a ellas de los Arquimedianos.

Se destaca cómo la aplicación de estas geometrías y su combinación puede resultar en configuraciones geométricas muy distintas y en los siguientes capítulos se muestra cómo cada

decisión de diseño que se tome en esta fase puede afectar de forma importante al nivel tecnológico requerido para la construcción de la estructura propuesta.

La comprensión de la multiplicidad de las mallas y geometrías geodésicas aplicables constituye un importante avance hacia la comprensión de las normas que regulan su diseño e implementación. La tesis propone trabajar con ellas no sólo a partir de la geometría de los sólidos de base, sino sobre todo a partir de las introducidas por el SST, aportación de esta investigación.

Una vez demostrado que existen una gran variedad de geometrías geodésicas y diversas mallas geodésicas distintas, el **tercer capítulo** se adentra en el universo de los **sistemas constructivos** con los que éstas se pueden implementar.

Existen numerosos sistemas constructivos diferentes, el objetivo de este capítulo es la creación de una herramienta de catalogación que permita identificar y caracterizar cada uno de ellos. Cada sistema implica una serie de variables que combinadas definen su geometría y el nivel tecnológico necesario para su implementación.

Durante el desarrollo de la investigación y con el apoyo de las experiencias constructivas realizadas, se han ido introduciendo, descartando y definiendo estas variables, organizándolas de forma jerárquica, hasta la articulación de una catalogación capaz de definir la geometría y el nivel tecnológico de cada sistema.

A partir de esta clasificación es posible individualizar los sistemas más aptos para su uso en entornos low-tech o en general el más adaptado a cada necesidad de diseño o a los materiales y tecnologías disponibles. No existe una combinación óptima universal, sino que la aplicabilidad depende de cada contexto, de los usos y de los recursos disponibles, y el catálogo producido se propone como una herramienta eficaz de selección e implementación. El catálogo analiza cada sistema constructivo presentando tres familias principales, Unión Geométrica Independiente, Unión Radial y Unión Tangencial, y caracteriza los tipos de ángulos involucrados en su configuración. A partir de ellos se introducen una serie de variables relacionadas con la geometría y el diseño, como el número, tipo y posición de las mallas, o el método de cálculo implicado.

Los resultados de este catálogo no sólo son la primera clasificación conocida de sistemas constructivos para estructuras geodésicas, sino que se ha logrado que los resultados presentados sean válidos independientemente de la clase y método de subdivisión, lo que permite que sean universalmente aplicables. La gran variedad de sistemas presentados demuestra que las cúpulas geodésicas no son un sólo sistema constructivo y que existe una gran variedad de formas diferentes para construir estructuras geodésicas, cada una de las cuales responde a normas específicas.

Las familias y variables presentadas en el tercer capítulo se ven finalmente materializadas en el **cuarto capítulo Experiencias y protocolos** que describe 24 construcciones experimentales, que el autor ha desarrollado con estos sistemas constructivos desde el año 2010.

La práctica en la materia ha sido fundamental para experimentar los avances teóricos en situaciones y casos reales y, a partir de ellas, profundizar en el conocimiento y diseñar nuevas estrategias para su aplicación en entornos low-tech.

El capítulo presenta los diferentes enfoques utilizados y describe los avances que permiten hoy día elaborar soluciones prácticas y sencillas a los problemas geométricos y constructivos que a menudo acompañan a estos sistemas constructivos. La aplicación práctica ha obligado, y al mismo tiempo ha permitido revisar y descartar los conocimientos populares y folclóricos sobre estas tecnologías, evitando compartir los errores que estos conocimientos traen consigo de experiencias pasadas, definiendo nuevas configuraciones para mejorar aplicaciones futuras.

Finalmente, el **quinto capítulo** presenta las **Conclusiones** y las posibles líneas futuras de desarrollo de la investigación presentada, así como las estrategias para su difusión.

CAP 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archipedagogie. (2016). Children's Geodesic Workshop. Retrieved June 3, 2018, from <http://www.archipedagogie.org/fiche-action-pédagogique/childrens-geodesic-workshop>
- Baer, S. (1968). *The dome cookbook*. (Autoeditado, Ed.). United States: Lama Foundation.
- Biennale Architecture de Lyon. (2017). Accueil - Biennale Architecture Lyon 2017. Retrieved June 1, 2018, from <http://www.biennalearchitecturelyon.com/>
- Boyt, R. (1970). *An alternate method of spanning space with a compound curvature*. No publicado.
- Centre Méridional de l'Architecture et de la Ville. (2011). Urbanités inattendues. Retrieved June 1, 2018, from <https://www.cmaville.org/expositions/itinerantes/urbanites-inattendues/>
- Clinton, J. D. (1965). *Structural design concepts for future space missions*. Washington, United States: NASA Contract, Progress Report.
- Clinton, J. D. (1971). *Advanced structural geometry studies. Part I. Polyhedral Subdivision concepts for structural applications*. Washington, United States: NASA Contract, Progress Report.
- CMAYOT. (2016). VI Certamen Reciclar Arte. Retrieved June 2, 2018, from <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portales/menuitem.6ffc7f4a4459b86a1d aa5c105510e1ca/?vgnextoid=d2bed8de83c73410VgnVCM>
- COAC. (2012). Col·legi d'Arquitectes de Catalunya. Retrieved June 1, 2018, from <https://www.arquitectes.cat/es>
- CSIC. (2013). Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Retrieved June 1, 2018, from <https://www.ietcc.csic.es/>
- Curry Stone Foundation. (2018). Is architecture more about community participation than materials?. Retrieved June 3, 2018, from <https://currystonefoundation.org/practice/ctrlz/>
- Di-Carlo, B. (2013). *Strutture geodetiche*. Italia: Lulu.com.
- EASA, A. (2018). European Architecture Student Assembly. Retrieved June 1, 2018, from <https://easaurope.wordpress.com/>
- Eme3. (2016). International Architecture Festival Barcelona. Retrieved June 1, 2018, from <http://eme3.org/2016/>
- Escuela Moderna, S. D. (2016). *Spazi d'eccezione*. Milán, Italia: Frontiere.
- FCG. (2012). Fundação Cidade de Guimarães. Arquitecturas e práticas espaciais críticas na Ibero-américa. Retrieved June 1, 2018, from <http://devirmenor2012guimaraes.com/>
- François Delotte. (2018). Architecture: Faites confiance aux enfants! *Sans Transition: La Revue Des Citoyens Engagés*, (12), 22–28.
- Kahn, L. (1970). *Domebook*. United States: Shelter Publications.

- Kahn, L. (1971). *Domebook 2*. United States: Shelter Publications.
- Kahn, L. (1973). *Domebook 3*. United States: Shelter Publications.
- Kenner, H. (1976). *Geodesic math and how to use it*. United States: University of California Press.
- Kruschke, D. (1972). *Dome cookbook of geodesic geometry*. United States: Kruschke.
- La Biennale di Venezia. (2016). Taking Care | Progettare per il bene comune. Retrieved June 1, 2018, from <http://www.takingcare.it/>
- La Triennale di Milano. (2011). Retrieved June 1, 2018, from <http://www.triennale.org/>
- Lotufo, V. A., & Lopes, J. M. A. (1981). *Geodésicas & Cia*. Sao Paulo, Brasil: Projeto Editores Associados Ltda.
- MAA National Meetings. (2018). Joint Mathematics Meetings 2018. Retrieved June 1, 2018, from http://jointmathematicsmeetings.org/meetings/national/jmm2018/2197_program.html
- Popko, E. (1967). *Geodesics*. Michigan, United States: University of Detroit Press.
- Popko, E. (2012). *Divided spheres: Geodesics and the orderly subdivision of the sphere*. A K Peters/CRC Press. <http://doi.org/10.1201/b12253>
- Prenis, J. (1973). *The Dome Builder's Handbook*. United States: Running Press.
- Sabuzi, M. (2015). El nodo: manuale di autocostruzione in Messico. *Officina*, (5), 28–33.
- SASP. (2016). Sindicato dos arquitetos no estado de São Paulo. Retrieved June 1, 2018, from <https://www.arquiteto-sasp.org/blog/tag/oficinas>
- Soria, E. (2012). Arquitectura reversible, entrevista a Luca Stasi. *Summa+*, (122), 92–97.
- Stasi, G. (2011). Intervenții sociale. *Zeppelin*, (100), 90–95.
- Stasi, G. (2017). Sorbole. Equipamiento para huertas urbanas. *Entre Rayas*, (121), 58–60.
- Stuart, D. (1955). On the orderly subdivision of spheres. *Student Publication of the School of Design, North Carolina State University, Raleigh*, 5(1), 23–33.
- The Bridges Organization. (2018). The Bridges Organization - Bridges 2018. Retrieved June 1, 2018, from <http://bridgesmathart.org/bridges-2018/>
- UNICAMP. (2013). Retrieved June 1, 2018, from <https://www.fec.unicamp.br/>
- United-Nations. (2012). The Dubai International Award For Best Practice | UN-Habitat. Retrieved June 1, 2018, from <https://unhabitat.org/dubai-award/#>
- Universidade do Minho, (2012). Escola de Arquitetura. Retrieved June 1, 2018, from <https://www.arquitetura.uminho.pt/pt>
- Universidade Paulista. (2015). Retrieved June 1, 2018, from <http://www.unip.br/presencial/universidade/campi/limeira.aspx>

Weninger, M. (1999). *Spherical models*. New York: Dover.

Yarnall, W. (1978). *The Dome Builder's Handbook*. n°2. United States: Running Press.

Zhucun, Z. (2011). A Mexico participatory cultural center made of containers. In *Chinese and Oversea Landscape* (pp. 106–111). Pekín, China: Jiangsu people's publishing LTD.