

Naturaleza, Sinergia, Tensegridad y Biotensegridad, ¿es $1 + 1 = 4$? Nature, Synergy, Tensegrity and Biotensegrity, ¿is $1 + 1 = 4$?

Castro Arenas, Cristhian

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Instituto de la espacialidad Humana, Centro Laboratorio de Morfología, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería, Laboratorio de Biomecánica e Ingeniería para la Salud, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
ccastroarenas@gmail.com

Miralles, Monica

Universidad de Buenos Aires/Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Centro de Investigación en Diseño Industrial de Productos Complejos, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería, Laboratorio de Biomecánica e Ingeniería para la Salud, Ciudad Autónoma de Buenos Aires,
mmiralles@gmail.com

Abstract

The optimization of resources in nature has stimulated the creation of strategies to facilitate the interchange of energy, matter and information. Observation of these natural phenomena allowed Fuller to develop the concept of Tensegrity Systems in the 50's, generating a growing integration of multidisciplinary views on this subject. In this paper Tensegrity is postulated, given its peculiar synergistic qualities, as a paradigmatic and emergent concept in the projectual disciplines, both as a type of system displaying reciprocal interactions between a given number of nodes, and as a structural system with potential applications in multiple, evolving, scientific-technological fields.

Keywords: Sinergy; Tensegrity; Biotensegrity; Fuller; Systems.

1. La tensegridad pre - Fulleriana

Toda revolución conceptual se va gestando en el tiempo. En el contexto de la tensegridad se puede hablar de un antes y un después de Fuller.

Se puede identificar una serie de fuentes inobjetables que representan claramente los antecedentes más relevantes del campo. El artista Karl loganson presenta una exposición de sus obras, llamadas "Estructuras Espaciales" (Пространственные конструкции), en Rusia, en 1921 (Gough, 1998). Treinta años después, en Francia, el arquitecto David Emmerich desarrolla y patenta un sistema de estructuras livianas al cual llama "Redes autotensadas" (Réseaux Autotendants) (Emmerich, 1964). El, por entonces, joven artista Keneth Snellson crea sus primeros sistemas tensados con fines esculturales -que patenta en 1965-, a los cuales denomina "Estructuras de Compresión Discontinua" (Discontinuous Compression Structures) (Snelson, 1965).

Pero es el arquitecto Buckminster Fuller, maestro de Snelson, quien acuña el neologismo "Tensegrity" (traducido al español como "Tensegridad" según Gomez-Jáuregui, 2007), contracción de "Integridad tensional", para definir el sistema estructural que describe en 1961 (Fuller, 1961) y patenta - no sin controversias - en 1962, bajo el nombre de "Tensile-Integrity Structures" (Fuller, 1962; Jauregui, 2009).

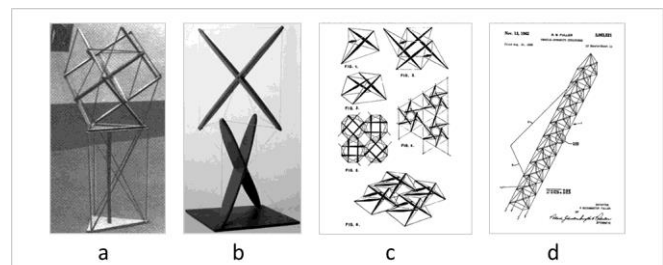


Figura 1: Obras y patentes originarias del sistema de tensegridad:

- a) Estructuras espaciales, Karl loganson, 1921.
- b) X-Module, Kennet Snellson, 1948.
- c) Redes autotensadas. George Emmerich, 1950.
- d) Tensile-Integrity Structures, Buckminster Fuller, 1955.

2. Fuller y las "Islas de compresión en un mar de tracciones"

Como todo adelantado a su época, B. Fuller, es fuertemente influenciado por la Teoría General de los Sistemas Complejos (TGSC), iniciada por Bertalanffy (Bertalanffy, 1968) en los años 60, al punto que la tensegridad formará parte de sus extensas "exploraciones de la geometría del pensamiento", en su obra Synergetics (Fuller R. & Applewhite E., 1975).

Este enfoque, revolucionario para la resolución de problemas, rápidamente impregna todos los campos del pensamiento, desde el extremadamente aplicado (cibernética) (Wiener, 1985) hasta los más especulativos (Morin, 1994).

Su aporte, fundamental para el presente trabajo, ha sido teorizar esta nueva mirada desde este tipo particular de "complejidades".

La tensegridad representa un tipo particular de equilibrio dinámico, logrado gracias a una configuración espacial tridimensional de triangulaciones de fuerzas opuestas (tracción y compresión). De acuerdo a la naturaleza de las uniones (nodos) y de los elementos constitutivos (compresores, tensores) que materializan el sistema, genera calidades y cualidades emergentes, resultantes de la organización específica de esa particular determinación configurativa, como es la condición de autoestabilidad. Es decir, se pone en evidencia la sinergia propia del sistema, en esta particular optimización del flujo de energía.

De allí que la primera generalización conduce a pasar del concepto al principio: "a structural-relationship principle in which structural shape is guaranteed by the finitely closed, comprehensively continuous, tensional behaviors of the system and not by the discontinuous and exclusively local compressional member behaviors."¹

Sus investigaciones lo llevaron a establecer como principios fundamentales de la tensegridad:

- 1) la existencia de elementos dedicados a transmitir este tipo de esfuerzos por separado,
- 2) la necesaria triangulación de los mismos para obtener estabilidad estructural y,
- 3) la relación discontinua y aislada de los elementos comprimidos junto a la integridad y coherencia de los elementos traccionados.

Esta última característica lo llevó a describir el sistema como "Islas de compresión en un mar de tracciones".

Fuller consideraba *objetos* a todo aquello que ocupa un lugar en el espacio o en el tiempo, lo cual incluye desde las barras y cables de sus tensegridades, hasta las ideas. Los objetos con sinergia (aquellas combinaciones de objetos que dan lugar a un todo, imposible de explicar a partir de sus elementos aislados) los llama *sistemas*. Es decir, para Fuller, los objetos con sinergia son sistemas. Ello no niega la existencia de objetos sin sinergia, como puede serlo una mera acumulación de objetos independientes, sin interacción entre ellos (como lo son las barras y los tensores antes de

ser relacionados). Con los sistemas sinérgicos se puede, a su vez, generar nuevos sistemas sinérgicos y formar toda una jerarquía de complejidad creciente.

Cuando se habla de sistemas, todos coinciden en que se trata de un conjunto de partes coordinadas y en interacción para alcanzar un conjunto de objetivos. En el caso de la tensegridad uno de ellos es la autoestabilidad.

Fuller, al poner en cuestión si $1+1=2$, pone en juego una ambigua y bien conocida figura retórica, la ironía, para decir que cualquier sistema difiere de la mera suma de sus partes, pero además, subraya al mismo tiempo que "la verdad", en el razonamiento proyectual, es de naturaleza diferente a aquella contenida en los sistemas axiomáticos del pensamiento deductivo. De forma análoga a las sales de plata en un negativo fotográfico, en el último caso, irán emergiendo los teoremas, pero ninguna conclusión aportará algo nuevo que no haya estado, previamente, contenido allí. La novedad está asociada a otro tipo de razonamientos que no conservan la verdad, pero, como aquellos que utilizan estrategias de triangulación, la sinergia de los mismos es la que permite modelar a diferentes niveles de abstracción.

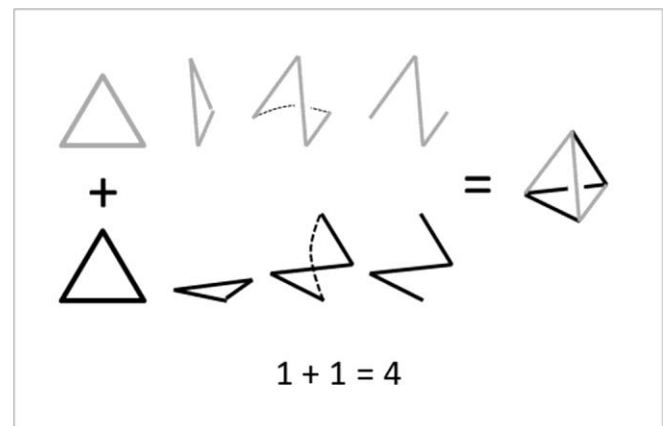


Figura 2. Triángulo y tetraedro: Sinergia

3. La tensegridad post – Fulleriana y la Biotensegridad

Fuller puso en evidencia la relación de la tensegridad con sistemas estructurales naturales y sugirió su coherencia de manera abarcativa, planteando su existencia desde la escala atómica a la planetaria, encontrando y proponiendo la correspondencia morfológica y estructural de los sistemas de tensegridad con sistemas orgánicos e inorgánicos. Éste enfoque fue olvidado y retomado años más tarde en el campo de la biomecánica, a nivel celular y de la anatomía humana, dando origen a la Biotensegridad.

Fue Donald Ingber, biólogo celular y bioingeniero, quien tomó el icosaedro de tensegridad para modelar el citoesqueleto celular. Esta mirada le permitió aumentar la comprensión de la relación entre la matriz extracelular (y del núcleo) en respuesta al entorno, como las modificaciones mecánicas de

¹ Traducción del autor: "Un principio de relación estructural en el cual la forma estructural está garantizada por el comportamiento tensional finitamente cerrado e integralmente continuo del sistema y no por el comportamiento discontinuo y exclusivamente local de los miembros comprimidos (Fuller. Synergetics. 700.011).

la estructura celular y ciertas reacciones bioquímicas en su interior. El resultado fue su modelo de mecanotransducción celular (Ingber, 1993, 1997, 2003a, 2003b).

Por su parte, Stephen Levin desarrolló su teoría partiendo del análisis biomecánico del hombro y la pelvis como sistemas análogos al icosaedro de tensegridad y a la rueda de bicicleta (Levin, 2000). Más tarde realizaría la extensión a todo el sistema músculo esquelético con la ayuda del artista Tom Flemons. Al desarrollar este modelo completo, incluyó varios niveles jerárquicos de relaciones biomecánicas, incluyendo la fascia, ligamentos, tendones y músculos como red de tensión integrada y el conjunto óseo como elementos comprimidos con diferentes grados y tipos de "aislamiento", según el tipo de relación (articulación) que los vincula (Levin, 2006).

3.1 La tensegridad como sistema estructural para aplicaciones innovadoras

Una de las más destacadas y recientes aplicaciones es la llamada "Robótica Suave" (Soft robotics).

Existe un interés creciente por implementar el uso de estructuras suaves y deformables en sistemas robóticos. Su objetivo es desarrollar sistemas que permitan la manipulación de objetos delicados o desconocidos con precisión, la locomoción en terrenos irregulares y el contacto físico tanto con células y tejidos, como con el ser humano. Por tal motivo, se ha explorado el desarrollo de diferentes materiales y estructuras, llegando a usar desde hace algunos años, sistemas de tensegridad (Rieffel & Lipson, 2008).

El MIT, la NASA y la Universidad de Berkeley, cuentan con laboratorios dedicados al desarrollo de robots con características de sistemas de tensegridad. Estas investigaciones apuntan al desarrollo de productos que van desde robots biomórficos (Ananthanarayanan, Azadi, & Kim, 2012) hasta habitáculos, satélites y naves de exploración espacial (SunSpiral, Agogino & Atkinson, 2013).

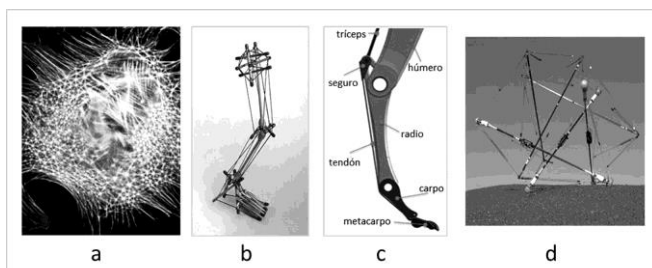


Figura 3: Sistemas biológicos y bioinspirados de tensegridad:

- a) Microfotografía del citoesqueleto. Se aprecia la red de filamentos de actina, generando la red tensada continua (Ingber). b) Modelo de biotensegridad de la pierna humana (Levin). c) Pata robótica bioinspirada en una cheeta con aplicación de tensegridad (MIT). d) SuperBall. Robot de exploración planetaria (JPL-NASA).

4. La tensegridad como sistema de relaciones recíprocas

La reciprocidad alude, en forma general, a un comportamiento dado entre dos o más nodos, elementos,

partes o componentes de un sistema, entre las cuales se establece una relación bidireccional y equitativa de intercambio, ya sea de energía, información o materia, tendiente a encontrar un estado de equilibrio.

En los sistemas estructurales de tensegridad, dicha reciprocidad está dada de manera omnidireccional entre los componentes traccionados y comprimidos, dispuestos en el espacio tridimensional y es transmitida entre sus nodos, obteniendo reacciones que equilibran todo el sistema de manera sinérgica. Desde este punto de vista, las relaciones que establecen los nodos en las tensegridades corresponden al tipo de relaciones que conforman sistemas como el de las Estructuras Recíprocas o Nexórades, refiriéndose a un tejido recíproco espacial.

Esos sistemas de relaciones han sido incorporados para modelar problemáticas en campos tan variados y complejos como el social, económico, ecológico y educativo, sólo por mencionar algunos. Stafford Beer, académico dedicado a la investigación operacional y la cibernética organizacional, desarrolló el llamado Team Syntegrity, un sistema de trabajo en equipo, cuya metodología permite a un grupo de personas trabajar en red, optimizando los tiempos, aprendizajes y toma de decisiones frente a problemas complejos (Beer, 1994).

5. ¿Cómo se puede caracterizar la sinergia de un sistema de tensegridad? ¿Cómo se relacionan la sinergia de la tensegridad con aquella de la biotensegridad?

Para responder a estas preguntas es necesario caracterizar la complejidad de los sistemas de tensegridad, cualquiera sea su grado de abstracción. Ello implica: a) identificar por un lado la cantidad de elementos de un sistema (complejidad cuantitativa), b) sus potenciales interacciones (conectividad) y c) el número de estados posibles que se producen a través de éstos (variedad, variabilidad). Es decir, que la complejidad sistémica está en directa proporción con su variedad y variabilidad, por lo tanto, es siempre una medida comparativa.

Por esta razón, se ha iniciado una investigación experimental, sistemática, que se enfoca en una propiedad dinámica: los modos normales de vibración de las estructuras de tensegridad. Estos modos son tridimensionales y son de especial interés para el diseño de éstas estructuras. Se han construido diferentes módulos de tensegridad, y torres de dos y tres unidades para realizar comparaciones (Castro Arenas, Gherzi, Miralles, 2016). También se han estudiado los modos de vibración de tres sólidos platónicos de tensegridad (cubo, icosaedro y octaedro), para poner en evidencia las diferencias en el comportamiento dinámico, ligadas a las profundas relaciones de simetría, bien conocidas en estas morfologías, y a su amplia presencia en sistemas naturales (Castro Arenas et al, 2016).

Ello nos permite ir evaluando una característica fundamental de estas complejidades que es la *recursividad*. Fuller habla de recursividad cuando cada una de las partes (p.ej. subsistemas bien diferenciados) conserva las propiedades o funciones del sistema global del que a su vez, son parte.

En nuestro caso, y a partir del estudio de los modos normales de vibración, el apilamiento de módulos simplex para conformar agrupaciones 3-bar SVD, uno de los resultados es la conservación del modo de vibración alrededor de los 50 Hz, tanto en el módulo base aislado, como cuando se construye una agrupación lineal de dos y tres etapas. Sin embargo, hay todo un conjunto de modos que son propios de cada forma estructural por separado, y otros que sólo son exclusivos de una jerarquía mayor. Como es evidente a partir de este ejemplo, se trata de un concepto asociado a un orden jerárquico, como era de esperar.

De este modo, para diferenciar la sinergia en las estructuras de tensegridad y aquellas de biotensegridad será necesario partir de la naturaleza misma de los objetos sinérgicos que las componen, definiendo niveles de complejidad que se pueden pensar como el número de estados posibles que puede alcanzar un sistema o subsistema. Ellos serán función de la calidad y cualidad de las relaciones que los elementos entablen, así como de las simetrías y demás características morfológicas asociadas a cada caso.

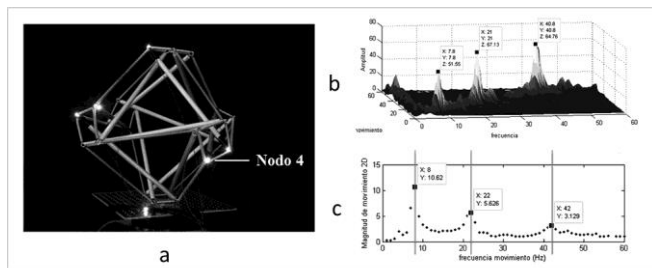


Figura 4: Estudio dinámico de tensegridades:

- a) Octaedro de tensegridad, instrumentado,
- b) Visualización 3D de los modos de vibración del nodo 4 en el eje X,
- c) Visualización 2D de la magnitud de vibración del nodo 4 en los ejes X e Y (LaBIS, 2015)

Discusión y conclusiones

En este trabajo se ha presentado una escueta línea de tiempo de cómo la tensegridad se viene enriqueciendo desde comienzos del siglo pasado para, a partir de la década de los 80, volverse un concepto ligado a la innovación.

Se abordan algunas de las cuestiones asociadas a implementar una metodología teórico-práctica que permita comenzar a explorar tensegridades particulares (caracterización de los modos normales de vibración).

La mayoría de los sistemas que tienen utilidad en el mundo real, ya sea natural o artificial, cuentan con un sistema de control que implica una estrategia, un propósito, un objetivo. Aquí reside la mayor diferencia entre ambos mundos. La biomimética es una de las grandes herramientas desarrolladas para dar respuesta a este problema (Sanchez,

Arribart & Guille, 2005). La diferencia reside en que los seres vivos son sistemas abiertos. Para ellos, Katz y Kahn (1970), distinguen 5 funciones o subsistemas que deben cumplir los sistemas abiertos para ser viables, a saber: a) de producción, b) de apoyo, c) de mantención, d) de adaptación, que buscan llevar a cabo los cambios necesarios para sobrevivir en un medio en cambio y e) los sistemas de dirección, encargados de coordinar las actividades de cada uno de los subsistemas y tomar decisiones en los momentos en que aparece necesaria una elección.

Pero las estructuras de tensegridad están en un nivel más bajo dentro de la escala jerárquica de Kenneth E. Boulding (1956). El primer nivel lo ocupan las estructuras estáticas o marcos de referencia. El siguiente son los sistemas dinámicos simples con movimientos predeterminados, en el tercero se encuentran los que cuentan con mecanismos de control (cibernéticos) en los cuales el sistema se moverá dentro de los límites programados. Hasta aquí llegamos con las estructuras de tensegridad propiamente dichas.

El próximo nivel es el de los sistemas abiertos típicos de la vida, caracterizados por propiedades tales como la auto-reproducción y el auto-mantenimiento, en el cual entrarían las biotensegridades. De allí en más, las jerarquías siguen creciendo en generalidad hasta llegar a la novena, denominada trascendente, en donde se encontraría el absoluto.

El equilibrio, la autoestabilidad, el atributo fundamental de los sistemas de tensegridad, difiere de aquél de los sistemas abiertos que necesariamente requieren la importación de recursos provenientes del ambiente, que son flujos de intercambio de energía, materia o información. Es allí en donde se hace necesaria la mirada interdisciplinar del biodiseño, para lograr la integración de conocimientos que propicien la concepción de propuestas innovadoras en los más diversos campos.

Referencias

- Ananthanarayanan, A., Azadi, M., & Kim, S. (2012). Towards a bio-inspired leg design for high-speed running. *Bioinspiration & biomimetics*, 7(4), 046005. DOI 10.1088/1748-3182/7/4/046005.
- Ashby, W. R. (1956). *An Introduction to Cybernetics*. Chapman and U, London.
- Boulding, K. E. (1956). General systems theory-the skeleton of science. *Management science*, 2(3), 197-208.
- Castro Arenas, C., Gherzi, I., Miralles, M. (2016). Biomechanics and Biotensegrity: Study Method and Frequency Response of the Simplex and 3-bar-SVD Tensegrity Configurations. *Journal of Physics: Conference Series*, 705(1).
- Castro Arenas, C., Gherzi, I., Miralles, M. (2016). Platonic Tensegrities: dynamic aspects and characterization. Enviado para evaluación al VII Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica.

- Emmerich, D. (1964) Construction de Reseaux Autotendants, Patente Francesa No. 1,377,290. 28 Sep 1964. Recuperado de <http://www.tensegridad.es/Publications/Patents/Emmerich/FR1377290A.pdf>
- Fuller, R.B., (1961). Tensegrity, Portfolio and Art News Annual, 4, 112-127, 144-148. Disponible en <http://www.rwgrayprojects.com/rbfnote/fpapers/tensegrity/tenseg01.html>, Consultado 22-03-16.
- Fuller, R.B., (1962) Tensile-Integrity Structures U.S. Patente estadounidense, No. 3,063,521. 13 Nov 1962. Recuperado de <http://www.tensegridad.es/Publications/Patents/Fuller/US3063521A.pdf>
- Fuller, R.B., Applewhite E. J., (1975). Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking, Macmillan Publishing Co. Inc. Disponible en <http://www.rwgrayprojects.com/synergetics/synergetics.html>. Consultado 22-03-16.
- Gough, M. (1998). In the laboratory of constructivism: Karl loganson's cold structures. October, 84, 91-117.
- Ingber, D. E. (1993). Cellular tensegrity: defining new rules of biological design that govern the cytoskeleton. Journal of cell science, 104, 613-613.
- Ingber, D. E. (1997). Tensegrity: the architectural basis of cellular mechanotransduction. Annual review of physiology, 59(1), 575-599.
- Ingber, D. E. (2003a). Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology. Journal of cell science, 116(7), 1157-1173.
- Ingber, D. E. (2003b). Tensegrity II. How structural networks influence cellular information processing networks. Journal of cell science, 116(8), 1397-1408.
- Jáuregui, V. G. (2007). Tensegridad: estructuras tensegríticas en ciencia y arte. Ed. Universidad de Cantabria.
- Jáuregui, V. G. (2009). Controversial origins of Tensegrity. International Association of Spatial Structures IASS Symposium 2009, Editorial Universitat Politècnica de Valencia.
- Katz, D., & Kahn, R. (1970). Open-systems theory. Readings on Organization Theory: Open-Systems Approaches, 13-32.
- Levin, S. M. (2000). Put the shoulder to the wheel: a new biomechanical model for the shoulder girdle. MechanoTransduction. Societe biomechanique, Paris, 131-136.
- Levin, S. (2006). Tensegrity: the new biomechanics. Textbook of musculoskeletal medicine, 9.
- Morin, E., & Pakman, M. (1994). Introducción al pensamiento complejo. Barcelona: Gedisa.
- Rieffel, J., Trimmer, B., & Lipson, H. (2008). Mechanism as Mind-What Tensegrities and Caterpillars Can Teach Us about Soft Robotics. ALIFE, 506-512.
- Sanchez, C., Arribart, H., & Guille, M. M. G. (2005). Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. Nature materials, 4(4), 277-288.
- Snelson, K. (1965) Continuous Tension, Discontinuous Compression Structure. Patente estadounidense, No. 3,169,611. 6 Feb 1965. Recuperado de <http://www.tensegridad.es/Publications/Patents/Snelson/US3169611A.pdf>
- SunSpiral V., Agogino A., & Atkinson D. (2015) Super Ball Bot - Structures for Planetary Landing and Exploration, NIAC Phase 2 - Final Report. NASA Innovative Advanced Concepts (NIAC) Program. NASA Ames Research Center. Intelligent Systems Division. Recuperado de NASA Technical Report Server (NTRS) <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160000577.pdf>
- Von Bertalanffy, L. (1968). General systems theory. New York, 41973, 40.
- Wiener, N. (1985). Cibernética o el control y comunicación en animales y maquinas. Tusquets.