

Lima, 09 de octubre del 2023

Señor Doctor

David Palomino Montes

Ejecutivo de Proyectos - Unidad de Monitoreo

Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico e Innovación – PROINNOVATE

PRO INNOVATE: PROYECTOS DE INNOVACIÓN EMPRESARIAL

CONVENIO N° 470-PROINNOVATE-PIEC1-2022

Estimado Dr. Palomino,

Mediante la presente, es grato comentarle que el artículo de difusión ***“Paneles Fotovoltaicos Plegables: La Innovación Inspirada en el Origami”***, basado en el proyecto de *Innovación Empresarial desarrollado por la empresa Dinamo Tecnologías y la Pontificia Universidad Católica del Perú*, será publicado en la 4ta edición de nuestra revista especializada **FABRICUM PUCP**, del Departamento de Ingeniería de nuestra casa de estudios, a realizarse durante el mes de noviembre.

Así mismo, confirmamos la inclusión de dicho artículo de difusión del proyecto arriba mencionado.

Sin otro particular, quedamos de usted.



PASTOR DAVID CHÁVEZ MUÑOZ
DIRECTOR

Firmado digitalmente por Pastor
David Chávez Muñoz
DN: cn=Pastor David Chávez
Muñoz gn=Pastor David
Chávez Muñoz c=PE Peru
l=PE Peru o=Pontificia
Universidad Católica del Perú
ou=FABRICUM
e=dchavez@pucp.edu.pe
Motivo: Soy el autor de este
documento
Ubicación:
Fecha: 2023-10-11 17:18-05:00



Isabel Quispe Trinidad
Presidente, Comité Editorial
Revista Fabricum PUCP

Paneles Fotovoltaicos Plegables: La Innovación Inspirada en el Origami

Enrique Pujada Gamarra & Davy Olivera Oliva
Dinamo Tecnologías SAC

Daniel Lavayen Farfán & Jorge Rodríguez Hernández
Sección Ingeniería Mecánica – Departamento Académico de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica del Perú

El origami es el antiguo arte japonés de plegar papel [1]. El objetivo de dicho arte está enfocado en los dobleces y lograr formas en tres dimensiones a partir de hojas de papel plano y sin realizar cortes. El origami y sus variantes han sido fuente de inspiración para ingenieros y científicos durante décadas y sus aplicaciones se han extendido a diversos campos como la robótica, la medicina, industria aeroespacial entre otras.

Entre los ejemplos más interesantes, Oru Kayak [2] ha desarrollado el diseño de un kayak que aplica el origami para poder ser transportado y almacenado con poco espacio, la página del creador [2] muestra los nuevos modelos que tienen y han sido exitosamente introducidos en el mercado. Por otro lado, también existen aplicaciones de seguridad. El origami se puede emplear para construir escudos a prueba de balas para proteger a los agentes de seguridad, combinando innovaciones de Origami y Kevlar® [3]. De esta manera, se obtienen escudos ligeros, plegables y altamente resistentes. La NASA también ha aplicado el origami para poder desplegar un sistema de paneles solares para la estación internacional, que replegado medía 2.7 metros de diámetro y desplegado totalmente llega a 25 metros [4], ver fig. 1.

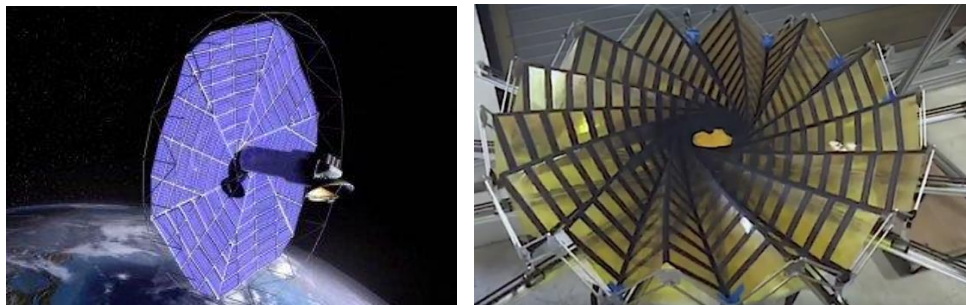


Figura 1. Ejemplo de aplicación aeroespacial del origami para paneles fotovoltaicos (a) Desplegado (b) Replegado. Imagen obtenida de [4].

En esa línea, y teniendo como foco las energías renovables, se ha desarrollado un proyecto de investigación y desarrollo, como un trabajo conjunto entre la Pontificia Universidad Católica del Perú y la empresa Dinamo Tecnologías S.A.C. Se ha logrado desarrollar paneles fotovoltaicos plegables inspirados en una técnica específica de origami llamada Miura-Ori. Este proyecto ha sido financiado por ProInnovate a través del fondo de Innovación Empresarial, bajo el convenio N° 470-PROINNOVATE-PIEC1-2022 y se busca implementarlo en aplicaciones navales y mineras.

¿Qué es el Miura-Ori?

Existen muchos tipos de origami, uno de los más conocidos es el patrón Miura-Ori, el cual es uno de los más estudiados de manera analítica, matemática y mecánica. Miura-Ori fue inventado en 1985 por Koryo Miura, astrofísico japonés. El patrón Miura-Ori tiene múltiples ventajas, principalmente el lograr de una amplia área plana y replegarse en una pequeña área simplemente realizando un movimiento diagonal. De esta manera es posible conseguir la tan denominada memoria de forma o “shaped memory”. El concepto se desarrolló para realizar dobleces paralelos basados en Miura-Ori y así imitar a las hojas de frejol antes y después de su doblado [5]. Este ejemplo se puede apreciar en la Fig. 2.

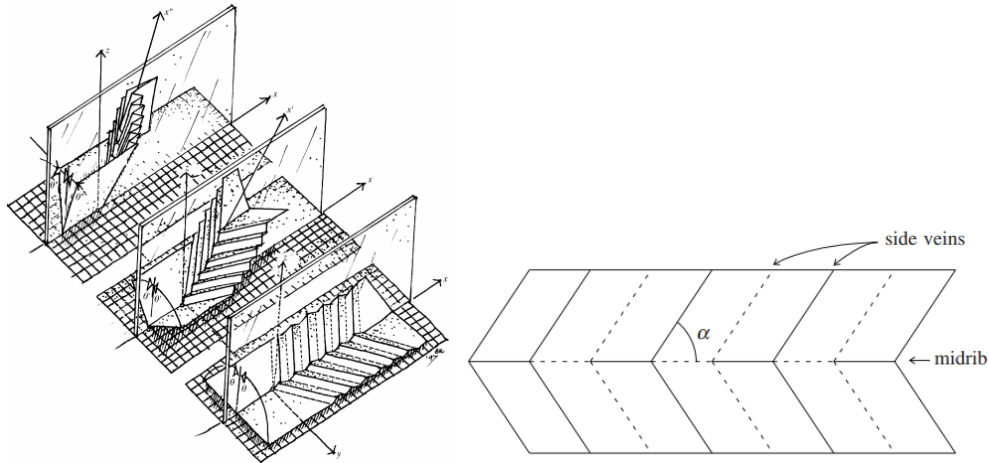


Figura 2. Planteamiento aplicando dobleces paralelos Miura-Ori. Imagen obtenida de [5].

Estas innovaciones motivaron el desarrollo de paneles solares inspirados en Miura-Ori, los cuales podrían plegarse y desplegarse para el transporte [6], tal como se muestra en la Fig. 3.

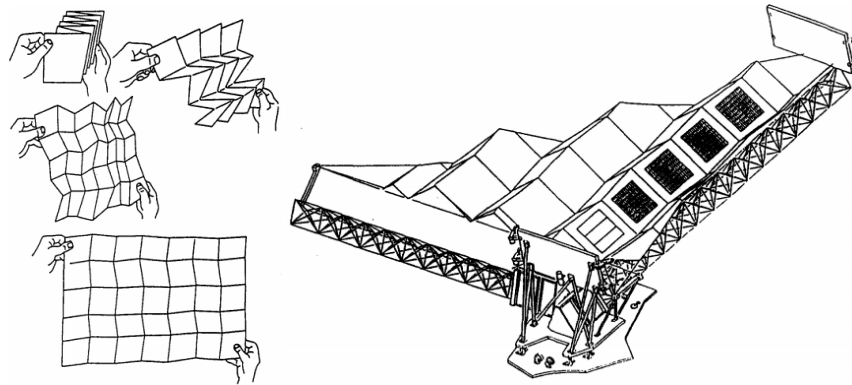


Figure 3 Miura-Ori Based Depolyable Solar Array. [6]

El Miura-Ori es una excelente opción, como se mencionó, permite que una lámina sea plegada y desplegada de manera eficiente. Su estructura es tal que, al plegarse, todos los puntos de la lámina se mueven en la misma dirección sin girar. Esta propiedad es crucial cuando se trata de paneles fotovoltaicos, donde la integridad y eficiencia del panel son vitales. Por ello, se realizó un prototipo inicial de cartulina para comprobar que dicho patrón es una excelente opción, considerando la geometría cuadrada de las celdas solares y la eficiencia en el uso del área. Como se muestra en la Fig. 4, se redujo el área aproximadamente en 90%.



Figura 4. Prototipo de cartulina, considerando geometría de celdas solares. (Elaboración propia)

La mayoría de los autores, que estudian el Miura-Ori y otros tipos de origami, realizan el planteamiento matemático en una situación ideal con superficies sin espesor y sin peso [7]. Mientras los autores que han incluido el espesor dentro del modelo del origami [8], aún presentan modelos ideales pues aún se omite el peso y tampoco se brinda información de los dobleces y los esfuerzos que se generan en ellos durante el repliegue; lo cual demuestra que aún existe un gran potencial de investigación y desarrollo en este campo. Sin embargo, son teorías muy valiosas pues permiten entender el comportamiento del origami durante la fase repliegue.

Nuestro desarrollo

El principal desafío de la propuesta de desarrollar paneles solares replegables basados en el Miura-Ori es pasar de un modelo de papel a un modelo con espesor. El contraste entre la ligereza flexibilidad del papel y el peso y rigidez de las celdas fotovoltaicas se presenta como un importante reto. Al ser un tema tan reciente, la literatura al respecto es muy escasa y; en algunos temas específicos, casi nula.

Por ello, se planteó iniciar con un modelo de unidad básica, y se investigó sobre los materiales que se usan actualmente para la fabricación de paneles solares rígidos y semiflexibles y el proceso de fabricación. Con ello, se planteó un modelo inicial para validación, como se aprecia en la figura 5.



Figura 5. Prototipo básico de 6 celdas solares, proceso de repliegue. (Elaboración propia)

Con éxito del prototipo escalado base, y demostrando que la fabricación de estos elementos se puede realizar en el Perú, se procedió con el desafío de fabricar un panel de tamaño real, y se diseñó un modelo de 388Wp, de 1.8 m de largo y de 1.1 m de ancho, proyectando un espesor menor a 3 mm, ver figura 6. Para ello, se trabajó en un nuevo proceso, y solución de nuevos detalles como el cableado interno de las celdas solares, el arreglo de láminas, el proceso de fabricación y las condiciones de flexibilidad/rigidez durante el plegado. Para lograr la fabricación de un sistema de estas dimensiones, se diseñó y fabricó una mesa laminadora

y una metodología para lograr pasar de 6 celdas del prototipo base a 60 celdas del prototipo a escala real.



Figura 6. Prototipo Escala Real 60 celdas solares, proceso de repliegue. (Elaboración propia)

Actualmente, se está mejorando el diseño y fabricación de mecanismos que permitan el repliegue y despliegue con tan solo un movimiento, los resultados son alentadores y se sigue optimizando dichos modelos, como se aprecia en la figura 7.



Figura 7. Desarrollo de mecanismo para el repliegue en un solo movimiento. (Elaboración propia)

Beneficios y Ventajas

El utilizar materiales que actualmente son utilizados en paneles semiflexibles que soportan complicadas condiciones ambientales y haber desarrollado el proceso de fabricación adecuándolo a nuestra propuesta de origami, permite que estos paneles solares replegables se adapten a diferentes entornos y necesidades. Gracias a ello se generan nuevas posibilidades de aplicaciones. Los paneles desarrollados pueden ser almacenados en un espacio reducido y a la vez con poco peso, lo que es esencial en entornos donde el espacio y recursos son limitados.

Aplicaciones Navales y Mineras

La mayoría de las empresas navales y mineras, tienen compromisos al 2030 de reducir la cantidad de combustibles fósiles, por ello se abren nuevas oportunidades para la aplicación de energías renovables en dichas industrias. En ese sentido, la empresa Dinamo Tecnologías SAC ha venido desarrollando en los últimos años sistemas fotovoltaicos híbridos en Lanchas Pilot de la empresa PSA Marine, ver figura 8, que se adecuan a la operación de las naves sin afectar su operación y generan beneficios: como el ahorro de combustible en las horas de stand-by de las lanchas, reducción del ruido y emisiones lo que permite mejores condiciones a la tripulación que se mantiene a bordo. Sin embargo, el alcance está siendo limitado, debido a que, en el mar, el espacio es un recurso preciado y una creciente necesidad de energía, de igual manera sucede en la industria minera, la movilidad y adaptabilidad son esenciales. A partir de estas experiencias, se planteó el presente proyecto con el objetivo de lograr ampliar la utilización de las energías renovables.



Figura 8. Sistema fotovoltaico híbrido, exitosamente instalado en lanchas Pilot por Dinamo Tecnologías SAC.

En el caso de la industria minera, nuestros paneles pueden ser transportados a lugares remotos y desplegados con rapidez, proporcionando energía en situaciones donde otras fuentes no son viables. La empresa también, previamente, había desarrollado torres de iluminación 100% solar, ver figura 9. Dado que la potencia que estos sistemas pueden entregar depende directamente del área cubierta por paneles solares, este tipo de soluciones plegables se presentan como una alternativa novedosa y con gran potencial de escalamiento.



Figura 9. Torre de Iluminación Solar diseñado y fabricado por Dinamo Tecnologías SAC.

Hacia un Futuro Sostenible

La energía solar es una de las fuentes de energía más prometedoras para el futuro, y nuestro país posee zonas con altos índices de radiación, y a la vez grandes brechas socioeconómicas a reducir. Siempre he creído que el potencial de la energía solar es nuestro impulso para reducir dichas brechas y lograr el desarrollo de nuestro país. Los sistemas fotovoltaicos aún tienen un gran reto que superar: la baja eficiencia actual por unidad de área W/m^2 , lo que conlleva a requerir gran área para la generación de energía. Por este motivo, proyectos de desarrollo, como el nuestro, permiten ese impulso adicional para su adopción en industrias tan exigentes como la naval y minería, y a la vez permitirá superar brechas de infraestructura, como el acceso a zonas remotas. Al permitir reducir el espacio requerido por estos sistemas y al ser livianos, los costos de transporte se reducen significativamente, ello a que se generan nuevas aplicaciones en condiciones donde se requiere movilidad.

Finalmente, se reconoce y agradece el gran trabajo del equipo de la PUCP y a Pro-Innovate por confiar en esta idea loca de combinar origami con las energías renovables. Dinamo Tecnologías SAC mantiene el compromiso de seguir desarrollado y mejorando esta tecnología, creyendo firmemente en la industria peruana.



Figura 9. Visita Técnica a embarcación del Sector Naval.

Referencias bibliográficas

- [1] Z. Song, *Studies of Origami and Kirigami and Their Application - PhD Dissertation*, Arizona: Arizona State University, 2016.
- [2] ORU KAYAK, "ORU KAYAK," [Online]. Available: <https://www.orukayak.com/pages/about>.
- [3] J. Morrison, "Smithsonian Magazine," 23 Abril 2019. [Online]. Available: <https://www.smithsonianmag.com/innovation/theres-origami-revolution-industrial-design-180972019/>.
- [4] El Universal, "El Universal," 18 Agosto 2014. [Online]. Available: <https://archivo.eluniversal.com.mx/ciencia/2014/nasa-origami-paneles-solares-93153.html>.

- [5] H. Kobayashi, B. Kresling and J. Vicent, "The geometry of Unfolding Tree Leaves," *Proceedings of the Royal Society B*, pp. 147-154, 1998.
- [6] H. Kuninaka, M. Natori, Y. Kawai and S. Ikegami, "Orbit Demonstration of Two-Dimensional deployable array including high voltage photovoltaic power generation," in *42nd Congress of the International Astronautical Federation*, Montreal, 1992.
- [7] R. J. Lang, *Twists, Tilings and Tessellations. Mathematical Methods for Geometric Origami*, Florida: CRC Press, 2018.
- [8] T. Tachi, *Rigid-Foldable Thick Origami*, 2011.