

DESARROLLO EXPERIMENTAL DE PROTOTIPOS DE TECHO SOLAR DE BAJO COSTO

Juanicó L.¹, Strab C.² y Allasia A.²

¹ investigador independiente Conicet – ² miembro ONG CIDEP, El Bolsón
Centro Atómico Bariloche, (8400) Bariloche, Río Negro
TEL: 02944-445100, FAX: 02944-445299, e-mail: juanico@cab.enea.gov.ar

RESUMEN: Se presenta el desarrollo experimental de los primeros prototipos de un nuevo diseño conceptual de techo solar configurable, cuya innovación radica en proveer de calefacción solar y refrigeración natural a las viviendas, mediante redistribución de agua. El estudio experimental ha demostrado la factibilidad de su construcción empleando técnicas y materiales de construcción convencionales. Se discuten sus costos, que podrían ser similares a los de un techo convencional de similar calidad térmica, y que por lo tanto permitirían aplicar este sistema sobre toda la superficie del techado. Resultados preliminares permiten estimar que en condiciones de clima patagónico se podrían obtener eficiencias como colector solar en el rango del 30% al 50%. Se discute las fortalezas y debilidades de este diseño y otras posibles variantes del mismo también en estudio, que podrían servir para mejorar su desempeño y generalizar su aplicación a techos preexistentes y/o inclinados.

Palabras clave: arquitectura solar, colectores solares térmicos, desarrollo de prototipos

INTRODUCCIÓN

Existen numerosos diseños conocidos de techos solares que son técnicamente factibles pero que requieren elevadas inversiones, siendo ésta la causa principal de su limitada aplicación al presente (Belusko et al., 2004). Por otra parte, estos sistemas han demostrado que, dada la gran superficie disponible en el techo, es posible satisfacer la demanda familiar promedio de calefacción aún en latitudes de 40° (Hassan y Beliveau, 2007).

Se ha recientemente propuesto un nuevo diseño conceptual de techo solar configurable, que utiliza la redistribución de agua para obtener nuevas sinergias entre el colector solar y el techo mismo (Juanicó, 2008 y 2010). El mismo propone lograr un techo de costo relativamente accesible, que sirva a la vez para calefaccionar y refrigerar la vivienda. Sin embargo, el manejo de cámaras de agua sobre el techo implica desafíos constructivos que debían resolverse en detalle, a través del desarrollo de prototipos que demostraran su factibilidad. Paralelamente se ha propuesto un diseño de toldo configurable, que permitiría simplificar desde el punto de vista mecánico el extendido o enrollado de la cubierta móvil sobre el techo solar anterior (Juanicó, 2009), y también se ha construido un prototipo de toldo configurable líquido, que será mostrado en este mismo congreso en otra ponencia (Juanicó y Piacentini, 2011).

En este trabajo se presentará por primera vez el desarrollo experimental de este nuevo techo solar. Se demostrará que las múltiples cámaras de agua integradas al techo son resolubles mediante materiales y técnicas de construcción convencionales, para el caso de un techo horizontal. Se presentarán los primeros prototipos; el primero funcional (2 m²) y el segundo de escala real (15 m²). Ambos han sido desarrollados en la granja ecológica de la ONG local CIDEP (Centro de Investigación, Desarrollo y Estudio en Permacultura), en el paraje Mallín Ahogado de la localidad de El Bolsón, provincia de Río Negro. Los miembros de esta ONG han llevado a cabo la resolución práctica de los numerosos desafíos constructivos. Se discutirán las ventajas y debilidades de esta resolución práctica, y se presentará su estudio de costos y pruebas iniciales de eficiencia solar en el frío invierno patagónico.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Prototipo funcional

Se ha completado la construcción y ensayo del primer prototipo funcional (escala de laboratorio). Éste ha permitido demostrar (y adquirir el *expertise* constructivo necesario) la factibilidad práctica del concepto novedoso de nuestro techo solar. Concretamente, nos referimos a la posibilidad de:

1. Construir una cámara de agua estanca inferior sobre el techo metálico empleando materiales y técnicas tradicionales de construcción de techados.
2. Absorber la irradiación solar calentando el inventario de agua del techo, transfiriendo luego la misma hacia un sistema colector de agua.

Como primer paso pues, se debía diseñar una cámara de agua estanca soportada por una chapa metálica de perfil no plano, de forma de disponer de un escalón superior (no comprometido en la “zona húmeda”) en donde se pudieran realizar la sujeción (por medio de clavos, etc) con los elementos estructurales típicos de techos, liberando de este modo la necesidad de realizar perforaciones en el nivel inferior (zona húmeda), que debe ser impermeable. Tal como se había previsto, se empleó una chapa de perfil trapezoidal, standard en construcción, de 1,1 m de ancho y que se puede adquirir de largo a medida igual al del propio techo (de forma de evitar el solapamiento de chapas cortas). Esta chapa está terminada en sus laterales con dos pestañas superiores, empleados en la técnica de construcción standard para superponer con sus dos chapas vecinas, por lo cual no provee naturalmente de ningún escalón superior (más alto que el nivel del propio trapecio) que permita a posteriori conformar una cámara de agua superior, como lo requiere nuestro diseño de techo solar. Se decidió entonces cambiar el

concepto tradicional de chapas contiguas solapadas por medio de pestañas: ahora se propone, en cambio, que cada cámara forme una cámara de agua individual, por medio de simplemente doblar hacia arriba (hasta que queden completamente verticales) ambas pestañas laterales de la chapa original. De esta forma obtenemos un escalón sobre ambos laterales de aproximadamente 5 cm de alto (reduciéndose el ancho efectivo de la chapa a 1 metro). También, para evitar que en el conjunto techo la lluvia se filtre entre dos chapas contiguas, se colocará una pieza larga y angosta (con forma de “U” invertida) que cubrirá la juntura de chapas vecinas.

Hasta ahora, siguiendo lo descrito, hemos diseñado una solución para contener las cámaras de agua en sus laterales, pero quedaba por resolver la contención en los cabezales, problema no menor, considerando el extenso perímetro de un techado. Para resolver esto recurrimos a cerrar el cabezal empleando una cumbrera del mismo perfil trapezoidal y del mismo tipo de chapa, la cual viene provista de una pestaña inferior que habitualmente se utiliza para superponer la misma sobre la chapa que se pretende cubrir, y que en este caso resultó ser muy conveniente para (orientando esta pestaña en forma horizontal, quedando la cumbrera vertical y hacia arriba) proceder a soldar la misma con una soldadura convencional de estaño, típica de la técnica de zinguería. Dada la importancia de este factor (lograr la estanqueidad) se prefirió que este proceso de manufactura fuera independiente de nuestras capacidades personales, por lo cual se contrató un zingero. El resultado fue positivo: se logró un escalón de unos 10 cm de alto que cerraba el cabezal, y además se adquirió una valiosa experiencia, surgida precisamente de la interacción con el zingero: la primera chapa que compramos no se lograba soldar bien y esto se debía a que la misma estaba conformada con una aleación aluminizada; en cambio, la “chapa negra de acero” probada posteriormente se soldó perfectamente, siguiendo el proceso normal (decapado de ambas superficies, etc.) de soldadura.

La experiencia adquirida justificó con creces la construcción de este pequeño prototipo funcional, antes de emprender la construcción de un techo de gran tamaño. Hubo otros aprendizajes importantes de destacar, como ser:

1. La conformación de múltiples cámaras individuales de agua implicaba que de seguirse con el diseño de conexionado inicial, se debiera construir un conexionado muy complejo para permitir el vaciado y llenado de estas múltiples cámaras de agua. Entonces se escogió otro diseño, consistente en un caño colector rígido (conformado por un caño estructural de sección cuadrada de 2”) que se ubica debajo del borde del techo de chapa (cabezal), y que se conecta con ésta mediante el abocardado de la chapa dentro de la pared de este caño.
2. Se probó la conformación del doble vidriado superior, mediante el uso de un panel termosellado convencional. Si bien la aislación térmica lograda así era muy buena, se observó un excesivo costo del mismo. Por lo anterior y para el futuro (prototipo escala real) se diseñó otra estrategia: se apoyó un vidriado simple sobre el escalón superior del trapecio, y debajo del mismo (quedando así protegido por el vidrio de agentes del medio ambiente externo, tales como viento, proyectiles e irradiación UV) se colocó una cubierta plástica transparente, dejando un huelgo de 1cm con el vidriado. Esta solución es de costo muy inferior a la previa, y permite combinar las ventajas del vidrio y del plástico, en cuanto a sus rendimientos ópticos, térmicos y mecánicos. Por último, el llenado y vaciado de la cámara de agua superior se resolvió mediante el uso de dos medios caños de PVC colocados siguiendo el largo de ambos cabezales.

Las pruebas de campo realizadas con este primer prototipo (Figuras 1a y b), demostraron que:

- 1) Era perfectamente posible conformar una cámara de agua estanca inferior, llenando y vaciando la misma con facilidad por medio de un pequeño desnivel (de 0,5cm) a lo largo del techo (de 1,5m de largo).
- 2) Era posible conformar una cámara de agua superior relativamente estanca.



Figura 1a. base metálica del prototipo funcional



Figura 1b. Prototipo funcional

Desarrollo del prototipo de escala real

Se completó la ingeniería del prototipo de escala real (de 15m², de 5m x 3m, conformado por tres cámaras de 5 metros de largo y de 1m de ancho). Se construyó en una posición cómoda de prueba (cercana al piso), para facilitar su armado y pruebas de verificación de estanqueidad (ver Figuras 2 y 3).

Para darle mayor rigidez al conjunto techo, se realizó una modificación constructiva respecto del anterior prototipo (funcional), consistente en colocar un listón de madera entre cada par de chapas contiguas (Figura 4), de forma de guiar a las mismas y darle mayor rigidez al conjunto (además de permitir acceder a cualquier punto del techo, cruzando un listón entre dos travesaños del techo). Se vio que dada la dimensión mayor de este techo era esto necesario, y era útil para utilizar este escalón superior para tensar la cubierta plástica que se coloca debajo del vidrio.

Los vidrios se cortaron del ancho de cada chapa (1m) y 1,5m de largo (Figura 6). Una longitud mayor sería conveniente para facilitar la estanqueidad de la cámara superior, evitando de esta forma las múltiples juntas entre vidrios contiguos (Figura 7 a 9). Creemos sin embargo que es muy factible lograr sellar estas juntas, y por otra parte, es nuestra intención demostrar la factibilidad de todos los aspectos prácticos de nuestro diseño constructivo, ya que en un techo de mayor longitud no sería sencillo manejar hojas vidriadas tan largas.

También se ha probado la estanqueidad de todas las cámaras de agua inferiores, no encontrando ninguna fisura o pérdida. También se chequeó la estanqueidad del sistema colector y distribuidor de agua hacia las cámaras inferiores, no encontrando mayores problemas.

Otra modificación positiva respecto del anterior prototipo, fue el sustituir los medios caños diseñados previamente como colectores de la cámara de agua superior, por unos caños estructurales a los que les practicamos unas ranuras delgadas, que se ubican justo sobre el nivel del vidrio (Figura 5). De esta manera ayudar a evitar que se tapen con hojas.

Nuestra experiencia respecto del llenado y vaciado del techo fue muy buena (considerando que habíamos nivelado el techo sólo en forma aproximada, en esta locación temporaria); el techo se vaciaba hasta la última gota, siendo éste un punto a priori de riesgo, ya que no podíamos disponer de una gran pendiente a lo largo del techo, considerando que la altura de los escalones es de pocos centímetros.

Otra experiencia práctica obtenida, es que consideramos poco adecuada nuestra elección del color (sin pintura de fábrica) de las chapas, las cuales se podían comprar pre-pintadas de negro. Nos inclinamos en este caso por la opción despintada, estimando equivocadamente que esto facilitaría la soldadura de las cumbreras; como observamos luego era trabajoso lograr que la pintura negra se adhiriera bien a la chapa. En nuestra práctica, observamos que aún con un bruñido a mano de las chapas la pintura presentaba baja adhesión. De la experiencia, surge que es más conveniente comprar la chapa pre-pintada de negro, y luego decapar la limitada zona a soldar (lo cual de todas formas debe realizarse en todos los casos). El techo se desmontó y transportó (Figura 10) a la granja (Figura 11).

Por último, pero no menos importante, consideramos que el haber podido desarrollar este prototipo sin contar ninguno de los integrantes con experiencia previa en la fabricación de colectores solares, es un buen indicador del grado de asequibilidad de este concepto a cualquier usuario medio, siendo éste otro de los objetivos centrales del proyecto.



Figura 2. Prototipo real en grado de avance.



Figura 3. Detalle de la cabecera del prototipo.



Figura 4. Detalle marco de madera que rigidiza la cámara.

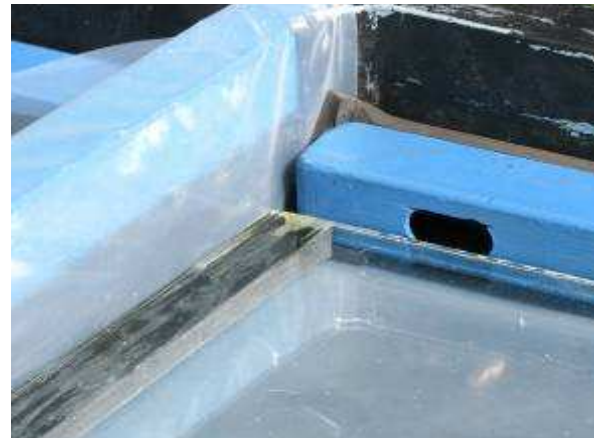


Figura 8. Detalle del apoyo del vidrioado

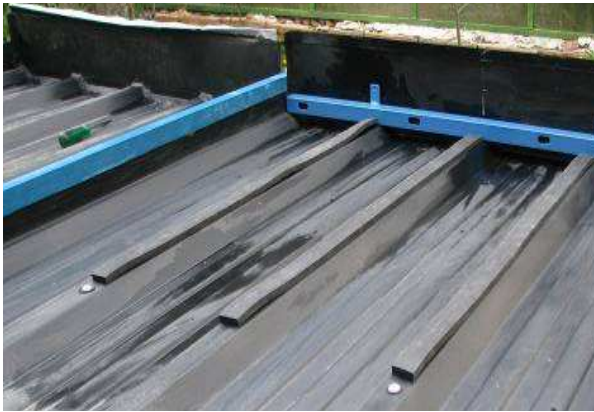


Figura 5. Detalle de los colectores de agua



Figura 9. Prueba de llenado de cámara de agua.



Figura 6. Detalle del armado del vidrioado.



Figura 10. Transportando el techo a la granja.

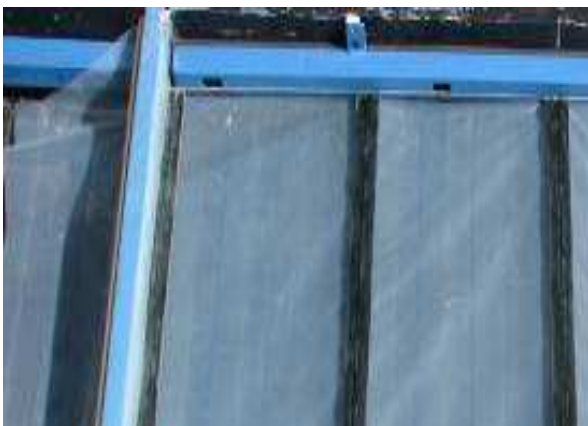


Figura 7. Detalle del vidrioado y polietileno.



Figura 11. Detalle de los colectores de agua.

RESULTADOS

Análisis de costos

El costo total de los materiales específicos del techo (chapa negra, vidrio simple, polietileno, piezas especiales de apoyo en forma de omega y flejes de goma, cumbreras para cabeceras) y los servicios contratados (soldadura de zinguero de ambas cabeceras), suma unos 160\$/m². Además se debe prorratear (entre los 15m²) el costo de los materiales relacionados con el manejo de agua (tanque, bomba de ½ HP, cañerías y válvulas esféricas de cierre. Estos nuevos materiales suman \$1,000, que agregan otros 80\$/m² en nuestro techo, alcanzando un coste específico de 250\$/m².

Cabe aclarar que el coste de los sistemas de agua en función del tamaño del techo sigue una ley de proporcionalidad de acuerdo a una función potencial de exponente 1/2. Por consiguiente, para un techo de tamaño más adecuado al de una vivienda (100 m²), se podrían obtener costos específicos del orden de 200 \$/m². Estos costes son ligeramente superiores a los que se obtienen en techos convencionales en Bariloche, en los cuales se suman varias capas aislantes. Al presente hemos terminado la construcción del techo, como lo ilustran las fotos. Al momento de cerrar este trabajo hemos realizado las primeras pruebas operacionales con éxito. Se demostró la factibilidad de llenar y vaciar con facilidad las cámaras de agua, con un muy pequeño declive de 1cm en 5m de longitud.

Eficiencia solar

Respecto de la eficiencia del colector solar del techo, no se han podido realizar mediciones cuantitativas, sin embargo, las mismas podrán ser realizadas en breve en el futuro, siendo que ya adquirimos y estamos montando in situ una estación meteorológica completa (Davis modelo Vantage-Pro-Plus) que incluye un sensor de potencia total de irradiación solar. También está previsto el cerrar las paredes de la edificación cubierta por el techo (se utilizará como ducha solar para los voluntarios que trabajan en la granja ecológica del CIDEP, en Mallín Ahogado). De esta forma se podrán reducir apreciablemente las pérdidas de calor convectivas por viento, llevándolas a una situación similar a la de una vivienda.

En forma preliminar, y según estimaciones térmicas realizadas con un modelo térmico de resistencias en serie (Juanicó, 2008), partiendo de la cubierta transparente doble dispuesta sobre la placa colectora (techo metálico negro), se podrían obtener eficiencias de colector solar moderadas, del 30% al 50%. La principal fortaleza aquí de este diseño radica en que, a diferencia de los colectores solares convencionales en los que se sobrecalienta un pequeño volumen de agua en el serpentín para con éste ir calentando lentamente un gran inventario de agua contenida en el tanque, aquí todo el inventario de agua se calienta gradualmente simultáneamente, y por ende, la temperatura de trabajo de la placa colectora durante casi todo el ciclo diurno es menor, lo cual origina pérdidas de calor (proporcionales al salto de temperatura entre el colector y el medio ambiente) menores.

Otras consideraciones y análisis del diseño extendido

El peso del sistema es un factor importante a considerar, siendo el todo el inventario de agua se deberá sostener durante casi todo el día sobre el techo. Sin embargo, siendo ésta una cámara muy somera (menos de 3cm de profundidad en la parte más profunda, y 2cm en promedio), y considerando también el escalón superior del trapecoide (sin cámara de agua), el sobrepeso será inferior a 20 Kg/m², lo cual no constituye por sí una sobrecarga relevante para un techo convencional.

La resistencia a la corrosión del sistema no fue probada dado el breve lapso de testeo del prototipo a la fecha y es un punto a estudiar en el futuro. Aquí las consideraciones se deberían separar entre lo que es estrictamente el prototipo construido y sus lecciones aprendidas, y la potencialidad que el diseño propuesto puede alcanzar en el futuro. Esperamos que utilizando la correcta combinación de materiales, este punto sea satisfecho por completo. Por ejemplo, estamos estudiando el conformar cámaras de agua estancas auto-contenidas mediante el empleo de bolsas plásticas (tipo colchones de agua) fabricadas ad hoc. Esto no solo solucionaría el problema de la corrosión sobre superficies metálicas (especialmente delicado en el caso de aguas cloradas de la red de agua potable) sino también factible el uso de distintos tipos de techos soportes (concreto, cerámico, madera, etc.), sobre el que montaríamos el conjunto de bolsas plásticas interconectadas hidráulicamente, pudiendo asimismo tratarse de techados horizontales o inclinados. Este último caso abriría un nuevo abanico de posibles soluciones prácticas a partir del concepto general aquí propuesto. Por ejemplo, la cubierta vidriada aquí empleada podría ser sustituida muy sencillamente por un toldo o sobre techo convencional de policarbonato alveolar transparente, de moderado costo (80\$/m²) y siendo altamente resistente al granizo y proyectiles, lo cual solucionaría dos problemas potenciales.

Finalmente, en cuanto a los riesgos de heladas invernales en climas fríos, cabe mencionar que la ventaja de un sistema activo como el propuesto, es precisamente el poder disponer a elección de las cámaras de agua sobre el techo. Sencillamente se evitaría el uso del “techo de agua”: es decir, no se debería bombear el agua sobre el techo hasta que éste no alcance una temperatura adecuada para obtener una ganancia térmica positiva, respecto del mismo inventario almacenado en el tanque reservorio. Esto último se podría implementar fácilmente a partir del sensado de ambas temperaturas (del tanque y del techo) y con el uso de un microprocesador de control.

CONCLUSIONES

Se completó la ingeniería (desde el grado conceptual hasta el de detalle), construcción y pruebas iniciales de estanqueidad del primer prototipo de escala real (y antes del funcional) de un nuevo diseño de techo solar configurable. La original redistribución de agua que este techo propone, planteaba a priori difíciles desafíos constructivos, relativos al conformado de múltiples cámaras de agua (empleando solamente materiales y técnicas estándar de construcción), y el manejo de ésta. Sin embargo, el prototipo ha sabido solucionar estos desafíos proponiendo la construcción de un techo nivelado. Estas soluciones son además asequibles al usuario medio, empleando materiales y técnicas convencionales.

Los costos del sistema de techado propuesto se pueden considerar como ligeramente superiores a los de techos convencionales de buena calidad térmica, como son los utilizados en la zona fría estudiada. Esto abre un gran abanico de posibilidades para su aplicación real a gran escala dentro de los nuevos techados a construirse en nuestro país, sin requerir grandes inversiones. Esto por sí sólo es una gran fortaleza de este sistema, relativo al universo de sistemas basadas en energías renovables, que generalmente implican grandes inversiones específicas (por unidad de energía provista).

El techo solar demostró (en forma inicial) que puede coleccionar una buena cantidad de energía solar, a pesar de su desventajosa condición de horizontalidad y la gran latitud (42°) del sitio estudiado. También demostró que por sí sólo, mediante las dos cámaras de aire que genera en la noche al transferir el agua hacia el sistema de uso, puede convertirse en un techo de razonable calidad de aislación térmica ($U = 1 \text{ W/m}^2\text{C}$). Estas características constituyen otras fortalezas de este sistema.

El desempeño térmico del techo solar desarrollado se podría magnificar si se emplea conjuntamente con el toldo solar configurable, aquí presentado en otro trabajo. Igualmente se podrían obtener mejores resultados eligiendo techos inclinados. La resolución práctica de esta alternativa se ve francamente simplificada empleando un novel diseño de techo, presentado aquí en otro trabajo. El conjunto de estas soluciones, orientadas a obtener techados solares configurables, que aprovechen inteligentemente los ciclos térmicos de la Naturaleza, podría constituir una nueva alternativa dentro de los conceptos de casas de bajo consumo energético. Reconociendo que resta mucho trabajo por realizar aún, se invita ahora a participar del mismo todos los colegas científicos, siendo éste el principal motor de estas presentaciones.

Agradecimientos

Al ing. Ernesto Quiles, coordinador de los Programas Especiales de la SeCyT, y al Dr. Alberto Pignotti, presidente de la Fundación para el Desarrollo Tecnológico de la Argentina (Fudetec), por la confianza, y a sus respectivas instituciones por los subsidios recibidos, que posibilitaron este trabajo.

REFERENCIAS

- Belusko, M. et al. 2004. Roof integrated solar heating system with glazed collector. *Solar Energy* 76, 61-69.
- Hassan M. y Beliveau Y. 2007. Design, construction and performance prediction of integrated solar roof collectors using finite element analysis. *Construction and Buildings Materials*, 21 (5), 1069-1078.
- Juanicó, L. 2008. Innovative Solar Roof for domestic heating and cooling. *Solar Energy*, Vol. 82 (6), 481-492.
- Juanicó, L. 2009. A new design of configurable solar awning for managing cooling and heating loads. *Energy and Buildings*, vol. 41(12), 1381-1385.
- Juanicó, L. 2010. New Design of Solar Roof for Household Heating and Cooling. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35 (11), 5823-5826.
- Juanicó, L. y Piacentini, R. 2011. Desarrollo de toldos de ganancia solar configurable. Congreso Asades 2011.

ABSTRACT

The experimental development of prototypes relates a new conceptual design of a configurable solar roof is presented. Its innovation involve a solution for the solar heating and natural cooling of houses, by means of water redistribution. The feasibility of concept by using standard constructions materials and techniques is checked. The cost analyze shows this roof could achieve similar cost than conventional roofs. Preliminary, initial results have shown than efficiencies as solar collector ranging from 30% to 50% could be achievable in this configuration. The strengths and weaknesses of this design are discussed, together with other possible variations of this original design. These variations could be useful for implementing this solar roof onto older and (or) titled roofs.

Keywords: solar architecture, thermal solar collector, prototype development.