

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE



**“DISEÑO DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA
PANELES FOTOVOLTAICOS SOMETIDOS A ALTA
RADIACIÓN Y TEMPERATURA”**

FRANCO FELIPE TORRES TOBAR

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: DR. ING. SHEILA LASCANO FARAK.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. RER. NAT. HERNAN OLGUIN.

JUNIO – 2021

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas, quiero tomarme un momento para agradecer a todas las personas que estuvieron a mi lado en este largo proceso, mi pareja y mi hija, que siempre me entregaron la alegría y el amor que necesitaba, mi papá, que siempre tuvo un buen consejo y una palabra de apoyo, mi mamá, que siempre me esperó con la comida calentita independiente de la hora, a mi hermano, que me soportó incondicionalmente cuando el primer año de universidad tuve que vivir con él, mis 2 hermanas, que siempre me alentaron y confiaron en mí, a mi amigo Claudito, que fue mi compañero de estudio en todos los ramos, y por último, a la naranja mecánica y todos sus jugadores, por todas las victorias y los hermosos años de pasión y fútbol que vivimos.

También quiero recalcar el rol fundamental de la Universidad en mi desarrollo, sobre todo a los profesores, al proveerme una forma de pensar distinta a la de los demás, para poder llegar más allá de los conocimientos básicos y expandir mi mente de una mejor manera.

Por último, agradezco a quienes dejaron que decidiera libremente el camino que quería tomar, sin ejercer ningún tipo de presión de por medio, y me apoyaron en todas las decisiones importantes que he tomado en mi vida.

RESUMEN

La zona norte del país cuenta con la mayor radiación solar del mundo, lo que ha permitido y fomentado en gran medida la proliferación de proyectos fotovoltaicos. Estos avances, han significado un progreso positivo en cuanto a la matriz energética de Chile, como también la disminución del uso de tecnologías de generación más contaminantes, sin embargo, todo este progreso se ve afectado ante la degradación acelerada que sufren los equipos, poniendo en riesgo la reputación y efectividad de esta tecnología en Chile. Esto se debe principalmente a la temperatura de operación que se encuentra sometido el módulo, pudiendo llegar a los 70°C en un día de verano, siendo 25°C la temperatura de trabajo establecida por el fabricante, así conservar sus condiciones de operación y vida útil.

Es por esto, que algunas empresas han instalado radiadores en los módulos fotovoltaicos, pero las soluciones expuestas no son económicamente atractivas, debido a que instalar el radiador es más costoso que comprar un panel nuevo.

Este trabajo de título tiene como principal objetivo diseñar un sistema de enfriamiento para paneles fotovoltaicos sometidos a alta radiación y temperatura, que pueda ser utilizado en plantas ya instaladas o por instalar, con el fin de aumentar la vida útil de los paneles, reduciendo las pérdidas por efecto del calentamiento del panel, potenciando así su rendimiento.

De esta forma, se realiza un estado del arte en donde se detectan las limitaciones de los sistemas disponibles en la actualidad, enfocado en rendimiento y costos. Teniendo en cuenta las necesidades del cliente se construyen listas de objetivos y de especificaciones, para luego ponderarlas respecto a su importancia. Se realiza una búsqueda interna mediante las herramientas de benchmarking, matriz de calidad, matriz TRIZ, brainstorming y carta morfológica. A continuación, se generan conceptos de sistemas enfriadores, para escoger el más adecuado.

ABSTRACT

The northern part of the country has the highest solar radiation in the world, which has allowed and greatly encouraged the proliferation of photovoltaic projects. These advances have meant positive progress in terms of Chile's energy matrix, as well as the decrease in the use of more polluting generation technologies, however, all this progress is affected by the accelerated degradation suffered by equipment, putting in risk the reputation and effectiveness of this technology in Chile. This is mainly due to the operating temperature that the module is subjected to, which can reach 70 ° C on a summer day, with 25 ° C being the working temperature established by the manufacturer, thus preserving its operating conditions and life. Useful.

This is why some companies have installed radiators in the photovoltaic modules, but the solutions presented are not economically attractive, since installing the radiator is more expensive than buying a new panel.

The main objective of this title work is to design a cooling system for photovoltaic panels subjected to high radiation and temperature, which can be used in plants already installed or to be installed, in order to increase the useful life of the panels, reducing losses due to the heating of the panel, thus enhancing its performance.

In this way, a state of the art is made where the limitations of the systems available today are detected, focused on performance and costs. Taking into account the needs of the client, lists of objectives and specifications are built, and then weighed against their importance. An internal search is carried out using benchmarking tools, quality matrix, TRIZ matrix, brainstorming and morphological chart. Next, concepts of cooling systems are generated, to choose the most suitable one.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
INTRODUCCIÓN	xii
OBJETIVOS	xiii
1 Situación actual.....	14
2 Estado del arte.....	17
2.1 Celdas fotovoltaicas	17
2.2 Módulos fotovoltaicos	23
2.3 Espumas metálicas	26
3 Marco Teórico.....	34
3.1 Diseño conceptual	34
3.2 Transferencia de calor.....	40
4 Diseño conceptual.....	44
4.1 Evaluación de las necesidades del cliente.....	44
4.2 Estructura Funcional	53
4.3 Búsqueda externa	54
4.4 Búsqueda interna.....	66
5 Balance de energía del módulo fotovoltaico.....	73
5.1 Modelo numérico	73
5.2 Energía disponible	83
5.3 Análisis de rendimiento del módulo	85
6 Construcción y validación del sistema de enfriamiento	98

6.1	Diseño prototipo.....	98
6.2	Construcción de prototipo.....	99
6.3	Construcción de simulador solar.....	101
6.4	Validación.....	104
7	Propuesta final de diseño	113
7.1	Análisis económico.....	113
7.2	Propuesta de diseño.....	114
	CONCLUSIONES	116
	BIBLIOGRAFÍA	117
	ANEXOS	120
	Anexo 1: Tablas de pesos absolutos	120
	Anexo 2: Cálculo EES	123
	Anexo 3: Resultados software EES en comparación con medición experimental....	129
	Anexo 4: Pruebas experimentales simulador solar.	132
	Anexo 5: Distribución de halógenos escogida.	137
	Anexo 6: Procedimiento de construcción del simulador solar.....	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico de corriente de corto circuito [5]	18
Figura 2: Curva característica de un panel fotovoltaico [5]	20
Figura 3: Elementos de un módulo fotovoltaico.	26
Figura 4: Aplicaciones de espumas de aluminio [9]	30
Figura 5: Perfil de velocidad en espuma de aluminio [13]	33
Figura 6: Etapas del diseño conceptual. [14]	35
Figura 7: Diagrama de caja negra	53
Figura 8: Diagrama de caja transparente.....	53
Figura 9: Imagen adjunta en patente ES1078530U.....	64
Figura 10: Imagen adjunta en patente ES2347116B1.....	65
Figura 11: Brainstorming del sistema de enfriamiento.	66
Figura 12: Flujo de calor por una sección de un panel fotovoltaico.	75
Figura 13: Diagrama de resistencias del módulo FV.	76
Figura 14: Gráfico de calor disponible del módulo fotovoltaico.	84
Figura 15: Validación de modelo computacional con condiciones estándar.	85
Figura 16: Temperatura promedio día de verano zona norte.	87
Figura 17: Energía solar día de verano zona norte.....	87
Figura 18: Datos entregados por el software EES, sobre módulo fotovoltaico en el norte de Chile.	88
Figura 19: Temperatura promedio día de invierno zona norte.....	89
Figura 20: Energía solar día de invierno zona norte.	89
Figura 21: Datos entregados por el software EES, sobre módulo fotovoltaico en el norte de Chile, día de invierno.	90
Figura 22: Temperatura promedio día de verano zona sur.	91
Figura 23: Energía solar promedio día de verano zona sur.....	91
Figura 24: Datos entregados por el software EES, sobre módulo fotovoltaico en el sur de Chile, día de verano.....	92

Figura 25: Temperatura promedio día de invierno zona sur.	93
Figura 26: Energía solar promedio día de invierno zona sur.	93
Figura 27: Datos entregados por el software EES, sobre módulo fotovoltaico en el sur de Chile, día de invierno.	94
Figura 30: Módulo fotovoltaico sin sistema de enfriamiento.	95
Figura 31: Módulo fotovoltaico que incluye sistema de enfriamiento.	95
Figura 32: Gráfico de resistencias térmicas de la espuma de aluminio, respecto a la velocidad. [9].....	96
Figura 33: Diseño del canalizador de flujo para panel de 320W.	98
Figura 34: Diseño CAD sistema de enfriamiento.	99
Figura 35: Canalizador de flujo para radiador de aire fabricado mediante tuberías de PVC.....	99
Figura 36: Radiador de aire de módulo fotovoltaico de 320W.	100
Figura 37: Esqueleto de simulador solar diseñado en software Autodesk Inventor.	102
Figura 38: Simulador solar terminado.....	103
Figura 39: Esquema de medición de temperatura en conjunto panel + radiador.	104
Figura 40: Curva I/V de panel sin sistema de referencia.	105
Figura 41: Curva I/V de panel con sistema de enfriamiento.....	105
Figura 42: Resultado de mediciones de variables térmicas.	106
Figura 43: Potencia térmica generada por el módulo FV.	106
Figura 44: Flujo sobre placa plana con un tramo inicial no calentado. [15].....	108
Figura 45: Vista 1 del diseño final prototipo	114
Figura 46: Vista 2 del diseño final prototipo	115
Figura 47: Vista 3 del diseño final prototipo	115
Figura 48: Datos entregados por el software EES.	129
Figura 49: Datos entregados por el software EES.	130
Figura 50: Cálculo de coeficiente de convección para velocidad de 20 m/s	131
Figura 51: Distribución óptima de halógenos en módulos de 320 [W]	137
Figura 52: Imagen de metalcon y epp utilizados	138
Figura 53: Unión utilizada entre perfil c y u.	139

Figura 54: Imagen de base y ruedas construida.	139
Figura 55: Imagen de módulo fv montado en la estructura construida.....	140
Figura 56: Imagen de la puerta del simulador construida.	141
Figura 57: Imagen de tensores de acero.	141
Figura 58: Imagen de soquetes instalados en la puerta del simulador.	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lista de objetivos basados en las necesidades del cliente.....	44
Tabla 2: Categorización lista de atributos.....	45
Tabla 3: Categorización de objetivos en subgrupos.....	47
Tabla 4: Lista jerárquica de objetivos.	48
Tabla 5: Valoración de pesos absolutos. [14]	50
Tabla 6: Pesos totales de los objetivos.....	51
Tabla 7: Resumen de documentos científicos	54
Tabla 8: Resumen de productos existentes	58
Tabla 9: Resumen de patentes existentes.....	63
Tabla 10: Carta morfológica.	67
Tabla 11: Resultado evaluación pesos ponderados.....	69
Tabla 12: Especificaciones de materiales de módulo fotovoltaico.	74
Tabla 13: Especificaciones de módulo FV.....	74
Tabla 14: Características térmicas de la madera.	82
Tabla 15: Resumen de resultados obtenidos.	107
Tabla 16: Costos reales de prototipo construido	113
Tabla 17: Relación entre objetivos.....	120
Tabla 18: Tabla de costos.....	120
Tabla 19: Tabla de autonomía.....	121
Tabla 20: Tabla de operación.....	121
Tabla 21: Tabla de estructuras	122
Tabla 22: Medición 1 de potencia panel 10 Wp	132
Tabla 23: Medición 2 de potencia panel 10 Wp	132
Tabla 24: Medición 3 de potencia panel 10 Wp	133
Tabla 25: Medición 4 de potencia panel 10 Wp.	133
Tabla 26: Medición 1 de potencia panel 75 Wp	134
Tabla 27: Medición 2 de potencia panel 75 Wp.	134

Tabla 28: Medición 3 de potencia panel 75 Wp	135
Tabla 29: Medición 1 de irradiancia de potencia panel 75 Wp.....	135
Tabla 30: Medición 2 de irradiancia de potencia panel 75 Wp.....	136
Tabla 31: Medición 3 de irradiancia de potencia panel 75 Wp.....	136
Tabla 32: Medición 4 de irradiancia de potencia panel 75 Wp.....	136

INTRODUCCIÓN

Los paneles fotovoltaicos basan su rendimiento de generación en la temperatura; es decir, mientras menor sea, mayor será la eficiencia. En condiciones desérticas; como lo es en la zona norte de Chile, la radiación puede superar los 1000 W/m^2 y la temperatura a la que están sometidos los paneles solares es de aproximadamente 60°C , pudiendo llegar a 80°C . Con estos niveles de radiación, el panel debería lograr una mayor eficiencia que la especificada nominalmente, pero frente a las altas temperaturas significa que éste no aprecia un aumento considerable de potencia; por lo que reducir la temperatura sin variar la cantidad de radiación es una tarea compleja, pero a la vez fundamental. Al mismo tiempo, la alta radiación disminuye la eficiencia de los paneles fotovoltaicos y éstos acortan su vida útil, lo que genera tanto pérdidas de generación como por degradación acelerada. [1]

En Chile, la energía solar está en constante expansión, tal como señala el MINISTERIO DE ENERGÍA, la capacidad instalada de energía fotovoltaica asciende a 3.000 MW [2], lo que demuestra la constante expansión de ésta. Estos avances han significado un progreso positivo en cuanto a la matriz energética de Chile, como también la disminución del uso de tecnologías de generación más contaminante. Sin embargo, todo este progreso se ve afectado ante la degradación acelerada que sufren los equipos, poniendo en riesgo la reputación y efectividad de esta tecnología en nuestra región.

Esto se debe en gran medida a que los módulos han sido diseñados para el hemisferio norte del mundo, lejos de la realidad chilena. Lo anterior se ve reflejado en números simples; la radiación en el norte de Chile puede llegar a los 1000 W/m^2 con temperaturas de operación de los módulos cercanas a los 70°C , mientras que en países como Alemania (donde se ha desarrollado esta tecnología), la radiación promedio no supera los 800 W/m^2 , con temperaturas de operación de módulos entre $15 - 25^\circ\text{C}$.

OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo es diseñar un sistema, que sea capaz de enfriar de forma más eficiente paneles fotovoltaicos sometidos a condiciones de alta radiación y temperatura; logrando que se aumente la eficiencia del módulo solar, se consuma menor cantidad de líquido refrigerante y que éste sea de una alta durabilidad.

Para lograr este propósito se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Realizar estado del arte de soluciones y costos de sistemas de enfriamiento de paneles solares
- Realizar modelo numérico de la transferencia de calor del sistema panel-radiador.
- Simular el comportamiento de un módulo de panel solar con y sin el sistema de enfriamiento.
- Proponer un diseño mejorado que cumpla la totalidad de los requerimientos.

1 Situación actual

Energía solar en el mundo

Situándonos en el contexto mundial de la energía solar fotovoltaica en el año 2018, se manifiesta que ésta alcanzaba por primera vez los 500 [GW] y se convertía en la primera fuente de energía eléctrica en capacidad desplegada a nivel global. El dato lo aporta el Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica de la Agencia Internacional de la Energía (AIE PVPS) en su nuevo Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2018 (Instantánea del Mercado Fotovoltaico Global 2018), que el organismo internacional acaba de publicar. [3]

Universalmente denotan diferentes condiciones entre el desarrollo de los países en esta materia, algunos que lograron El mercado fotovoltaico chino experimentó un limitado descenso el año pasado, situándose en 45 [GW], pero este descenso fue compensado con mayores volúmenes de instalación en otros mercados emergentes y establecidos. Entre los mercados en crecimiento destacan: India, con 10,8 [GW] instalados; Australia, que aumentó espectacularmente en 2018, con cerca de 3,8 [GW]; México, con cerca de 2,7 [GW]; Corea, con 2,0 [GW]; y Turquía, por encima de 1,6 [GW], pese a que el mercado está en declive.

Los mercados de Oriente Medio y África también crecieron, si bien para ver gran parte de este despliegue hay que esperar a este año de 2019, cuando la mayoría de las plantas entren en servicio, especialmente en los Emiratos Árabes Unidos y Egipto. Mientras tanto, el mercado estadounidense y japonés se mantuvieron estables. El europeo vivió un nuevo renacer, impulsado principalmente por el importante incremento de la solar fotovoltaica en Alemania y los Países Bajos, si bien el crecimiento se ha producido en muchos países más.

La contribución de la energía fotovoltaica supone ya cerca del 2,6% de la demanda de electricidad en el mundo. Es sólo el principio. La AIE afirma que en los próximos años

la solar fotovoltaica tiene el potencial de convertirse en una fuente importante de electricidad a un ritmo extremadamente rápido en varios países de todo el mundo.

Energía fotovoltaica en Chile

En los últimos 4 años, Chile ha empezado a sonar fuerte en el ecosistema de energía solar a nivel mundial. Sus características tanto geográficas como políticas, lo han convertido en una de las potencias solares con más futuro en el escenario internacional. Con más de 105.000 km^2 de superficie, equivalente a la mitad del Reino Unido, el Desierto de Atacama, se extiende a lo largo y ancho de cinco regiones geográficas de Chile. Esta zona se caracteriza por ser la más árida y con mayor radiación del mundo, lo que la ha convertido en un escenario perfecto para generar energía solar fotovoltaica a gran escala.

Ha sido tan grande el crecimiento que ha tenido el sector en el país (de 7% en 2014 a 17% en 2017) estimando que al 2040, Chile debería contar con 100% de energía proveniente de fuentes renovables. Cifra que no parece lejana, gracias al potencial natural del país y a La ley 20.571 que impulsa la generación distribuida o netbilling.

Según cifras del 2017, el tipo de energía renovable más consolidada en Chile es la solar fotovoltaica, la que representa el 7% de la generación eléctrica total del país y más del 44% de la producción de ERNC. Por otra parte, más del 70% de nuevos proyectos de energías limpias corresponden a solares fotovoltaicos. Este gran interés por los cielos y suelos chilenos lo han llevado a ganarse el apodo de “la Arabia Saudita de Latinoamérica”.

“Chile representa una gran oportunidad de inversión y desarrollo de proyectos solares, pero principalmente somos una importante plataforma para Sudamérica, por ser un país estable y con una política permanente pro-inversión, con un marco regulatorio claro y capital humano altamente calificado en ingeniería y otras materias relacionadas”, señaló Marcela Puntí, Gerente General de Acesol, Asociación Chilena de Energía Solar.

“Chile es un país que va a requerir más energía a bajos precios para seguir compitiendo globalmente. Además, Viene un nuevo ciclo virtuoso de la minería, impulsada por el ya tradicional cobre, pero con la minería del litio creciendo fuertemente y la desalación de agua para procesos industriales, lo cual abre un espacio para que la energía solar demuestre que es una de las mejores soluciones energéticas para los clientes, ya sea para la electricidad como también en forma de generación de calor”, agregó José Ignacio Escobar, presidente de Acera, Asociación Chilena de Energías Renovables. [4]

2 Estado del arte

Para analizar de forma más asertiva los módulos fotovoltaicos, en este capítulo se desglosará el funcionamiento, los componentes y parámetros de éstos. Además, se estudiarán las espumas de aluminio como posible sistema de enfriamiento.

2.1 Celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos que convierten directamente la energía solar en energía eléctrica (corriente continua). Su funcionamiento consiste en el efecto fotoeléctrico, que transforma un fotón en electricidad. Estas celdas fotovoltaicas están fabricadas de materiales semiconductores; como el Silicio, Arseniuro de Galio, entre otros.

2.1.1 Parámetros característicos de la celda

- **Corriente de corto circuito**

Es la máxima corriente producida por una celda solar cuando sus terminales hacen cortocircuito. Para estimar este valor se deben tomar en cuenta los fotones; que son parte del espectro solar y pueden excitar un electrón. En la Figura 1 se puede observar el gráfico del flujo de fotones con respecto a la longitud de onda. El flujo de fotones se puede obtener dividiendo el contenido de energía de un espectro solar con una longitud de onda dada con la energía de un fotón a esa longitud de onda. La energía del fotón E y su longitud de onda se relacionan con la Figura 1:

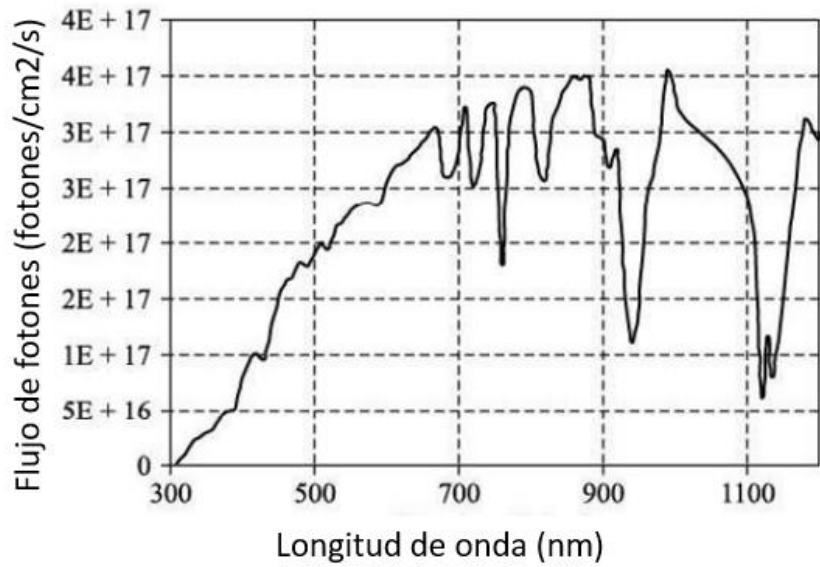


Figura 1: Gráfico de corriente de corto circuito [5]

La corriente de corto circuito I_{sc} es la máxima corriente que fluye a través de una celda solar cuando sus terminales en el lado P y el lado N son cortocircuitados, es decir, cuando el voltaje entre ellos es 0. Cuando ocurre esto la corriente que circula por la celda es la misma que la corriente fotogenerada. [5]

- **Voltaje de circuito abierto**

El voltaje de circuito abierto V_{oc} es el máximo voltaje que se puede obtener de una celda solar cuando sus terminales están abiertos.

Si un fotón de una energía mayor a la del intervalo prohibido de energía es absorbido, excita al electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción, aumentando su energía potencial. Si no hay saltos de potencial en la celda solar, entonces el potencial electrostático que viene dado por:

$$V = -E_g/q \quad (1)$$

es el máximo voltaje posible que se puede obtener en una celda solar. Así el V_{OC} viene dado por la banda de energía gap (intervalo prohibido de energía) del material. Mientras mayor es la banda gap del material, mayor va a ser el V_{OC} . La banda gap del Silicio es $1,1[eV]$; así el voltaje máximo posible que se puede alcanzar en una celda de silicio es de $1,1 [V]$. El voltaje de circuito abierto se expresa como se muestra en la Ec.2:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2)$$

Donde I_0 es la corriente de saturación inversa, I_L la corriente generada por la luz, q es la carga del electrón, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura de la celda.[5]

- **Factor de llenado**

Es la relación entre la máxima potencia que se puede obtener de una celda solar $p_m = V_m \times I_m$ con la potencia ideal de una celda, esta es: $p_0 = V_{OC} \times I_{sc}$. El factor de forma se expresa como se muestra en la Ec. 3:

$$FF = \frac{p_m}{p_0} = \frac{V_m I_m}{V_{OC} I_{sc}} \quad (3)$$

Donde V_m y I_m corresponde al Voltaje y Corriente de máxima potencia.

Estos parámetros se pueden visualizar en la curva I-V Figura 2, que es característica para cada celda módulo fotovoltaico. Esta curva representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje para el dispositivo fotovoltaico bajo condiciones ambientales determinadas. [5]

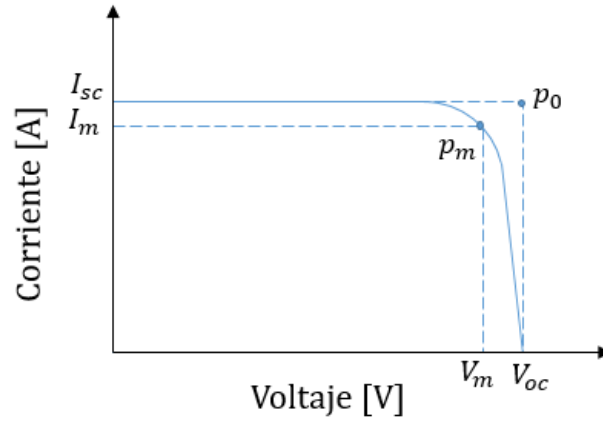


Figura 2: Curva característica de un panel fotovoltaico [5]

- **Eficiencia**

La eficiencia se define como la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada. La máxima potencia de salida alcanzable de una celda es p_m y la potencia de entrada es la potencia entregada por la radiación solar p_{rad} .

Generalmente los fabricantes entregan los datos de eficiencia de referencia del módulo fotovoltaico en condiciones STC (Standard Test Conditions), es decir, a 1000 W/m^2 , 25°C y AM 1,5. La eficiencia de la celda es baja debido a que la una serie de pérdidas definidas anteriormente. [5]

La eficiencia de referencia se puede expresar como se muestra en la Ec. 4:

$$\eta_{ref} = \frac{p_m}{p_{rad}} \quad (4)$$

- **Potencia de salida**

El flujo de salida corresponde a la potencia eléctrica de salida producida por las celdas fotovoltaicas. Esta potencia se puede estimar como se muestra en la Ec. 5:

$$P_{PV} = \eta \phi_{solar} A \quad (5)$$

Donde ϕ_{solar} es la radiación incidente en la celda, A es el área en la que incide la radiación y η es la eficiencia eléctrica de la celda. Esta eficiencia depende de la temperatura de operación de la celda y de la radiación incidente según se muestra en la Ec. 6 [2].

$$\eta = \eta_{ref} [1 + \gamma(T_{PV} - T_{ref}) + \varphi \text{Log}_{10} \phi_{solar}] \quad (6)$$

Donde T_{PV} es la temperatura de la celda, η_{ref} es la eficiencia eléctrica medida en condiciones STC. Esto es a una temperatura ambiente de 25°C (T_{ref}), con una radiación incidente de 1000 W/m^2 , y a condiciones de masa de aire AM 1,5. Usualmente se considera que el último parámetro (φ) no influye considerablemente en el desempeño de la celda por lo que se considera nulo ($\varphi = 0$).

El término γ representa la variación del punto de máxima potencia con la temperatura, según se muestra en Ec. 7; usualmente este valor es entregado por el fabricante. [2]

$$\gamma = \frac{\partial P_{mpp}}{\partial T} = \frac{\partial \eta}{\partial T} \quad (7)$$

2.1.2 Pérdidas en las celdas solares

Una pérdida en una celda fotovoltaica se refiere a una disminución de energía de fotones, que, debido a alguna razón, no es capaz de entregar su energía a un electrón de la celda solar. Esta pérdida puede ser debido a límites del material o por razones tecnológicas. Las razones por la que puede haber pérdida de energía son las siguientes:

- **Pérdida por baja energía de fotones**

Los fotones que tienen menor energía que la banda gap no logran ser absorbidos por el material, y debido a esto no contribuyen a la generación de pares electrón-hueco. Esto se refiere a pérdidas por transmisión y equivale al 23% de las pérdidas de una celda. [6]

- **Pérdida debido al exceso de energía de fotones:**

Cuando la energía del fotón es mayor a la energía de la banda gap, el exceso de energía es liberado como calor al material. Esta pérdida se refiere a pérdida por termalización y para una celda solar, esta pérdida equivale al 33%. [6]

- **Pérdida de voltaje**

Esto se debe por la inevitable recombinación de los electrones. [6]

- **Pérdidas por reflexión**

Parte de los fotones incidentes son reflejados por la superficie de la celda. Esta reflexión puede ser minimizada usando revestimiento anti-reflectante y superficies texturizadas. [6]

- **Pérdidas por absorción incompleta**

Se refiere a la pérdida por aquellos electrones que tienen suficiente energía para ser absorbidos por la celda, pero que no son absorbidos debido al límite del espesor de la capa de silicio. Este tipo de pérdida es importante cuando el espesor de la celda es un factor importante para reducir los costos en materiales. [6]

- **Pérdidas por cubierta de metal**

En las celdas solares de tipo oblea, el contacto de metal por el lado frontal hace que no toda la radiación incidente sea absorbida por la celda, y que solo una parte sea absorbida por este. Además, este mismo contacto produce una sombra que puede ir cambiando para distintas horas del día. [6]

- **Pérdidas por recombinación**

Cuando la radiación incide sobre la celda solar, se generan electrones libres y huecos; y la condición de equilibrio del material es alterada. El proceso de recombinación es inverso a la generación de portadores de carga. En este contexto, los electrones excitados vuelven desde la banda de conducción a la banda de valencia reocupando el estado de energía que estaba vacío en la primera banda; en este sentido, la

recombinación es un mecanismo de restauración del equilibrio. Este fenómeno no es deseable en la celda solar y debe ser evitado tanto como se pueda. La recombinación puede ocurrir en el interior del material o en la superficie. Esta pérdida se puede minimizar usando un tipo apropiado de superficie o con otras técnicas.[6]

- **Pérdidas por factor de llenado**

El factor de llenado (FF), se define como perpendicularidad de la curva I-V y se refiere principalmente a las pérdidas resistivas en la celda solar.[6]

2.2 Módulos fotovoltaicos

Para poder comercializar las celdas, se diseñaron los módulos fotovoltaicos, que simplemente son una agrupación de celdas; principalmente de silicio. La tecnología de los módulos fotovoltaicos planos se encuentra desarrollada desde hace décadas, sin embargo, se empezó a ofrecer como producto comercial masivo desde hace poco y ha ido mejorando sus prestaciones debido a la competencia. Esta tecnología, ha demostrado ser muy efectiva en la generación eléctrica para el mundo, y debido a su versatilidad, la hacen una opción apta para grandes centrales de múltiples MW; como también para instalaciones de baja potencia que puedan ser utilizadas para electrificación rural y comunicaciones.

2.2.1 Composición de módulos fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos disponibles en el mercado son de celdas de silicio, debido a su costo y generación, que supera al resto de celdas semi conductoras. Se pueden utilizar distintos tipos de celdas, como las que se mencionan a continuación.

- **Celdas Monocristalinas**

Como su propio nombre lo dice, las celdas de silicio monocristalinas están compuestas por células monocristalinas. Son ese tipo de célula que, a simple vista, podemos diferenciar por su color “negro” y con las esquinas recortadas con un chaflán (resultado

del corte de la célula). Son los módulos fotovoltaicos de más eficiencia que podemos encontrar, ya que siempre superan en eficiencia y rendimiento a los policristalinos. [5]

- **Celdas policristalinas**

Las células de silicio policristalino (mc-Si) también utilizan obleas de silicio como sustrato, pero a diferencia de las monocristalinas, éstas proceden del corte de un bloque de silicio que se ha dejado solidificar lentamente en un crisol y que está formado por muchos pequeños cristales de silicio.

Este tipo de elaboración es menos costoso que el anterior, pero reduce considerablemente la eficiencia de las células. [5]

- **Celdas amorfas**

Estas celdas se fabrican cuando el silicio no se ha cristalizado. El funcionamiento de una célula solar de capa fina de silicio amorfo es el mismo que las cristalinas pero su elaboración es muy diferente. Los aspectos característicos de esta tecnología son que el proceso de fabricación es sencillo y de fácil automatización, la necesidad de poco material activo y reducción del gasto energético, y del costo y la facilidad para realizar módulos flexibles; con una óptima eficiencia cuántica en un amplio rango del espectro.

Las células de silicio amorfo han sido las primeras células de capa fina que se comenzaron a comercializar, sin embargo, debido al descenso de precios experimentado por los paneles solares cristalinos, han ido perdiendo posiciones en el mercado y actualmente su implantación es muy reducida. [5]

2.2.2 Distribución de celdas en módulo FV.

El 99% de los módulos FV instalados en plantas actualmente son con módulos FV monofaciales, esto significa; que las celdas de silicio están únicamente en la cara delantera. Actualmente, se están diseñando módulos bifaciales, los cuales tienen celdas en ambas caras del módulo, por lo que los fotones que no entren por la cara delantera

pueden ingresar por la parte trasera. Teóricamente, se espera que los paneles bifaciales generen como mínimo un 25% más que los módulos normales, pero hasta el momento la tecnología no es competitiva en costos.

2.2.3 Elementos que integran un módulo fotovoltaico

Con el fin de asegurar una gran vida útil de las celdas, éstas tienen que estar protegidas de las condiciones medioambientales en las cuales van a operar; ya que la humedad puede oxidar los contactos de metal y afectar la superficie anti-reflectante del panel, lo que conllevaría a un menor desempeño en el funcionamiento de la celda. Los elementos que integran un panel fotovoltaico son [7]:

- **Vidrio templado**

Tiene como función principal la protección de los materiales al interior de la celda, y, además, de servir como filtro de radiación, dejando fuera a gran parte de la radiación UV. Es un vidrio templado de baja reflectividad lo que permite absorber la luz, a diferencia de los vidrios utilizados comúnmente en las casas.

- **Celdas fotovoltaicas**

Son obleas de silicio policristalino o monocristalino, descritas anteriormente.

- **Capa de EVA**

Las celdas de silicio son encapsuladas en una capa de EVA para fijar las celdas fotovoltaicas a la cubierta de vidrio y al material de encapsulamiento en la parte de atrás para así proporcionar resistencia a la humedad y aislación eléctrica.

- **Capa polimérica de Tedlar**

Esta capa está hecha de fluoruro de polivinilo (PVF) y tiene como función la de proporcionar un aislamiento adicional y protección contra la humedad a las celdas PV.

- **Junction box**

Encargada de contener las conexiones eléctricas, así evitar su manipulación.

- **Marco**

Por último, se inserta un marco de aluminio para facilitar la manipulación del módulo.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede observar la composición estándar de los paneles fotovoltaicos

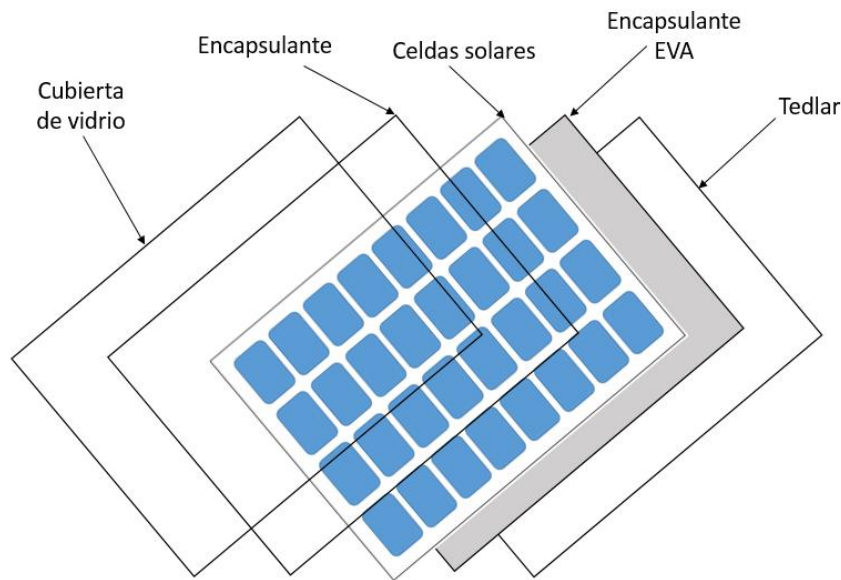


Figura 3: Elementos de un módulo fotovoltaico.

Fuente: Fabricación propia, basada en estudio de Mostafid A., 2007.

2.3 Espumas metálicas

La espuma metálica es un material que se caracteriza por tener una baja densidad y una buena combinación de diferentes propiedades de la materia, tales como: absorción de energía al impacto, permeabilidad a diferentes fluidos, propiedades acústicas y, por supuesto, propiedades positivas de transferencia de calor (en el caso de espumas de células abiertas).

Aunque actualmente la tecnología de formación de espuma está más avanzada, el comportamiento térmico e hidráulico solo empieza a ser caracterizado en las últimas décadas.

2.3.1 Métodos de producción

Los métodos de producción de espumas metálicas se pueden dividir en tres grupos, y en cada uno de éstos, se puede obtener células de varios tamaños, diferente morfología de células (abierta o cerrada) y diferencias notorias en el precio.[8]

2.3.1.1 Por medio de fusión

Para producir eficientemente una espuma desde un metal fundido, se necesita introducir un gas de manera apropiada, para poder obtener al final una espuma sólida de alta porosidad. Así, el metal se transforma directa o indirectamente en una espuma.

Para conseguir esta fusión existen diferentes métodos, de los que destacan los siguientes:

- **Inyección de gas**

La inyección de gas consiste en introducir aire, nitrógeno o argón; en el metal fundido, para que las burbujas de gases sean atrapadas dentro de éste.

En las aleaciones de aluminio, es fácil de aplicar debido a su baja densidad y al hecho de que no se produce mucha oxidación al exponerlo al aire (si se usa el aire como gas).

- **Adición de elemento espumante**

Otro método para producir espumas es añadir un elemento espumante (usualmente hidruro de titanio o hidruro de zirconio) en el fundido. El elemento espumante se descompone por efecto de la temperatura y libera gas en el fundido.

- **Método de inversión usando un polímero como precursor**

En este proceso, se trata de un molde de plástico que está recubierto por un material refractario. El polímero es extraído por vaporización, dejando un molde de células abiertas. Luego, se añade el metal fundido en este molde y se solidifica

unidireccionalmente. Una vez que éste se enfría, se puede quitar el molde de material refractario para la obtención de una espuma metálica.

La principal ventaja de este método es que permite obtener un extenso volumen de espuma y se evidencia un proceso continuo. No obstante, podemos anotar como desventaja el hecho de que se necesita cortar la espuma, lo que daría como resultado un material compuesto por células abiertas al final del proceso.

2.3.1.2 Metalurgia de polvos

En lugar de metal fundido, se puede utilizar metal sólido en forma de polvo para producir metales celulares. El polvo se mantiene de forma sólida en todo el proceso.

- **Estructuras esféricas huecas**

Durante este proceso se utilizan esferas metálicas huecas. Al atomizar con un gas inerte se pueden obtener esferas huecas de metal con diámetro entre 300 y 1000 μ m.

Luego, estas partículas pueden ser consolidadas mediante HIP, por vacío o por sinterizado en la fase líquida.

- **Atrapamiento de un gas por expansión**

En este medio, los polvos del metal se sellan en un recipiente, el cual está cerrado. Luego, este envase se coloca al vacío para eliminar el oxígeno y se añade argón. Después, el recipiente es sellado nuevamente y se consolida.

Un paso de laminación es introducido para refinar la estructura y con el fin de obtener una distribución uniforme de pequeños poros. Finalmente, por cocción de unos 900°C durante 20-30 horas, se observa la expansión de la espuma.

- **Mediante consolidación de polvos metalúrgicos**

Este proceso consiste en la previa preparación de una mezcla de polvo metálico y un espumante dispersado en un medio orgánico. El material es montado en espuma y luego es calentado para formar la estructura porosa. Este procedimiento se puede utilizar en

muchos materiales, tales como el níquel, hierro, cobre, acero inoxidable, bronce y aluminio.

- **Fabricación de espumas por Impresión 3D**

En la actualidad las impresoras 3D son el método más utilizado para la construcción de piezas complejas, desplazando a fresas, tornos, y otros equipos de manufactura, y caracterizándose principalmente por su fácil utilización. El funcionamiento de la espuma es el siguiente: Se crea la primera capa y se van añadiendo a las capas superiores otras subcapas, hasta la completa fabricación del objeto.

Tras este proceso, se retira la pieza fuera de la cuba de fabricación y una vez la pieza “limpia”, se puede dar a ésta el acabado superficial querido. Según el grosor de las capas, se pueden obtener geometrías más o menos precisas; por ejemplo, un menor espesor de capa permite obtener una geometría más precisa.

Esta tecnología permite obtener piezas con geometrías altamente complejas. No obstante, los procesos de AM (“Additive Manufacturing”) no son destacados por una alta velocidad en la fabricación, y por dicho motivo no se aplican para grandes volúmenes de producción.

2.3.2 Aplicaciones

Actualmente, las espumas son comerciales y existen varias aplicaciones en distintos ambientes, tal como; en la industria del transporte, en la aeroespacial, de la construcción, eléctrica, etc., normalmente, para las espumas metálicas se utilizan espumas de células abiertas, donde las aplicaciones más factibles son las siguientes:

- Disipadores de calor.
- Filtros porosos.
- Electrodo porosos.
- Absorbedores de sonido.

- Absorbedores de la energía de impacto.
- Insertos biocompatibles.
- Absorbedores de energía térmica.
- Materiales catalizadores.
- Aplicación electroquímica.
- Entre otras aplicaciones.

Según la aplicación (de tipo funcional o estructural), se busca una espuma de células más o menos abiertas, que se aprecia en la figura 4 [9]:

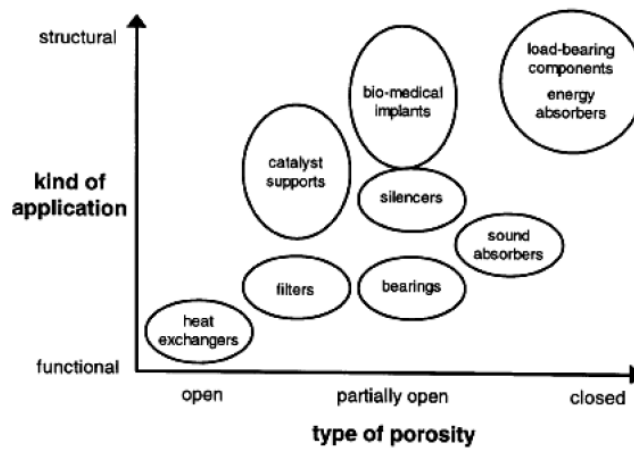


Figura 4: Aplicaciones de espumas de aluminio [9]

2.3.3 Propiedades de transferencia de calor de las espumas metálicas

Las espumas de células abiertas tienen una gran superficie específica, una alta conductividad térmica, y una tortuosa trayectoria de flujo (lo que permite una mejor mezcla del fluido). Esto permite alcanzar buenas propiedades de transferencia de calor tanto por conducción, convección o radiación.

También, se demuestra que hay numerosos estudios en base a las espumas metálicas y la transferencia de calor dentro de ellas. En esta parte se presentan los diferentes tipos de transferencia de calor que pueden ocurrir en dichos materiales, ya sea por: conducción, convección natural, convección forzada o radiación. Para cada tipo de transferencia de calor, se presentarán las diferentes características importantes a tomar en cuenta, los modelos desarrollados en estudios antecedentes para obtener estos parámetros, y las conclusiones a las que han llegado varios autores.

- **Conducción en espumas metálicas**

En el caso de las espumas metálicas se utiliza la conductividad térmica efectiva, pero es la conductividad real (metal + aire) que tiene la espuma metálica. Esto puede variar según varios parámetros tal como lo son la porosidad o la conductividad térmica del fluido. Según los autores, hay otras dependencias, por ejemplo; la densidad de poros o la forma de ellos.

La matriz usada para las espumas metálicas es generalmente de aluminio o de cobre, metales que tienen alta conductividad térmica. En efecto, esto permite aumentar considerablemente la conductividad térmica global de la espuma.

CALMIDI y MAHAJAN (1999) [10] han estudiado experimentalmente la conductividad térmica efectiva de espumas metálicas de alta porosidad; este modelo, estuvo de acuerdo con los resultados experimentales y fue utilizado para la evaluación de diferentes espumas como posibles candidatos enfocados en el ideal de disipar el calor.

BOOMSMA y POULIKAKOS (2001) [11] han propuesto un modelo 1D para la conducción de calor en el interior de espumas metálicas. El modelo está basado sobre una ideal geometría 3D de las espumas, y permite tener en cuenta la influencia de la estructura de la fase sólida. Este modelo nos muestra que la conductividad del fluido tiene solo pocos efectos sobre la conductividad térmica efectiva, y también para las espumas de alta porosidad. Sería controlada en mayor parte por la conductividad de la fase sólida. Los resultados que han obtenidos para obtener la conductividad térmica

efectiva están de acuerdo con los que habían encontrado CALMIDI y MAJAHAN (1999).

BHATTACHARYA (2002) [12] estudió las propiedades de conductividad térmica efectiva, permeabilidad y coeficiente de inercia de espumas metálicas de alta porosidad. Formuló un modelo teórico a partir de lo que ya habían encontrado en 1999. El modelo tiene en cuenta las disposiciones en serie y en paralelo.

- **Convección en espumas metálicas**

La convección natural tiene poca influencia con respecto a la transferencia de calor en comparación a la conducción y a la convección forzada. No obstante, sería un medio de bajo costo, sencillo y silencioso para la disipación de calor de aparatos electrónicos. Este tipo de transmisión calórica ha sido estudiado por BHATTACHARYA [12] para espumas metálicas (células abiertas) de alta porosidad (entre 0.89 y 0.97).

Además, las experiencias mostraban que, para la misma porosidad, la transferencia de calor disminuye cuando la densidad de poros es grande.

Igualmente, para una dimensión de poros dada, la transferencia de calor aumenta con la porosidad; esto se explica, por el hecho de que las espumas con largos poros tienen (en general) una mayor permeabilidad, lo que facilita la entrada del aire dentro del material, por lo tanto, mejora los fenómenos de convección.

- **Convección forzada en espumas metálicas**

Los fenómenos provocados por la convección forzada en las espumas de aluminio han sido temas de estudio para incontables autores, en donde se busca determinar y asociar propiedades físicas y térmicas.

CRUZ--RUIZ (2004) [13] ha hecho en su estudio la modelización de transferencia de calor dentro de espumas metálicas de células abiertas. Se quiere proponer un modelo analítico para determinar la distribución de temperatura en 2D en el interior de espumas de aluminio en régimen permanente de convección forzada. Se encontró que el perfil de velocidad se aplanaba cuando entra en la espuma, como se observa en la figura 5.

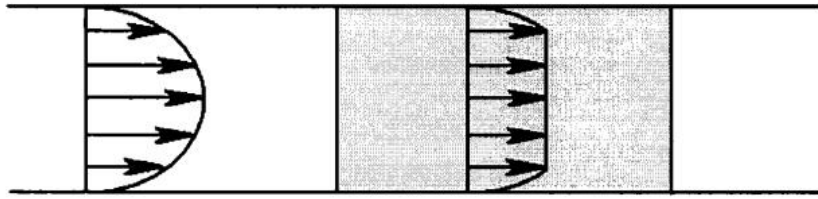


Figura 5: Perfil de velocidad en espuma de aluminio [13]

CRUZ--RUIZ [13] considera que como aplicamos un flujo de calor constante en la base de la espuma, la temperatura de la base se puede considerar constante. Además, llegó a las conclusiones siguientes:

- La distribución de temperatura cambia según la dirección del flujo.
- El valor máximo para la temperatura del fluido y del sólido se sitúa en la salida de la espuma.
- El coeficiente de convección no es constante a través de la espuma, ya que varía según la dirección del flujo (esto afecta a la distribución de la temperatura).
- La variación del coeficiente de convección es debido a la reducción de las velocidades de poros cuando el aire avanza en la espuma.

Por otra parte, un estudio de QUENTIN LEVICES [9] señala que la velocidad del aire aumenta cuando entra en la espuma, pudiendo crecer entre un 200% a 300% dependiendo el tamaño del poro, esto se debe a la caída de presión.

En su estudio de simulación de espuma de aluminio, utilizando una porosidad del 89%, señala que al tener una velocidad de entrada de $0,5 \text{ m/s}$, la velocidad local máxima observada para la espuma de 10 puntos es de $1,25 \text{ m/s}$ (aumentando un 250%) mientras que en la espuma de 20 puntos es de $1,41 \text{ m/s}$ (aumentando un 282%). Se entiende entonces, que cuantos más puntos haya, más pequeños serán los poros. Por lo tanto, la espuma hecha con 20 puntos tendrá poros más pequeños que los que tiene la espuma hecha con 10 puntos. En conclusión, mientras más pequeños son los poros, mayor es la velocidad presente dentro de la espuma de aluminio.

3 Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conocimientos mínimos para conocer y entender los requerimientos de diseño, así poder enfrentar de mejor manera el problema propuesto.

3.1 Diseño conceptual

El diseño conceptual es el primer paso del proceso de diseño, y en este se debe lograr claridad sobre el problema a resolver. Para ello, se analizan las necesidades del cliente, las cuales se traducen en los atributos del diseño, ya sea en el sentido de las funciones y las características a solventar. Luego, se establecen los requerimientos técnicos y se procede a la recolección de información mediante el estudio de patentes, al análisis de la competencia, entrevistas a expertos, entre otros. Posteriormente se inicia la generación de ideas en base a la información recolectada y a las ideas de los miembros del equipo diseñador.

Se debe entender este proceso como un sistema de constante evaluación y corrección; es decir, una vez terminado el diseño conceptual éste debe ser evaluado nuevamente para lograr obtener al final del proceso un concepto claro y bien definido del producto a diseñar.

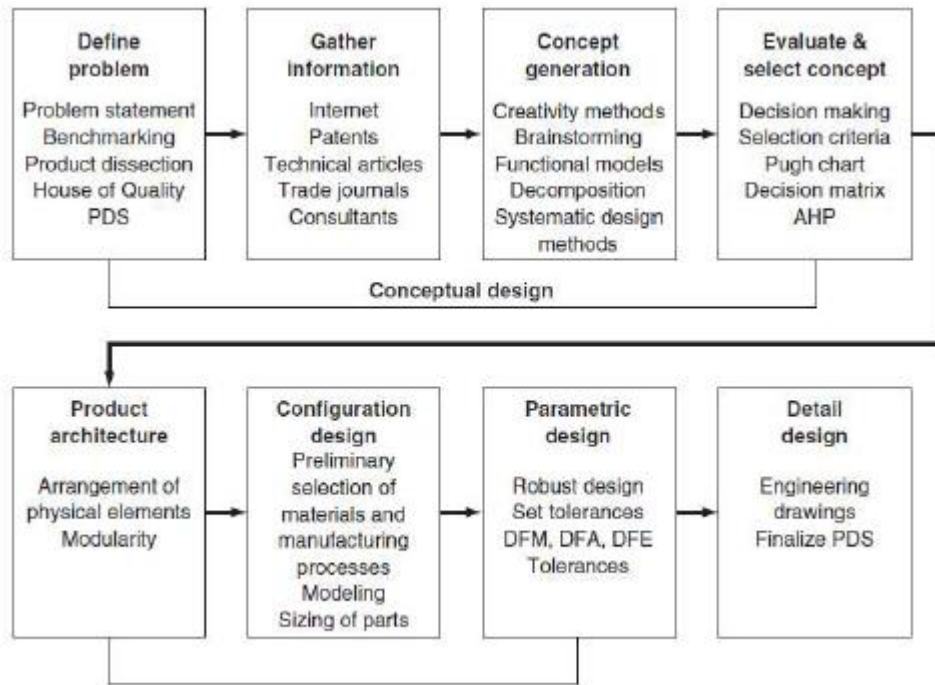


Figura 6: Etapas del diseño conceptual. [14]

3.1.1 Definición del problema

El primer paso en el diseño conceptual es la definición del problema, esta debe ser establecida en base a las necesidades que el producto debe solventar. El primer acercamiento sobre el problema es la declaración del cliente; esta declaración o problemática debe ser traducida en forma de objetivos, restricciones y funciones para obtener las características que deberá poseer el producto a futuro.

Los requerimientos del producto que informa el cliente se deben entender correctamente para tomar decisiones sobre las características del diseño, por esto se deben clasificar según el nivel de influencia sobre el cliente. El diagrama de Kano es una herramienta que permite visualizar el nivel de dichas funciones, clasificándolos en cuatro categorías:

- Características esperadas: aquellos atributos básicos que debe poseer el producto a diseñar.

- Características solicitadas: las características específicas que el cliente necesita que el diseño contenga. Estas deben ser presentadas en forma de atributos.
- Características no solicitadas: los atributos no especificados por el cliente que son, sin embargo, muy valorados.
- Especiales: características que, si bien no son requerimientos directos, logran que el producto sea diferente a la competencia y considerado como único.

Para realizar un análisis completo sobre las necesidades del cliente, se deben organizar y dar ponderación a los objetivos, restricciones y funciones agrupándolas según criterios de similitud. Por ello, es importante contextualizar el producto de acuerdo con cada cliente. Con la información obtenida y ponderando los criterios se tomarán futuras decisiones sobre qué priorizar en el diseño. [14]

3.1.2 Búsqueda de información

La búsqueda de información se debe realizar por los medios clásicos, entre los que destacan: búsqueda de patentes, artículos de investigación, consultoras y competencia comercial.

En la búsqueda de información se genera una parte del input para la realización de conceptos, la cual será la base del diseño y por esto la información siempre debe ser contextualizada, categorizada, analizada y verificada con fin de no tener un exceso de información poco relevante o errónea. La búsqueda de información se divide en dos etapas secuenciales:

- La búsqueda externa: que consiste en recopilar ideas a través de la búsqueda de información en diferentes medios, tales como patentes, artículos de investigación, publicaciones seriadas, consultoras, competencia, artículos del gobierno, artículos de la industria y competencia comercial.
- La búsqueda interna: en esta etapa, el equipo de diseño tiene suficientes herramientas para proponer soluciones. El objetivo de esta etapa es proponer distintas alternativas para resolver los problemas del diseño. [14]

3.1.3 Generación concepto

El concepto del diseño es la concepción de la idea que originará las bases para el diseño final; es el vínculo temático entre las funciones y el diseño. La mayor dificultad en el proceso de la generación de concepto son las barreras del pensamiento creativo, estos corresponden a bloqueos mentales que impiden concebir las distintas alternativas posibles. Existen diversos métodos que mejoran el proceso de generación de conceptos y contrarrestan los bloqueos, y en específico, que promueven las habilidades de reconocer el problema, de producir un gran número de alternativas para solucionarlo, de tener distintos focos para el mismo inconveniente y de producir soluciones originales. Los principales métodos para generar conceptos son el Brainstorming, el método de Delphi y los gráficos morfológicos. Estas técnicas de pensamiento son clásicas e intuitivas. Existen otras técnicas más directas que tienen estructura lógica y sistemática para la generación de conceptos, de los cuales destacan las técnicas SCAMPER, TRIZ y diseño axiomático. [17]

3.1.4 Selección de concepto

Para la generación de conceptos existen variadas técnicas y métodos anteriormente mencionados, de estos se crean varias alternativas para el diseño final. Sin embargo, abordar todos los conceptos generados daría como resultado un diseño final caótico y difícil de concebir, por esto se requiere tener criterios para seleccionar un concepto sobre otro. Los pasos de este proceso de selección son: evaluar, comparar y seleccionar. La herramienta árbol de decisión suele dar buenos resultados, pero también se suelen utilizar métodos intuitivos o matrices de decisión. Estos últimos, permiten guiar al diseñador en la selección de conceptos, tomando como criterio de selección los objetivos de diseño con sus pesos ponderados.

Si en la definición del problema quedaron expuestos los criterios de importancia y sus respectivos ponderadores, se recomienda utilizarlos en la selección de conceptos. En este grupo se encuentran la técnica de matriz de selección de Pugh y el método de pesos ponderados. En la matriz de Pugh se usa un concepto DATUM, el cual se emplea para

comparar los conceptos propuestos con una solución ideal. En el caso del método de pesos ponderados se usa una matriz con los criterios de importancia ya analizados con sus respectivos pesos. Luego a cada una de las alternativas de conceptos se les da una nota de estos criterios y luego mediante evaluación acumulada de pesos se selecciona la mejor alternativa para el cliente. [13]

3.1.5 Arquitectura del producto

El diseño conceptual debe ser la base para comenzar esta etapa, donde se deben determinar y organizar los elementos físicos del diseño y sus respectivas funciones. La arquitectura basada en módulos organiza las piezas en subconjuntos de tal forma que cada módulo sea capaz de solventar una función en específico; esto facilita el diseño en los pasos posteriores ya que trata partes del boceto por separado y genera facilidad al entendimiento del producto para el usuario. Estos módulos deben realizar solo una o pocas funciones y deben ser definidas las relaciones entre distintos módulos.

La arquitectura integral reduce el número de componentes en comparación a la arquitectura de módulos. Un subconjunto es encargado de realizar varias o todas las funciones. Uno de los aspectos positivos de este tipo de arquitectura es el reducido volumen del diseño final y que en general tiene un costo inferior al diseño por módulos.

Los aspectos negativos son el entendimiento del producto por parte del usuario, los riesgos de falla de todas las funciones simultáneamente y la poca accesibilidad a modificaciones y a mantenimientos.[13]

3.1.6 Configuración del diseño

En esta fase se establecen la forma y las dimensiones generales de los componentes. Además, se establecen las piezas con propósitos especiales y se seleccionan los componentes estándar. En general, no es posible tomar estas decisiones sin considerar los materiales y los procesos de manufactura asociados, por este motivo, en esta etapa es importante lograr definir con claridad los elementos a utilizar y la implicancia de éstos en el diseño.

En esta fase se deben tener en cuenta la gama de las posibles formas de utilizar el producto, evitando riesgos en su mal uso, tales como el atrapamiento de dedos entre interfaces de módulos o espacios riesgosos para el personal. También, se deben cuidar las funciones críticas del producto, de forma que errores en el uso o mantenimientos programados causen la menor cantidad de efectos negativos posibles.

Para realizar una configuración óptima es necesario entender que un diseño complejo no es sinónimo de bueno, y que modelos simples, fáciles de entender y de reproducir suelen ser mejores. Es necesario también tener claridad de las funciones y siempre considerar el factor de la seguridad en la toma de decisiones. [13]

3.1.7 Diseño paramétrico

En el diseño paramétrico se les atribuye a componentes específicos valores con los cuales se pueden establecer y concretar partes del proyecto que están bajo el control del diseñador. En general, se piensa que estas variables solo corresponden a dimensiones y tolerancias, pero pueden ser también elecciones de material, la calidad superficial y tratamientos térmicos.

El objetivo del diseño paramétrico es establecer numéricamente las variables paramétricas para realizar el producto optimizando el rendimiento y los costos. [13]

3.1.8 Diseño en detalle

Diseño detallado o al detalle es el último paso del proceso de diseño, y en este se deben presentar las decisiones finales de etapas previas además de incluir todos los detalles sobre las piezas y los módulos del diseño. Se deben crear documentos de ingeniería tales como planos de componentes, planos de conjuntos y diagramas necesarios.

Con la información procedente del diseño detallado se debe solventar todo lo necesario para la fabricación, por este motivo, es importante presentar en planos de ingeniería la lista completa de materiales. Un buen mecanismo para esto es generar estas listas para cada módulo y señalar la dependencia de ellos con el diseño final.

Todas las tareas para lograr el diseño final son incluidas en el diseño al detalle, tales como memoria de cálculo, verificación del prototipo en programas CAD, estimación del costo final y datos de los procesos de manufactura. Se debe entender que este proceso es el que relacionará el diseño con los fabricantes, y para facilitar la comprensión de la información es importante revisar la claridad de esta información.

3.2 Transferencia de calor

Para analizar el comportamiento de la temperatura al interior de un sistema fotovoltaico hay que reconocer cuáles son los mecanismos que tiene la energía para disiparse. Los tipos de transferencia de calor existentes en la naturaleza son tres: **conducción**, **convección** y **radiación**.

3.2.1 Conducción

La conducción corresponde a la transferencia de calor que ocurre en un sólido o en un fluido en reposo mediante movimientos de rotación y vibración a escala molecular. Estos movimientos son más intensos a altas temperaturas, por lo que la transferencia de energía ocurre desde zonas de alta a baja temperatura. El físico francés Jean-Baptiste Joseph Fourier describió el flujo de calor como proporcional al gradiente local de temperatura y a la conductividad térmica del material, relación hoy conocida como Ley de Fourier.

Si en un medio existe un campo de temperatura $T(x, y, z, t) = T(\vec{r}, t)$, la ley de Fourier expresa los flujos de calor instantáneos por:

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (8)$$

Donde:

k : Conductividad térmica del material [$W/m \cdot K$]

$\vec{q}$: Flujo de calor por unidad de tiempo y área [W/m^2]

Este mecanismo de transferencia de calor permite modelar la transferencia de energía entre capas del módulo fotovoltaico compuesto de distintos materiales y espesores.

3.2.2 Convección

La convección corresponde a transferencia de calor dentro de un fluido (líquido o gaseoso) que fluye con movimientos macroscópicos, es decir, la transferencia de energía ocurre por la mezcla de porciones de fluido a distintas temperaturas. Este movimiento macroscópico del fluido se conoce como “campo de velocidades” y es el encargado de generar el traspaso de calor. Se le atribuye a Newton el descubrimiento de la llamada ley de enfriamiento, que dice que el flujo de calor de un cuerpo al espacio es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y su entorno. En este sentido se describe la ecuación para el cálculo del flujo de calor por convección en estado estacionario.

$$q_{conv} = h\Delta T \quad (9)$$

h : Coeficiente convectivo [$W/m^2 \cdot K$]

ΔT : Diferencia de temperatura entre el cuerpo y su entorno [$^{\circ}C$ o K]

El cálculo del coeficiente convectivo para las distintas situaciones depende de si se trata de *convección natural* (libre al ambiente) o *forzada* (provocada por un fluido en movimiento). Este tipo de transferencia de calor estará presente tanto en el estudio de pérdidas por convección sobre el panel (en contacto al aire que rodea el panel) como en el calor disipado por la aleta (convección libre o forzada).

Para caracterizar los coeficientes convectivos respectivos a la geometría de análisis en función de las variables disponibles es necesario contar con la ayuda de algunos números adimensionales, como lo es el número de *Reynolds*, *Prandtl* y *Nusselt*, que son los que permiten caracterizar el comportamiento del flujo de acuerdo con el valor que éstos toman

en situaciones dadas. En el análisis de los módulos fotovoltaicos, se tomarán algunos casos genéricos para el análisis, por lo que no será necesario explicar en profundidad las ecuaciones de los cálculos de aquellos números.

3.2.3 Radiación

El tercer mecanismo de transferencia de calor es la radiación, que no es otra cosa que ondas electromagnéticas propagándose a través de un medio transparente como el aire o el vacío. El intercambio de calor por radiación entre cuerpos se puede expresar como:

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (10)$$

Donde:

ε : Emisividad del cuerpo

σ : Constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$

T : Temperatura de los cuerpos 1 y 2 [K]

Este tipo de transferencia servirá para definir las pérdidas de calor hacia la atmósfera desde el panel fotovoltaico.

3.2.4 Resistencia térmica

Se define la resistencia térmica, como un análogo a una resistencia eléctrica, a la oposición que opone un cuerpo o volumen a que el calor fluya a través de él. Es una propiedad que depende del material del que esté compuesto el cuerpo, del área de intercambio térmico y también de la geometría. La resistencia térmica queda caracterizada por la ecuación del calor:

$$Q = UA\Delta T = \Delta T/R \quad (11)$$

$$R = \Delta T/Q \quad (12)$$

U : Coeficiente global de transferencia de calor [$W/m^2 \cdot K$]

A : Área de intercambio de calor [m^2]

Q : Calor a disipar [W]

ΔT : Diferencia de temperatura [$^{\circ}C$ o K]

Quedan caracterizadas así entonces las resistencias de tipo conductivas (unidimensional)

$$R_{cond} = t/kA \quad (13)$$

A : Área de intercambio de calor [m^2]

t : Espesor del cuerpo conductor [m]

k : Conductividad térmica del material [$W/m \cdot K$]

Y convectivas:

$$R_{cond} = 1/hA \quad (14)$$

A : Área de intercambio de calor [m^2]

h : Coeficiente convectivo [$W/m^2 \cdot K$]

4 Diseño conceptual

4.1 Evaluación de las necesidades del cliente

La empresa Laboratorio Solar SpA, dedicada a desarrollar tecnología enfocada en la industria solar, ha solicitado el diseño de un sistema de enfriamiento para módulos fotovoltaicos monofaciales, con el fin de aumentar su generación y vida útil. Por otra parte, se busca que el sistema de enfriamiento aproveche el exceso de energía térmica, así poder utilizarlo en otro proceso.

4.1.1 Objetivos

En base a estos conceptos, se procede a construir la lista de objetivos

Tabla 1: Lista de objetivos basados en las necesidades del cliente.

Lista de atributos
1. Capaz de enfriar al módulo
2. Prototipo para paneles de 320 w (1990 x 992 mm)
3. Rápido montaje
4. Producto ecológico
5. Bajo costo de fabricación
6. Bajo costo de instalación
7. Bajo costo de montaje
8. Bajo costo de mantenimiento
9. Durabilidad de mínimo 20 años
10. Fluido refrigerante recirculable
11. Peso inferior a 10 kilos
12. Resistente a Altas temperaturas (80°C)
13. Resistente a la corrosión
14. No inflamable

Lista de atributos
15. De rápida limpieza
16. Aprovechar energía térmica y solar
17. Producto estético
18. Diseño modular
19. Fácil transporte
20. Bajo consumo de líquido refrigerante
21. De fácil utilización
22. De rápida instalación
23. Que no requiera supervisión constante
24. Recircular fluido sin necesidad de utilizar bomba
25. Relación precio/eficiencia sea superior a la que está presente actualmente.
26. El material escogido debe ser conductor.
27. Capaz de reducir la temperatura del módulo más de 20°
28. Capaz de transportar la mayor cantidad de energía térmica

4.1.2 Categorización de lista de atributos

A continuación, se agrupan los atributos en términos de ingeniería, agrupándolos en objetivos, funciones y restricciones.

Tabla 2: Categorización lista de atributos.

Objetivos
• Rápido montaje • Producto ecológico • Bajo costo de fabricación • Bajo costo de instalación • Bajo costo de montaje • Bajo costo de mantenimiento

Objetivos	
• Fluido refrigerante recirculable • Resistente a la corrosión • No inflamable • De rápida limpieza • Producto estético • Diseño modular • Fácil transporte • De fácil utilización • De rápida instalación • Que no requiera supervisión constante • Relación precio/eficiencia sea superior a la que está presente actualmente • Recircular fluido sin necesidad de utilizar bomba	
Restricciones	Funciones
• Prototipo para paneles de 250 w (1640 x 992 mm) • Durabilidad de mínimo 20 años. • Peso inferior a 10 kilos. • Resistente a Altas temperaturas (80°C) • El material escogido debe ser conductor.	• Capaz de enfriar al módulo • Aprovechar energía térmica y solar • Bajo consumo de líquido refrigerante • Capaz de reducir la temperatura del módulo más de 20° • Capaz de transportar la mayor cantidad de energía térmica.

4.1.3 Categorización de objetivos en subgrupos.

Para realizar un mejor análisis, se dividen los objetivos en subgrupos, dependiendo de una característica relevante que debe poseer el producto:

Tabla 3: Categorización de objetivos en subgrupos.

Costo
Bajo costo de fabricación
Bajo costo de instalación
Bajo costo de montaje
Bajo costo de mantenimiento
Relación precio/eficiencia sea superior a la que está presente actualmente
Autonomía
Producto ecológico
Producto estético
De rápida limpieza
Fácil transporte
De rápida instalación
Que no requiera supervisión constante
Operación
Capaz de enfriar al módulo
Fluido refrigerante recirculable
Recircular fluido sin necesidad de utilizar bomba
Bajo consumo de líquido refrigerante
De fácil utilización

Capaz de reducir la temperatura del módulo más de 20°
Capaz de transportar la mayor cantidad de energía térmica
Estructural
Prototipo para paneles de 250 w (1640 x 992 mm)
Aprovechar energía térmica y solar
Durabilidad de mínimo 20 años
Resistente a Altas temperaturas (80°C)
Peso inferior a 10 kilos
No inflamable
Resistente a la corrosión
Rápido montaje
Diseño modular
El material escogido debe ser conductor

4.1.4 Lista jerárquica de objetivos:

A continuación, se jerarquizan los objetivos en cada subgrupo, asignando una letra a cada categoría general y un número dependiendo de su relevancia al objetivo:

Tabla 4: Lista jerárquica de objetivos.

Lista jerárquica de objetivos
A.- Costo
B.- Autonomía
C.- Operación
D.- Estructural

Lista jerárquica de objetivos
A1.- Bajo costo de fabricación
A2.- Bajo costo de instalación
A3.- Bajo costo de montaje
A4.- Bajo costo de mantenimiento
A5.- Relación precio/eficiencia sea superior a la que está presente actualmente
B1.- Producto ecológico
B2.- Producto estético
B3.- De rápida limpieza
B4.- Fácil transporte
B5.- De rápida instalación
B6.- Que no requiera supervisión constante
C1.- Capaz de enfriar al módulo
C2.- Fluido refrigerante recirculable
C3.- Recircular fluido sin necesidad de utilizar bomba
C4.- Bajo consumo de líquido refrigerante
C5.- De fácil utilización
C6.- Aprovechar energía térmica y solar
C7.- Capaz de reducir la temperatura del módulo más de 20°
C8.- Capaz de transportar la mayor cantidad de energía térmica
D1.- Prototipo para paneles de 250 w (1640 x 992 mm)
D2.- Durabilidad de mínimo 20 años

Lista jerárquica de objetivos
D3.- Resistente a Altas temperaturas (80°C)
D4.- Peso inferior a 10 kilos
D5.- No inflamable
D6.- Resistente a la corrosión
D7.- Rápido montaje
D8.- Diseño modular
D9.- El material escogido debe ser conductor

4.1.5 Lista jerárquica de objetivos con peso absoluto y pesos totales

Para objetivo de diseño se asigna un peso que otorga la relación entre las categorías generales, este peso se denomina importancia relativa y se comparará la relación existente entre estas, donde mientras más alto el valor, mayor relación tienen. Luego se sumarán los puntajes calculados en cada categoría/objetivo y se determinará la importancia que posee ésta mediante un peso absoluto.

Tabla 5: Valoración de pesos absolutos. [14]

Valor de escala	Explicación
1	Importancia equivalente. Las dos alternativas son similares.
3	Importancia moderada de una sobre otra. La experiencia favorece una alternativa sobre la otra.
5	Importancia esencial. La experiencia favorece fuertemente una alternativa sobre la otra.
7	Importancia muy fuerte. Una alternativa es fuertemente favorecida y su predominación demostrada en la práctica.

Valor de escala	Explicación
9	Importancia extrema. La evidencia que favorece una alternativa sobre la otra es de las más grandes posibles.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los 2 juicios adyacentes.
1/n	Recíprocos para comparación inversa.

Con esto es posible obtener los pesos totales de cada objetivo, así conocer la prioridad de cada uno de estos. Las tablas con el peso ponderado calculadas se encuentran en la sección de anexos.

Tabla 6: Pesos totales de los objetivos.

Pesos totales	
A1.- Bajo costo de fabricación	0,1655
A2.- Bajo costo de instalación	0,0789
A3.- Bajo costo de montaje	0,0309
A4.- Bajo costo de mantenimiento	0,0164
A5.- Relación precio/eficiencia sea superior a la que está presente actualmente	0,1366
B1.- Producto ecológico	0,0032
B2.- Producto estético	0,0008
B3.- De rápida limpieza	0,0112
B4.- Fácil transporte	0,0065
B5.- De rápida instalación	0,0100
B6.- Que no requiera supervisión constante	0,0080
C1.- Capaz de enfriar al módulo	0,0916
C2.- Fluido refrigerante recirculable	0,0415

Pesos totales	
C3.- Recircular fluido sin necesidad de utilizar bomba	0,0193
C4.- Bajo consumo de líquido refrigerante	0,0210
C5.- De fácil utilización	0,0068
C6.- Aprovechar energía térmica y solar	0,0601
C7.- Capaz de reducir la temperatura del módulo más de 20°	0,0738
C8.- Capaz de transportar la mayor cantidad de energía térmica	0,0474
D1.- Prototipo para paneles de 250 w (1640 x 992 mm)	0,0051
D2.- Durabilidad de mínimo 20 años	0,0347
D3.- Resistente a Altas temperaturas (80°C)	0,0361
D4.- Peso inferior a 10 kilos	0,0090
D5.- No inflamable	0,0249
D6.- Resistente a la corrosión	0,0221
D7.- Rápido montaje	0,0089
D8.- Diseño modular	0,0061
D9.- El material escogido debe ser conductor	0,0235
	1

Los factores más importantes en el proyecto serán que la “Relación precio/eficiencia sea superior a la que está presente actualmente” y al “Bajo costo de fabricación”. Si cumple con estas condiciones, el producto tiene un alto potencial para ser atractivo para los clientes.

4.2 Estructura Funcional

Luego de realizar el estudio de los objetivos en cuestión, se procede a realizar el análisis de la estructura funcional.

4.2.1 Caja negra

Para continuar con la estructura funcional, se presenta el diagrama de caja negra para el prototipo. Se estudian entradas que debe recibir la caja y las salidas luego de que pasen por el producto:

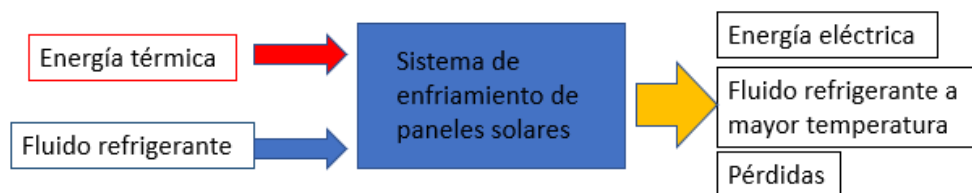


Figura 7: Diagrama de caja negra

4.2.2 Caja transparente

Se da a conocer la respectiva caja transparente del prototipo. En ella se presentan las entradas y salidas propuestas anteriormente en la caja negra, pero con el detalle de los procedimientos que se llevan a cabo durante el funcionamiento del sistema de enfriamiento:

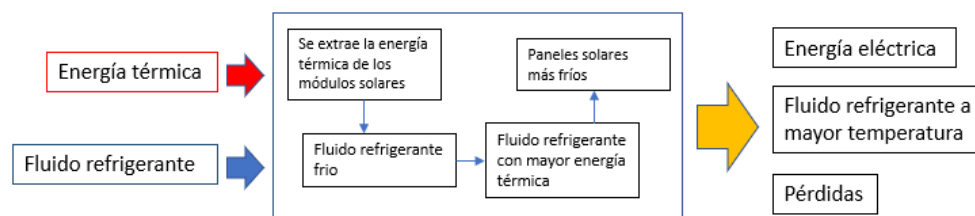


Figura 8: Diagrama de caja transparente.

4.3 Búsqueda externa

Tiene claridad con la estructura funcional, se procede a realizar la búsqueda externa, que consiste en recaudar información sobre documentos científicos, patentes y productos existentes.

4.3.1 Documentos científicos

Tabla 7: Resumen de documentos científicos

Sección	Autor	Título	Fecha de publicación	Descripción	Relación
A	Ali Najah Al-Shamani, M.A. Alghoul, A.M. Elbreki, A.A. Ammar, Azher M. Abed, K. Sopian	Mathematical and experimental evaluation of thermal and electrical efficiency of PV/T collector using different water-based nano-fluids	15 de febrero de 2018	Utilización de nano-fluidos para la eliminación de calor y/o mejorar transferencia de calor	Optimizar el funcionamiento del radiador para lograr un mayor enfriamiento de los paneles.

Sección	Autor	Título	Fecha de publicación	Descripción	Relación
B	Haitham M.S.Bahaidarah, Ahmer A. B.Baloch, Palanichamy Gandhidasan	Renewable and Sustainable Energy Reviews	11 de enero de 2016	Descripción de diversas formas de enfriamiento en paneles solares	Se muestra la forma de distribución de calor variando cantidad de tubos y su orientación.
C	C. Mac-Lean, et al., Int. J. of Energy Prod. & Mgmt	Applications of low enthalpy geothermal energy: the case of the faculty of physical and mathematical sciences at the University of Chile	Febrero 2018	Creación de Sistema de enfriamiento y calefacción, utilizando energía geotérmica de baja entalpía.	Utilizar energía geotérmica como intercambiador de calor para el sistema de enfriamiento de los paneles.

Sección	Autor	Título	Fecha de publicación	Descripción	Relación
D	Ahmer A.B. Baloch, Haitham M.S. Bahaidarah, Palanichamy Gandhidasan, Fahad A. Al- Sulaiman	Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling	5 de junio de 2015	Investigación experimental y numérica de una técnica de enfriamiento que logre disminuir y uniformar la temperatura.	Descripción de un método que sea capaz de enfriar los paneles a un bajo costo.

4.3.1.1 Sección A

El experimento consiste en hacer circular 3 nano-fluidos (CuO , SiO_2 y ZnO) por un radiador, y así verificar cuál obtiene un mejor rendimiento. Para esto, primero se debe escoger el diseño óptimo del absorbente térmico, que después de diversos cálculos se obtuvo que deben ser 11 tubos rectangulares por módulo, con sección transversal de 24 mm (ancho) y 15 mm (largo).

Al someter a los paneles a una irradiancia solar de 1000 W/m^2 , los resultados revelaron que el NF-, SiO_2 mostró una mejora notable en comparación con otros tipos de NF y agua. Estos señalaron que el uso de NF- SiO_2 en el colector PV/T redujo la temperatura del módulo PV de 65°C a 45°C y aumentó la temperatura de salida de 35°C a 44°C , lo que condujo a una mejora de la eficiencia eléctrica y térmica del 12.70% y 5,76%.

En relación con el análisis de recuperación y ganancia del sistema; indicó que el sistema PV/T-NF (SiO_2) conectado a la red es económicamente viable en comparación a otros,

a pesar del valor inicial adicional de las costosas NF y el intercambiador de calor personalizado

4.3.1.1 Sección B

En este documento se muestran los distintos métodos de enfriamiento de módulos PV existentes en el mercado, que son los siguientes: Choque de chorro, micro canales, diseños mejorados de intercambiadores de calor, tubos de calor, combinación de canal de choque de chorro y micro canales, disipadores de calor y esparcidores, material de cambio de fase para enfriar y enfriamiento dieléctrico por inmersión directa.

La mayoría de estos métodos utilizan un fluido para enfriar el panel, por lo que la segunda parte de este documento señala cuál es la mejor forma de distribuir el fluido que pasa detrás del panel. Dentro de éstas, existen diversas combinaciones posibles, ya sea poner 1, 2, 3, 10 o infinitos tubos, con una salida en común, o con salida independiente, recirculando el fluido por los paneles siguientes, o extrayéndolo inmediatamente, entre otras. Se llegó a la conclusión que la mejor forma es que el panel esté en contacto directo con el fluido (sin necesidad de tubos), o de lo contrario utilizar la mayor cantidad de tubos posible.

4.3.1.1 Sección C

Para la concertación de este proyecto se detallan los pasos a seguir antes de instalar un sistema geotérmico de baja entalpía. El primer paso, consiste en estimar las cargas de calentamiento y enfriamiento; esto consiste en detallar las temperaturas interiores y exteriores del lugar, y cuanto se quiere reducir o aumentar, para calcular la profundidad de la sonda geotérmica.

El segundo paso, consiste en obtener el consumo anual que se debe cubrir con la energía geotérmica, para calcular la necesidad de generación. Teniendo esto aclarado, el paso 3 es definir los requisitos de generación, para cumplir con las condiciones del paso 1 y 2.

Por último, se comparan los costos y beneficios entre las 2 soluciones (geotérmica vs aerotermia), para decidir cuál se va a implementar. En conclusión, la energía

geotérmica de baja entalpía es mejor para enfriar que para calentar, y es rentable si el proyecto se fija a largo plazo (recuperación de inversión en aprox. 15 años.)

4.3.1.1 Sección D

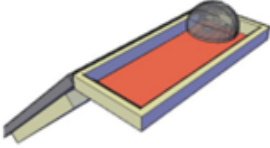
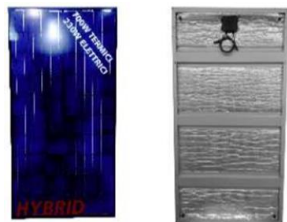
Previamente, se diseñó un intercambiador de calor de aluminio que aumenta la convección natural, y con esto, disminuye la temperatura del panel. Como la reducción no fue suficiente, se instaló un pequeño ventilador para obtener convección forzada, esto consiguió resultados muy favorables, obteniendo una reducción de 71.2°C a 45.1°C . La mejora máxima porcentual en la producción de potencia fue del 35,5%, mientras que el aumento porcentual máximo en la eficiencia de conversión fue del 36,1% en comparación con el rendimiento de un sistema fotovoltaico no refrigerado. Para la viabilidad del costo de un sistema de este tipo, ya sea no refrigerado o refrigerado, se realizó un análisis del costo de energía nivelado (LCE) utilizando la simulación de rendimiento energético anual para ambos sistemas. Se encontró que LCE era 1.95 (€/ kWh) para un sistema fotovoltaico no refrigerado que se redujo a 1.57 (€/ kWh) para el sistema fotovoltaico refrigerado convergente con una disminución relativa del porcentaje del 19.5%, lo que lo hace económicamente viable.

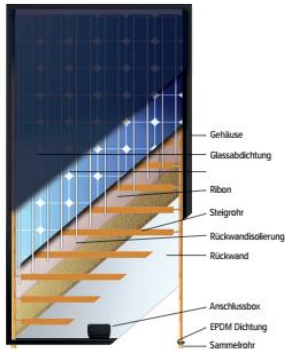
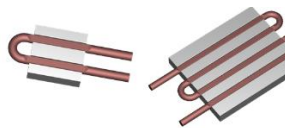
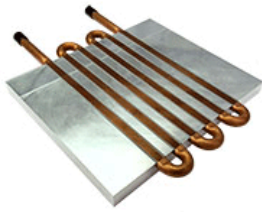
4.3.2 Productos existentes

Se realiza un resumen de las tecnologías existentes en el mundo, con su respectivo funcionamiento:

Tabla 8: Resumen de productos existentes

Sección	Fabricante	Procedencia	Descripción	Referencia
E	TombakSolar	Barcelona, España	Panel híbrido que incorpora un acumulador en la parte trasera para	

Sección	Fabricante	Procedencia	Descripción	Referencia
			dar servicio de agua caliente sanitaria.	
F	Tombak Solar	Barcelona, España	Panel híbrido que incorpora un depósito en la parte trasera capaz de disipar el calor generado por las celdas.	
G	Ecomesh	Zaragoza, España	Panel solar híbrido que produce electricidad y calor para calefacción.	
H	Todo en solar	Toledo, España	Panel que obtiene energía eléctrica y agua caliente.	

Sección	Fabricante	Procedencia	Descripción	Referencia
I	Solimpeks	España, Alemania Turquía	Panel solar híbrido que utiliza la energía térmica para distintos fines	
J	Wakefield-Vette	Pelham, NH Withee, WI Taipei, Taiwan Raleigh, NC Dong Guan, China	Placa con ruta de flujo que mueve líquido para extracción de calor de dispositivos	
K	Boyd Corporation	Pleasanton, CA	Placa con ruta de flujo que mueve líquido para extracción de calor de dispositivos	

4.3.2.1 Sección E

Panel híbrido fotovoltaico que incorpora un acumulador en la parte trasera y da servicios de agua caliente sanitaria. El agua está en contacto directo con la cara inversa

del panel, circulando por medio de una bomba, enfría hasta temperatura ambiente aumentando el rendimiento del panel.

El rendimiento máximo de la instalación fotovoltaica es del 20%.

Precio: -----

Garantía: -----

4.3.2.1 Sección F

Depósito embebido en la cara inversa del panel capaz de disipar el calor generado por las células fotovoltaicas. Se repone con agua de lluvia y no necesita instalación adicional.

Precio: -----

Garantía: -----

4.3.2.1 Sección G

Panel solar híbrido que produce electricidad y calor para calefacción de vivienda o negocio, reduce la superficie de captación en un 40% comparado con la utilización de panel fotovoltaico y térmico por separado, a elevadas temperaturas triplica la producción térmica comparado con paneles híbridos de primera generación e incrementa la producción eléctrica hasta en un 15% frente a un panel fotovoltaico convencional gracias a la disminución de temperatura de las celdas.

Precio: -----

Garantía: -----

4.3.2.1 Sección H

Panel híbrido termo fotovoltaico capaz de generar electricidad y agua caliente. El sistema de recuperación de calor extrae la energía del panel disminuyendo la temperatura y aumentando la eficiencia eléctrica. La unión de estos sistemas reduce los costos en comparación con un panel solar fotovoltaico y térmico por separado, disminuye el envejecimiento de las celdas debido a la regulación de la temperatura.

Precio: 1.215,00 €

Garantía: 10 años 90% eficiencia – 20 años 80% eficiencia.

4.3.2.1 Sección I

Paneles híbridos económicos y de gran rendimiento, que generan agua tibia para consumo inmediato, y un aumento de energía del panel del 25%.

Lo interesante de estos paneles es su composición para optimizar la transferencia de calor, ya que incluye un aislante de pared trasera, sello del vidrio, entre otros.

Precio: -----

Garantía productividad: 10 años 90% eficiencia – 20 años 80% eficiencia.

4.3.2.1 Sección J

Placa con ruta de flujo que mueve líquido para extracción de calor de dispositivos, disponen de 2 tipos:

- Tubo externo:

Este tipo de placas aseguran una resistencia térmica mínima entre el dispositivo de potencia y la placa fría colocando el tubo de refrigerante en contacto directo con la base del dispositivo de potencia. El contacto directo reduce la cantidad de interfaces térmicas entre el dispositivo y el fluido, lo que aumenta el rendimiento de la aplicación.

La placa posee base extruida y tubo continuo de cobre, unidos por epoxi altamente conductivo.

- Tubo interno:

Este tipo de placas tienen la capacidad de enfriar ambos lados de ésta debido a que el tubo refrigerante se encuentra en el interior de la placa. La placa posee base extruida y tubo continuo de cobre, el cual no está expuesto al entorno como el anterior.

4.3.3 Patentes

Existen innumerables patentes sobre sistema de enfriamiento de módulos fotovoltaicos, pero ninguna tiene que ver con utilizar la espuma de aluminio como solución. Se incluirán sólo las que tengan el mismo fin, y similitudes significativas para añadirlas a este apartado.

Tabla 9: Resumen de patentes existentes.

Sección	Autor	Número de patente	Título	Fecha de publicación
K	-Julio Andrés Nuñez -Eduardo Zamareño Isabel -Manuel Velasco García	ES1078530U ES1078530U	Conducto para refrigeración paneles fotovoltaicos	26 de octubre de 2012
L	-Francisco Chuecos Nicolás - Luis Martínez García	ES2347116B1	Panel solar fotovoltaico refrigerado.	12 de marzo de 2009

4.3.3.1 Sección K

Estructura-conducto para refrigerar los paneles fotovoltaicos caracterizados por una estructura hecha de aluminio u otro material similar, apoyada en pilotes de hormigón o zanja corrida para soportar el panel fotovoltaico y darle la inclinación adecuada, al que se le agrega un conducto realizado en material aislante de lana de vidrio con aluminio, tipo sándwich o una solución similar, para mantener la temperatura fría del aire en el interior del mismo y, siendo el panel o los paneles los que cierran el conducto, según se muestra en los dibujos adjuntos.

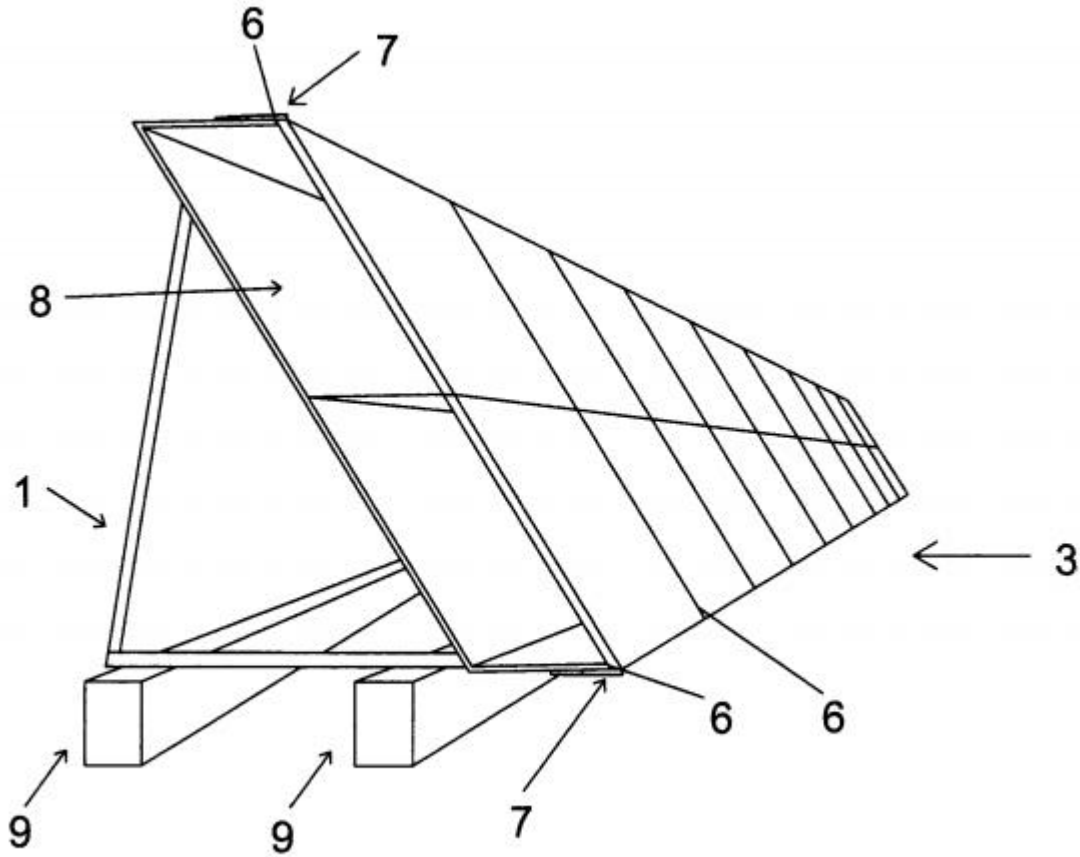


Figura 9: Imagen adjunta en patente ES1078530U.

4.3.3.2 Sección L

Panel solar fotovoltaico que comprende unos primeros medios de refrigeración, en donde dichos medios comprenden una sonda configurada para detectar el exceso de temperatura que sufren los paneles solares fotovoltaicos, y un termostato establecido para accionar unos medios de riego sobre el propio panel, de tal forma que la temperatura del panel se estabilice en su temperatura óptima de trabajo.

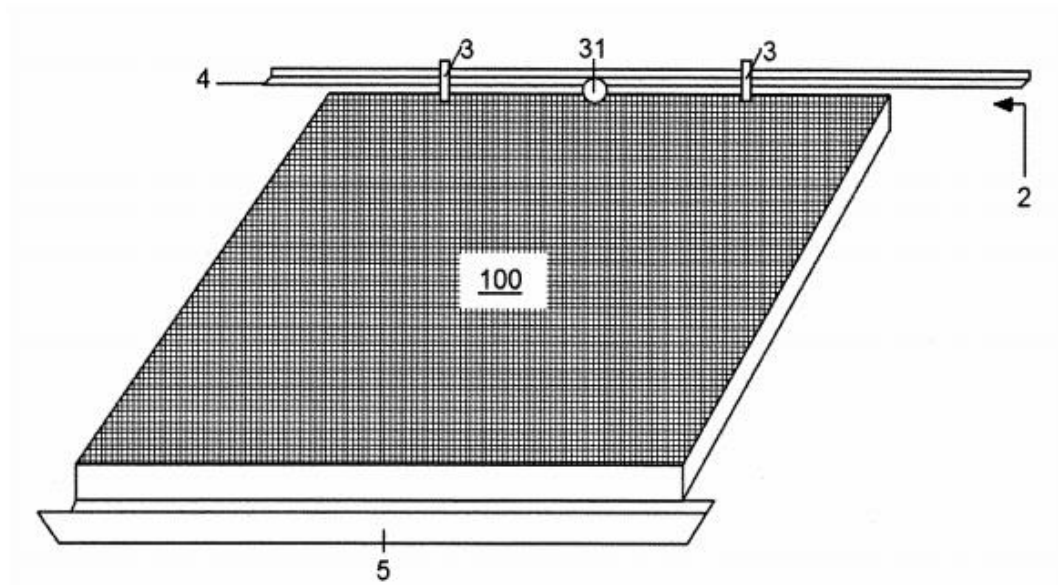


Figura 10: Imagen adjunta en patente ES2347116B1

4.4 Búsqueda interna

4.4.1 Brainstorming

Gracias a los objetivos definidos anteriormente y al exhaustivo análisis de mercado, se presenta la lluvia de ideas para definir los posibles prototipos a construir.

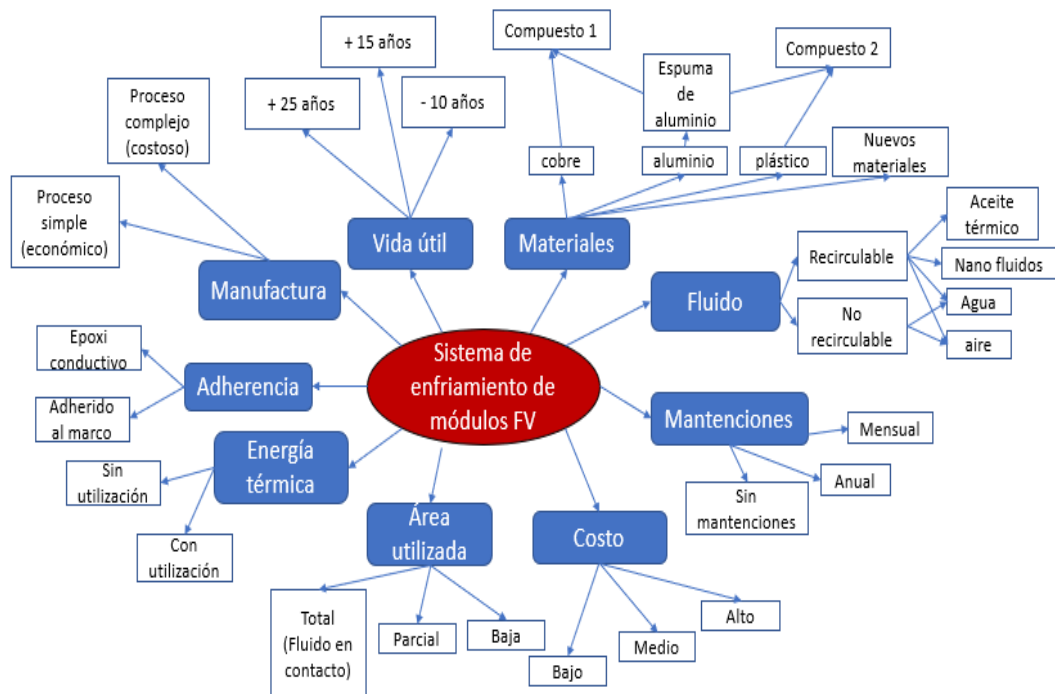
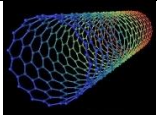


Figura 11: Brainstorming del sistema de enfriamiento.

4.4.2 Carta morfológica

Para visualizar de mejor forma el brainstorming, se dispone a realizar la carta morfológica, en donde se agrupan con imágenes las opciones generadas, a modo de facilitar las opciones a evaluar.

Tabla 10: Carta morfológica.

	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Vida útil	 - 10 años	 +15 años	 +25 años	
Material	 Espuma + cobre	 Espuma + madera o PLA	 Espuma	 Nuevos materiales
Fluido	 Agua o aire	 Aceite térmico	 nano fluidos	
Mantenciones	 Sin mantención	 Mensual	 Anual	
Área utilizada	 Fluido en contacto	 Parcial	 Baja	

	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Manufactura	 Simple	 Complejo		
Adherencia	 Epoxi conductor	 Al marco		
Energía térmica	 Reutilizada	 No reutilizada		

4.4.3 Generación de conceptos y solución

A continuación, se presentan los criterios utilizados para la selección de la mejor alternativa, tomando los pesos ponderados definidos en el ítem, así evaluar matemáticamente cual es la mejor opción.

Tabla 11: Resultado evaluación pesos ponderados.

		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		tasa	peso ponderado	tasa	peso ponderado	tasa	peso ponderado
A1.- Bajo costo de fabricación	0,1655	2	0,331	1	0,1655	3	0,4965
A2.- Bajo costo de instalación	0,0789	2	0,1578	1	0,0789	3	0,2367
A3.- Bajo costo de montaje	0,0309	3	0,0927	1	0,0309	3	0,0927
A4.- Bajo costo de mantenimiento	0,0164	3	0,0492	1	0,0164	3	0,0492
A5.- Relación precio/eficiencia sea superior a la que está presente actualmente	0,1366	3	0,4098	2	0,2732	1	0,1366
B1.- Producto ecológico	0,0032	1	0,0032	1	0,0032	1	0,0032
B2.- Producto estético	0,0008	2	0,0016	2	0,0016	2	0,0016
B3.- De rápida limpieza	0,0112	2	0,0224	2	0,0224	3	0,0336
B4.- Fácil transporte	0,0065	2	0,013	2	0,013	2	0,013
B5.- De rápida instalación	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01

		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
B6.- Que no requiera supervisión constante	0,008	2	0,016	2	0,016	3	0,024
C1.- Capaz de enfriar al módulo	0,0916	2	0,1832	3	0,2748	1	0,0916
C2.- Fluido refrigerante recirculable	0,0415	3	0,1245	3	0,1245	1	0,0415
C3.- Recircular fluido sin necesidad de utilizar bomba	0,0193	1	0,0193	1	0,0193	3	0,0579
C4.- Bajo consumo de líquido refrigerante	0,021	2	0,042	2	0,042	3	0,063
C5.- De fácil utilización	0,0068	2	0,0136	1	0,0068	3	0,0204
C6.- Aprovechar energía térmica y solar	0,0601	3	0,1803	3	0,1803	1	0,0601
C7.- Capaz de reducir la temperatura del módulo más de 20°	0,0738	2	0,1476	3	0,2214	1	0,0738
C8.- Capaz de transportar la mayor cantidad de energía térmica	0,0474	2	0,0948	3	0,1422	1	0,0474
D1.- Prototipo para paneles de 250 w (1640 x 992 mm)	0,0051	1	0,0051	1	0,0051	1	0,0051
D2.- Durabilidad de mínimo 20 años	0,0347	3	0,1041	3	0,1041	1	0,0347

		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
D3.- Resistente a Altas temperaturas (80°C)	0,0361	3	0,1083	3	0,1083	3	0,1083
D4.- Peso inferior a 10 kilos	0,009	3	0,027	3	0,027	3	0,027
D5.- No inflamable	0,0249	2	0,0498	2	0,0498	2	0,0498
D6.- Resistente a la corrosión	0,0221	2	0,0442	2	0,0442	2	0,0442
D7.- Rápido montaje	0,0089	2	0,0178	2	0,0178	3	0,0267
D8.- Diseño modular	0,0061	2	0,0122	2	0,0122	2	0,0122
D9.- El material escogido debe ser conductor	0,0235	2	0,047	2	0,047	2	0,047
			2,3275		2,0579		1,9078

La elección escogida es la número 1, que incluye una vida útil superior a 25 años, ésta debe contener en su estructura espuma de aluminio, el fluido enfriador debe ser de agua o aire, las mantenciones son de carácter mensual, el área utilizada debe ser con el fluido en contacto con el módulo, tendrá una manufactura compleja (con esto nos referimos a que no cualquier persona pueda ser capaz de construirlo, más bien para guardar el CORE del producto), con adherencia de un epoxi conductor. Por último, debe ser capaz de reutilizar la energía térmica, lo que implica que la espuma de aluminio debe estar encerrada, o bien, se debe hacer pasar un tubo en su interior.

Cabe mencionar que la opción escogida es una base para la realización del diseño final; ya que aún faltan bastantes parámetros por definir.

Por otra parte, se debe realizar la elección del fluido enfriador, que puede ser agua o aire, debido a que por un lado el agua tiene mejor transferencia de calor. Sin embargo,

los sistemas con agua son más costosos y hacer circular aire es más económico, pero disminuye la eficiencia del sistema.

Otro punto no definido en el inciso anterior es la cantidad y porosidad de la espuma de aluminio. Además, se debe escoger la cantidad óptima de espuma de aluminio a utilizar, para ello se buscará el equilibrio entre eficiencia y economía.

5 Balance de energía del módulo fotovoltaico

5.1 Modelo numérico

El objetivo de diseñar este modelo numérico es encontrar una representación aproximada del comportamiento de los módulos fotovoltaicos.

5.1.1 Consideraciones

Para la simplicidad del cálculo, se realizan los siguientes supuestos:

- Estado estacionario
- Área : 1 m^2
- Radiación Incidente : 1000 W/m^2
- Material : Vidrio – EVA – Silicio – Tedlar
- Temperatura ambiente : $288 \text{ a } 313 \text{ [K]}$
- Calor de salida por superficies laterales despreciables
- Resistencia de contacto entre materiales del módulo despreciables

Además, como se mencionó anteriormente, los módulos fotovoltaicos están construido por capas, sin considerar el marco de aluminio, de la cara frontal hacia la cara posterior se tiene:

- Cristal de vidrio templado
- Etil-Vinilo-Acetato (EVA)
- Celda (Silicio)
- Etil-Vinilo-Acetato (EVA)
- Backsheet (Tedlar)

Cada uno de estos elementos, tiene las siguientes propiedades:

Tabla 12: Especificaciones de materiales de módulo fotovoltaico.

Material	t [mm]	k [W/mK]	Emisividad [-]
Vidrio	4.00	1.8	0.94
EVA	0.50	0.35	
Silicio	0.23	148	
Tedlar	0.10	0.2	0.9

Donde:

- t : Espesor
- k : Conductividad térmica

Para tener una referencia de los datos entregador por fabricante sobre un panel fotovoltaico, se utiliza un módulo de la marca JinkoSolar modelo JKM315P-72 con las siguientes características.

Tabla 13: Especificaciones de módulo FV.

Especificaciones	JKM315P
Dimensión módulo	1956x992x40 mm
Potencia nominal STC	315 Wp
N° celdas	72 (6x12)
Tipo celda	Policristalina 156x156 mm
Eficiencia módulo STC	16.23 %
Temperatura funcionamiento	-40 °C ~ + 85 °C
Coeficiente temperatura de Pmax	-0.41 %/°C

Tomando en cuenta las consideraciones, se realiza la siguiente modelación térmica del módulo FV:

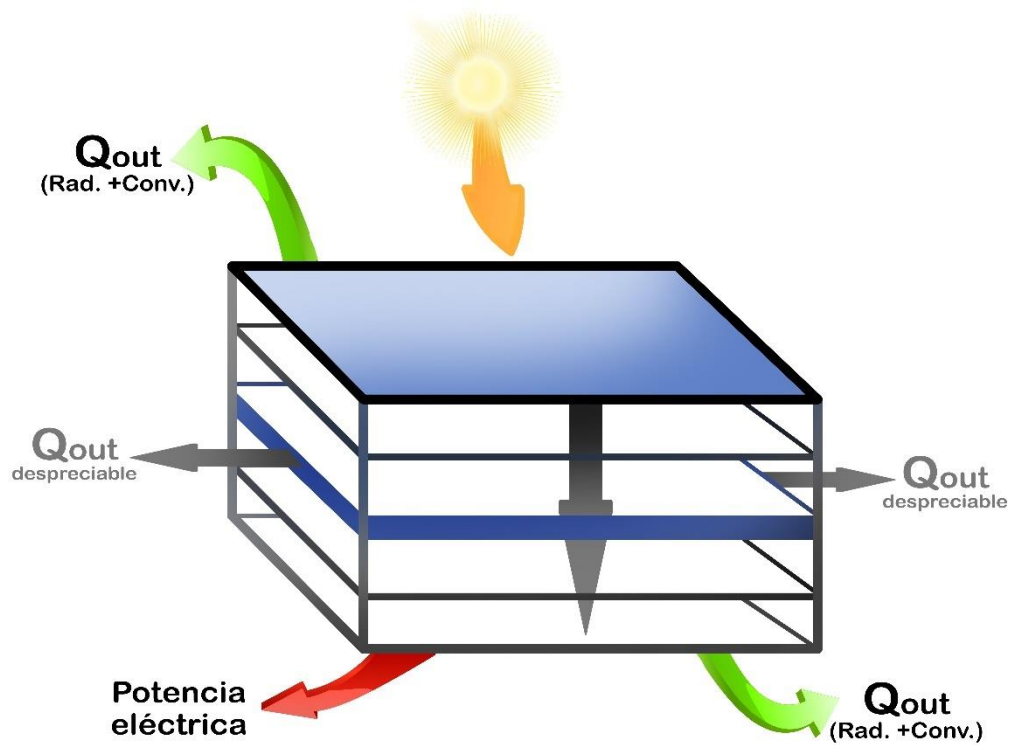


Figura 12: Flujo de calor por una sección de un panel fotovoltaico.

En la imagen se aprecia el flujo de energía que experimenta el módulo. En resumidas cuentas, entra radiación, donde inmediatamente sale calor por convección y radiación por la parte superior, se conduce la energía térmica restante por todas las capas del módulo, donde finalmente se extrae la potencia eléctrica y sale calor por convección y radiación por la cara posterior.

5.1.2 Balance de energía

La variación de energía interna de un cuerpo es igual a la energía entrante sumado la energía por generación interna menos la energía saliente. [15]

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = Q_{in} + Q_{generación} - Q_{out} \quad (15)$$

El estado estacionario implica $\frac{\Delta U}{\Delta t} = 0$ y $Q_{generación} = 0$, entonces:

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (16)$$

$$Q_{out} = Q_{conv} + Q_{rad} + P_{eléc} \quad (17)$$

En donde, Q_{in} es la radiación incidente. De esta forma el conjunto se puede modelar como una red de resistencias térmicas similar al modelo eléctrico:

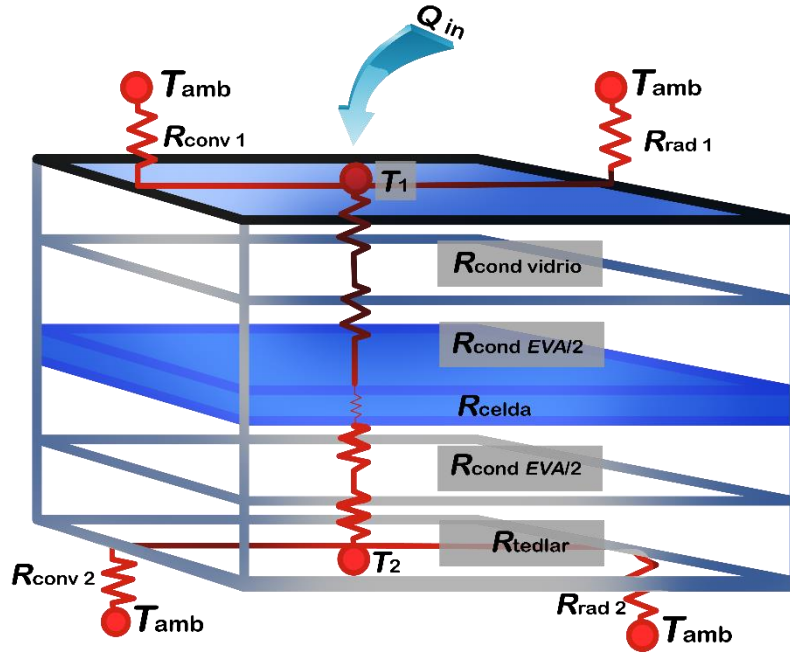


Figura 13: Diagrama de resistencias del módulo FV.

El flujo de calor por convección y radiación se obtiene por medio de las siguientes ecuaciones en cada superficie.

$$Q_{conv 1} = \frac{T_1 - T_{amb}}{R_{conv}} \quad (18)$$

$$Q_{conv\ 2} = \frac{T_2 - T_{amb}}{R_{conv}} \quad (19)$$

$$Q_{rad\ 1} = \frac{T_1 - T_{amb}}{R_{rad}} \quad (20)$$

$$Q_{rad\ 2} = \frac{T_2 - T_{amb}}{R_{rad}} \quad (21)$$

$$P_{eléc} = P_{STC} * \left(\frac{Q_{in}}{1000} \right) * (1 + \gamma * (T_{celda} - 25)) \quad (22)$$

Donde:

- Q_{conv} : Calor por convección en superficie frontal (1) y trasera (2)
- Q_{rad} : Calor por radiación en superficie frontal (1) y trasera (2)
- $P_{eléc}$: Potencia eléctrica generada por el módulo.
- P_{STC} : Potencia en STC (Irradiación $1000\ W/m^2$, Temperatura celda $25^\circ C$, Masa de aire 1.5)
- γ : Coeficiente de temperatura de Potencia máxima [$\%/^\circ C$]

El valor de resistencia de cada elemento esta expresado por

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} * A_s} \quad (23)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} * A_s} \quad (24)$$

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_s^2 - T_{amb}^2) * (T_s - T_{amb}) \quad (25)$$

Donde:

- h_{conv} : Coeficiente de convección con el aire
- A_s : Área superficial
- h_{rad} : Coeficiente de radiación

- ε : Emisividad del material de la superficie
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann
- T_s : Temperatura superficial
- T_{amb} : Temperatura ambiente.

Por otra parte, se tiene que el flujo conducido por el panel desde la superficie frontal a la inferior es la diferencia entre el calor entrante (irradiancia) y el flujo de calor por convección y radiación expulsado por la superficie frontal.

$$Q_{cond} = Q_{in} - (Q_{conv\ 1} + Q_{rad\ 2}) \quad (26)$$

Con este valor se puede obtener la temperatura del centro de la celda, considerando el flujo constante por los materiales que componen el módulo, pasando por el vidrio, la mitad del EVA y mitad de la celda de silicio.

$$Q_{cond} = \frac{T_{s1} - T_{celda}}{R_{cond\ Vi} + \frac{R_{cond\ EVA}}{2} + \frac{R_{cond\ Si}}{2}} \quad (27)$$

Para obtener el calor disponible que es extraíble por la superficie trasera, se suman los flujos de calor por convección y radiación por dicha superficie.

$$Q_{disp} = Q_{conv\ 2} + Q_{rad\ 2} \quad (28)$$

5.1.3 Variables

Para cerrar el modelo matemático, en relación con las ecuaciones presentadas anteriormente, las que faltan fijar su valor son las siguientes:

- $h_{conv\ 1}$: Coeficiente de convección con el aire cara superior.
- $h_{conv\ 2}$: Coeficiente de convección con el aire cara inferior.
- E_{in} : Radiación incidente.
- T_1 : Temperatura superficie superior.

- T_2 : Temperatura superficie inferior.
- T_{celda} : Temperatura de la celda.
- T_{amb} : Temperatura ambiente.

Estas variables serán cerradas o abiertas dependiendo del análisis que se realice.

5.1.4 Análisis por realizar

En este punto se darán a conocer los análisis que se realizarán con el modelo numérico diseñado, al igual que las variables abiertas y cerradas de cada uno de estos.

5.1.4.1 Energía disponible

El primer análisis que se debe realizar es conocer la energía que dispone el módulo en la parte posterior, ya que es ahí donde irá instalado el sistema de enfriamiento. Es vital calcular este valor, ya que con eso se puede conocer a grandes rasgos la cantidad de calor que debe ser capaz de extraer el sistema de enfriamiento.

Cabe mencionar que este análisis se realiza en la zona norte de Chile.

Para esto se tienen las siguientes variables conocidas:

- $h_{conv\ 1} ; h_{conv\ 2}$: $20 [W/m^2K]$

Se considera este valor como un promedio, en relación con las condiciones ambientales de la zona norte, tal como temperatura y velocidad del viento.

- E_{in} : $800 - 1250 [W]$

Se parametriza y se le da valores entre tal rango para observar el comportamiento.

- T_{amb} : $288 - 333 [K]$

Al igual que la radiación incidente, la temperatura ambiente se parametriza para observar el comportamiento.

De esta forma, las variables incógnitas que completan el modelo son las siguientes:

- T_1 : Temperatura superficie superior.
- T_2 : Temperatura superficie inferior.
- T_{celda} : Temperatura de la celda.

5.1.4.2 Rendimiento del módulo

El segundo análisis es verificar que tan necesario es la instalación de un sistema de enfriamiento. Para esto se escogerán 4 días aleatorios, en la zona norte y sur del país, así verificar condiciones de operación.

Para esto se tienen las siguientes variables conocidas:

- $h_{conv 1} ; h_{conv 2}$: 18-22 [W/m^2K]

Este valor varía en cada uno de los casos, dependiendo la zona, temperatura y velocidad del viento.

- E_{in} : 0 – 1250 [W]

Se parametriza y luego se ingresan los valores entregados por la página whatherspark.

- T_{amb} : 0 – 333 [K]

Al igual que la radiación incidente, la temperatura ambiente se parametriza y se ingresan los valores a estudiar.

De esta forma, las variables incógnitas que completan el modelo son las siguientes:

- T_1 : Temperatura superficie superior.
- T_2 : Temperatura superficie inferior.
- T_{celda} : Temperatura de la celda.

5.1.4.3 Rendimiento del módulo incluyendo sistema de enfriamiento

El tercer análisis consiste en cuantificar la ganancia de energía eléctrica y térmica considerando la instalación de un sistema de enfriamiento. Para esto se dejará la

temperatura de la celda constante, considerando la activación de tal sistema. Para esto se tomará el día de verano de la zona norte, para luego comparar los resultados.

Para esto se tienen las siguientes variables conocidas:

- $h_{conv\ 1}$: $20 [W/m^2K]$

Valor calculado en relación con la zona, temperatura y velocidad del viento.

- E_{in} : $0 - 1250 [W]$

Se parametriza y luego se ingresan los valores entregados por la página whatherspark.

- T_{amb} : $0 - 333 [K]$

Al igual que la radiación incidente, la temperatura ambiente se parametriza y se ingresan los valores a estudiar.

- T_{celda} : $308 [K]$

Se deja constante asumiendo que existe un sistema de enfriamiento instalado.

De esta forma, las variables incógnitas que completan el modelo son las siguientes:

- T_1 : Temperatura superficie superior.
- T_2 : Temperatura superficie inferior.
- $h_{conv\ 2}$: Coeficiente de convección de la cara posterior del módulo.

5.1.4.4 Validación y comparación con prototipo construido sin sistema de enfriamiento

El cuarto análisis consiste en comparar los resultados obtenidos experimentalmente, para así verificar si el modelo matemático se acerca a la realidad.

Para esto se tienen las siguientes variables conocidas:

- $h_{conv\ 1}$: $2,71 [W/m^2K]$

Valor calculado en relación en relación con la velocidad y temperatura del aire dentro del simulador solar.

- E_{in} : $1000 [W]$

Radiación emitida por los halógenos del simulador solar, medida.

- T_{amb} : 293 [K]

La temperatura fue medida al exterior del simulador solar.

- T_1 : 338 [K]

Temperatura de la superficie superior del módulo medida mediante termómetros láser.

De esta forma, las variables incógnitas que completan el modelo son las siguientes:

- T_{celda} : Temperatura de la celda.
- T_2 : Temperatura superficie inferior.
- $h_{conv 2}$: Coeficiente de convección de la cara posterior del módulo.

5.1.4.5 Validación y comparación con prototipo construido incluyendo sistema de enfriamiento

El último análisis consiste en comparar los resultados obtenidos experimentalmente, incluyendo el sistema de enfriamiento, para así verificar si el modelo matemático se acerca a la realidad.

En este caso, se agrega un dato adicional al modelo matemático, que es la resistencia térmica de la madera. Para esto se considera el espesor y su coeficiente de conductividad térmica.

Tabla 14: Características térmicas de la madera.

Material	t [mm]	k [W/mK]
Vidrio	10,00	0,274

Además, se tienen las siguientes variables conocidas:

- $h_{conv 1}$: 2,71 [W/m^2K]

Valor calculado en relación en relación con la velocidad y temperatura del aire dentro del simulador solar.

- E_{in} : 1000 [W]

Radiación emitida por los halógenos del simulador solar, medida.

- T_{amb} : 293 [K]

La temperatura fue medida al exterior del simulador solar.

- T_1 : 348 [K]

Temperatura de la superficie superior del módulo medida mediante termómetros láser.

De esta forma, las variables incógnitas que completan el modelo son las siguientes:

- T_{celda} : Temperatura de la celda.
- T_2 : Temperatura superficie inferior.
- $h_{conv 2}$: Coeficiente de convección de la cara posterior del módulo.

5.2 Análisis de energía disponible

Se define como energía disponible, valga la redundancia, a la energía que se encuentra en la parte posterior del módulo. En la actualidad, esta energía es disipada en el aire, y no se reutiliza en lo absoluto, por lo que aprovecharla como energía térmica (utilizando algún intercambiador de calor) y/o eléctrica (reduciendo la temperatura de operación de la celda) sería beneficioso para los dueños de los módulos fotovoltaicos.

Para obtener la totalidad de energía disponible se utiliza el modelo matemático diseñado anteriormente en conjunto con el software “EES”, ya que como se puede apreciar, el balance de energía es en 2D, donde se asume flujo continuo y se utilizan las ecuaciones de conducción, convección y radiación mencionadas en el marco teórico y estado del arte, donde tal programa es perfecto para realizar ese tipo de cálculos.

Se realizan los cálculos variando algunas condiciones meteorológicas (Irradiación y temperatura ambiente) obteniendo el flujo de calor disponible en la superficie trasera. Temperatura ambiente entre 288 y 333 K y radiación global entre 800 y 1250 W/m^2

El cálculo del calor extraído se encuentra en la sección Anexos, a continuación, se muestra un gráfico del calor extraído por la superficie trasera del panel para diversas radiaciones y temperaturas ambiente.

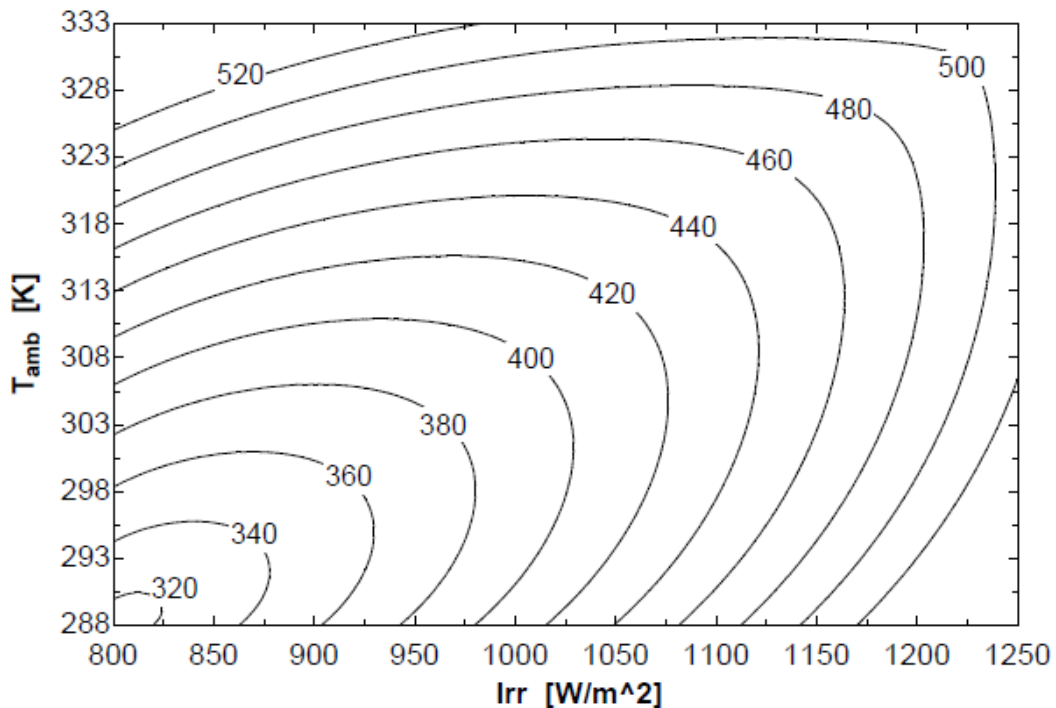


Figura 14: Gráfico de calor disponible del módulo fotovoltaico.

Considerando una radiación de 1000 W/m^2 y una temperatura ambiente de 25°C (298 K), se obtiene que, por la parte trasera, se puede extraer una energía específica de unos 390 W/m^2 , es decir, un 39% de la energía disponible naturalmente.

De esta forma, si la energía total disponible en una planta en la región de Atacama, con estructura fija e inclinada en 30° , genera 385 kWh/año , se puede extraer como máximo 150 kWh/año en energía térmica, que pueden ser vendidos y/o reutilizados.

5.3 Análisis de rendimiento del módulo

Al tener modelado matemáticamente el panel fotovoltaico, se procede a realizar distintos análisis de eficiencia, en donde se varía la temperatura y la radiación respecto a ciertas horas del día y zonas geográficas de nuestro país.

Este análisis tiene por objetivo verificar y validar el funcionamiento del enfriador, y comprobar si efectivamente es necesario para aumentar la eficiencia del módulo.

Todos los datos analizados provienen de la página web weathersparkcom.

5.3.1 Análisis previo

Los módulos fotovoltaicos están diseñados para trabajar a $1000 [W/m^2]$, además la temperatura de la celda debe estar a $25^\circ C$, por ende, la eficiencia debe ser máxima, al igual que la generación de los módulos.

1	2	3	4	5	6	7	
 1..20	E_{in} [Wh/m2/dia]	T_{inf} [K]	T_{Celda} [K]	$T_{celda;C}$ [°C]	E_{disp} [Wh/m2/dia]	E_{elec} [Wh/m2/dia]	$\eta_{calculada}$
Run 1	1000	280	300,5	27,34	396,4	160,8	16,08

Figura 15: Validación de modelo computacional con condiciones estándar.

Se explicarán cada uno de los parámetros mostrados en la Figura 14:

Variables independientes:

- E_{in} : Radiación incidente
- T_{inf} : Temperatura ambiente

Variables dependientes:

- T_{celda} : Temperatura de operación de la celda
- E_{disp} : Energía que puede ser extraída en la parte posterior del módulo.
- E_{elec} : Energía generada por el módulo FV.

- $\eta_{calculada}$: Eficiencia calculada del módulo FV.

Como se puede apreciar, la energía eléctrica generada es de $160,8[W/m^2]$, como el panel de $320[W]$ es de 2 metros de área, su generación según los cálculos es de $321,8[W/m^2]$, lo que es completamente aceptable. El exceso de energía es porque la temperatura ambiente está a $5^{\circ}C$, para poder mantener a la celda a $25^{\circ}C$, que es lo que recomienda el fabricante. La eficiencia de conversión de energía eléctrica es propia de cada módulo, en este caso se utilizó uno con 16,08, por lo que en el cálculo se está trabajando con un 100% de eficiencia.

Con el modelo computacional diseñado se puede obtener tal escenario, por ende, se pueden realizar análisis posteriores.

5.3.2 Zona norte

Esta zona se caracteriza por tener la mejor radiación solar de Chile, y una de las mejores de todo el mundo. Se evalúa la comuna de Diego de Almagro, Provincia de Chañaral, Región de Atacama, Chile.

- **Día de verano**

El primer análisis consiste en tomar uno de los días más calurosos del verano, considerando su temperatura ambiente y radiación.

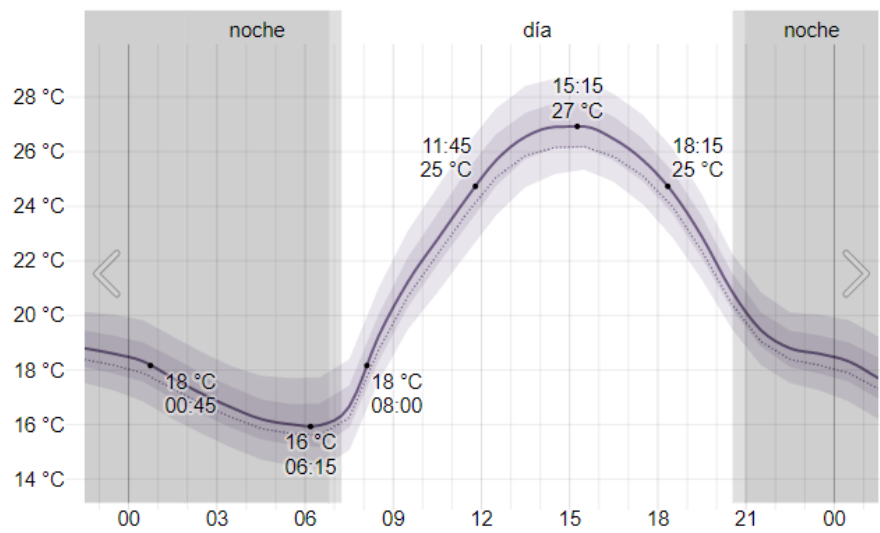


Figura 16: Temperatura promedio día de verano zona norte.

Fuente: weathersparkcom

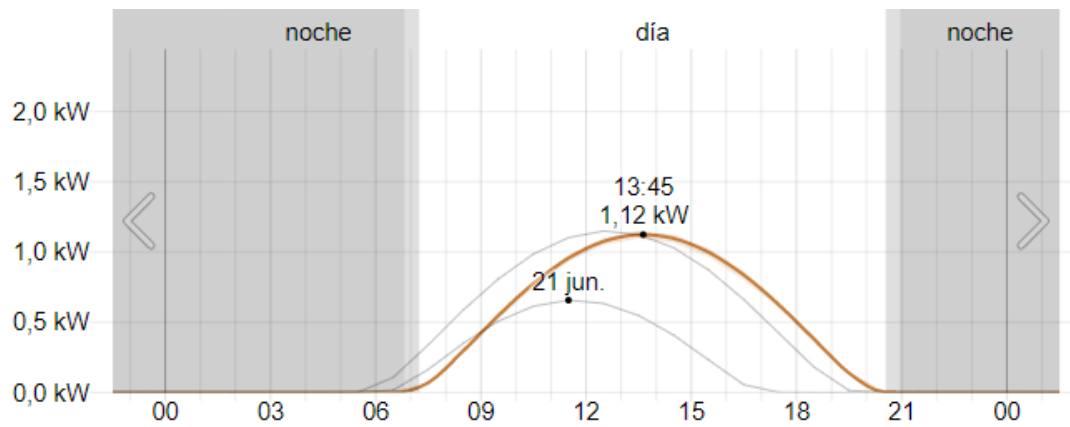


Figura 17: Energía solar día de verano zona norte.

Fuente: weathersparkcom

1...100	1 E_{in} [Wh/m2/dia]	2 T_{inf} [K]	3 T_{Celda} [K]	4 $T_{celda,C}$ [°C]	5 E_{disp} [Wh/m2/dia]	6 E_{elec} [Wh/m2/dia]	7 $\eta_{calculada}$
Run 1	100	289	291	17,88	39,33	16,69	16,69
Run 2	153,7	289,6	292,7	19,56	60,53	25,49	16,58
Run 3	207,4	290,2	294,4	21,24	81,79	34,16	16,47
Run 4	261,1	290,7	296,1	22,92	103,1	42,72	16,37
Run 5	314,7	291,3	297,8	24,6	124,5	51,16	16,26
Run 6	368,4	291,9	299,4	26,29	145,9	59,49	16,15
Run 7	422,1	292,5	301,1	27,98	167,4	67,69	16,04
Run 8	475,8	293,1	302,8	29,67	189	75,78	15,93
Run 9	529,5	293,6	304,5	31,37	210,6	83,74	15,82
Run 10	583,2	294,2	306,2	33,07	232,3	91,59	15,71
Run 11	636,8	294,8	307,9	34,77	254,1	99,32	15,6
Run 12	690,5	295,4	309,6	36,47	275,9	106,9	15,49
Run 13	744,2	295,9	311,3	38,18	297,8	114,4	15,37
Run 14	797,9	296,5	313	39,89	319,7	121,8	15,26
Run 15	851,6	297,1	314,8	41,6	341,7	129	15,15
Run 16	905,3	297,7	316,5	43,32	363,8	136,2	15,04
Run 17	958,9	298,3	318,2	45,04	385,9	143,2	14,93
Run 18	1013	298,8	319,9	46,76	408,1	150	14,82
Run 19	1066	299,4	321,6	48,48	430,3	156,8	14,71
Run 20	1120	300	323,4	50,21	452,6	163,4	14,59

Figura 18: Datos entregados por el software EES, sobre módulo fotovoltaico en el norte de Chile.

- **Día de Invierno**

Posteriormente se elige un día con la temperatura más fría en el año, considerando temperatura ambiente y radiación.

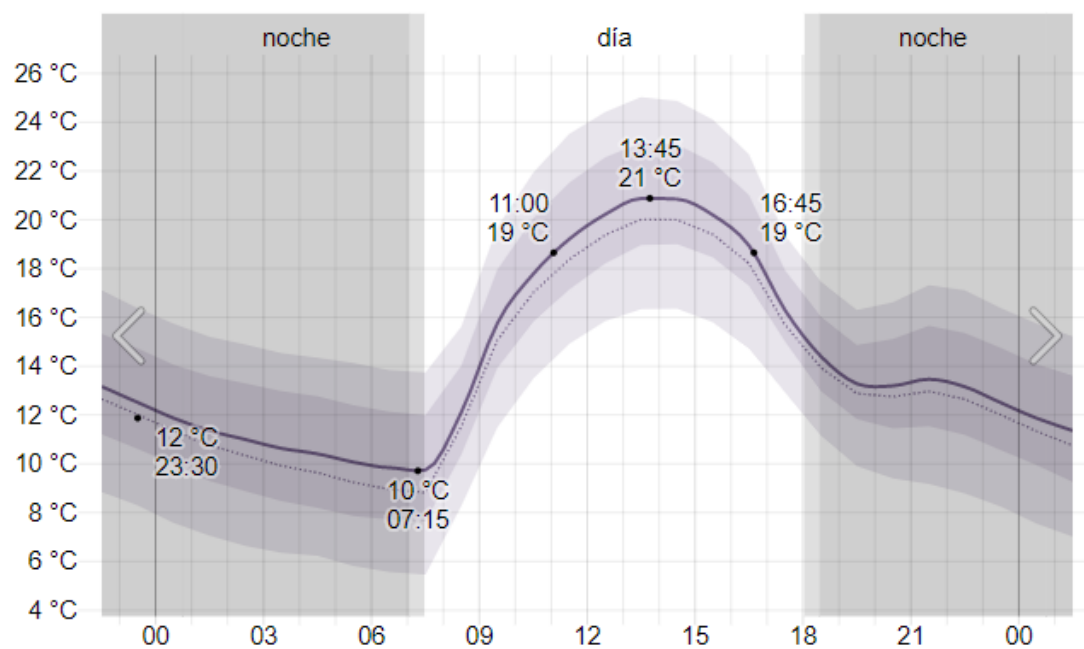


Figura 19: Temperatura promedio día de invierno zona norte.

Fuente: weathersparkcom

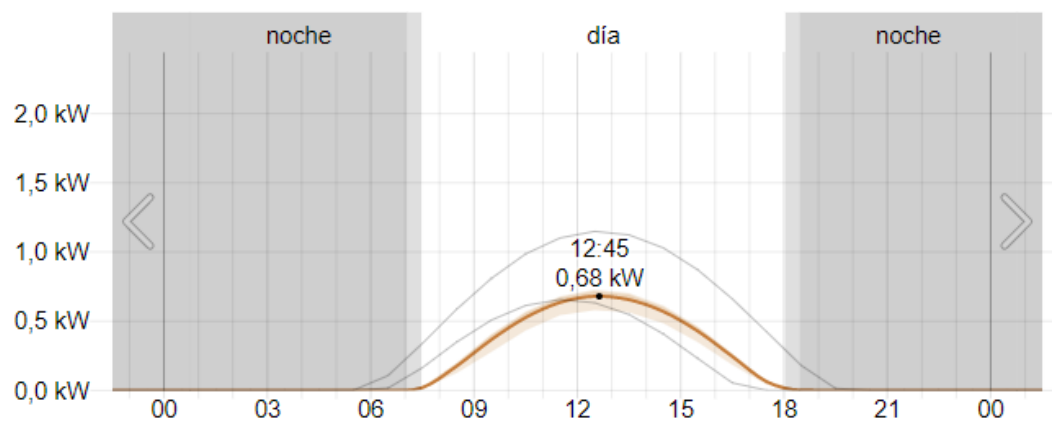


Figura 20: Energía solar día de invierno zona norte.

Fuente: weathersparkcom

1..20	1 E_{in} [Wh/m2/dia]	2 T_{inf} [K]	3 T_{Celda} [K]	4 $T_{celda,C}$ [°C]	5 E_{disp} [Wh/m2/dia]	6 E_{elec} [Wh/m2/dia]	7 $\eta_{calculada}$
Run 1	100	283	285	11,87	39,12	17,08	17,08
Run 2	130,5	283,4	286,1	12,92	51,11	22,21	17,01
Run 3	161,1	283,8	287,1	13,96	63,12	27,29	16,95
Run 4	191,6	284,3	288,2	15	75,16	32,34	16,88
Run 5	222,1	284,7	289,2	16,05	87,21	37,34	16,81
Run 6	252,6	285,1	290,2	17,09	99,29	42,3	16,74
Run 7	283,2	285,5	291,3	18,14	111,4	47,22	16,68
Run 8	313,7	285,9	292,3	19,19	123,5	52,1	16,61
Run 9	344,2	286,4	293,4	20,23	135,6	56,93	16,54
Run 10	374,7	286,8	294,4	21,28	147,8	61,72	16,47
Run 11	405,3	287,2	295,5	22,33	160	66,48	16,4
Run 12	435,8	287,6	296,5	23,39	172,2	71,19	16,33
Run 13	466,3	288,1	297,6	24,44	184,4	75,85	16,27
Run 14	496,8	288,5	298,6	25,49	196,7	80,48	16,2
Run 15	527,4	288,9	299,7	26,55	208,9	85,06	16,13
Run 16	557,9	289,3	300,8	27,6	221,2	89,6	16,06
Run 17	588,4	289,7	301,8	28,66	233,5	94,1	15,99
Run 18	618,9	290,2	302,9	29,72	245,9	98,56	15,92
Run 19	649,5	290,6	303,9	30,78	258,2	103	15,85
Run 20	680	291	305	31,84	270,6	107,3	15,79

Figura 21: Datos entregados por el software EES, sobre módulo fotovoltaico en el norte de Chile, día de invierno.

5.3.3 Zona sur

En esta zona se escoge Chillán. Provincia de Ñuble, Región del Biobío, Chile, y se realiza el mismo análisis anterior.

- **Día de verano**

El primer análisis consiste en tomar uno de los días más calurosos del verano en la zona sur del país, considerando su temperatura ambiente y radiación.

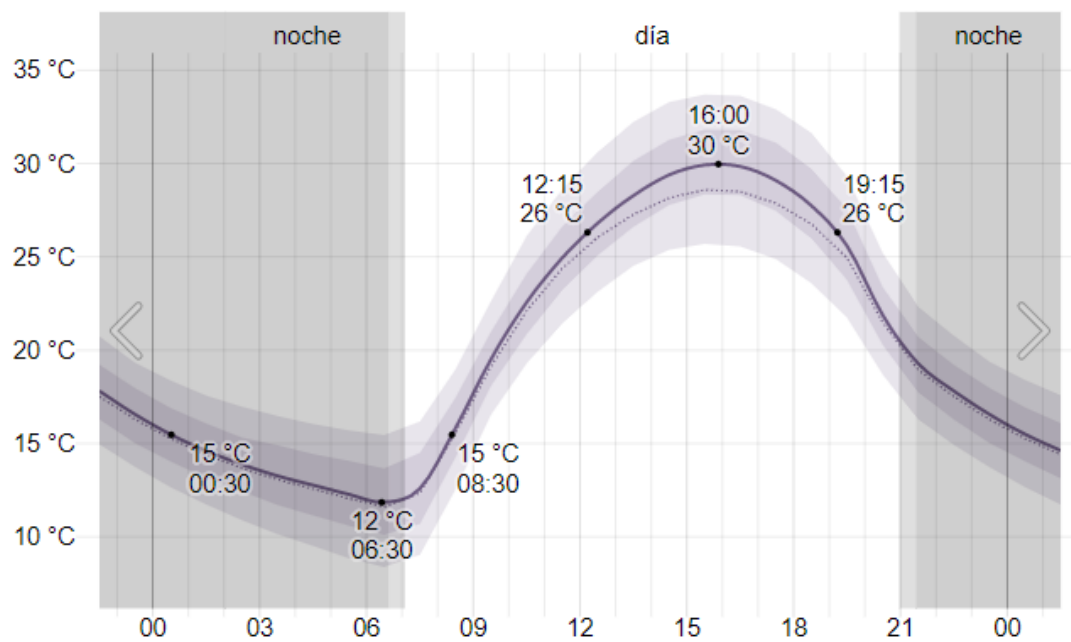


Figura 22: Temperatura promedio día de verano zona sur.

Fuente: weathersparkcom

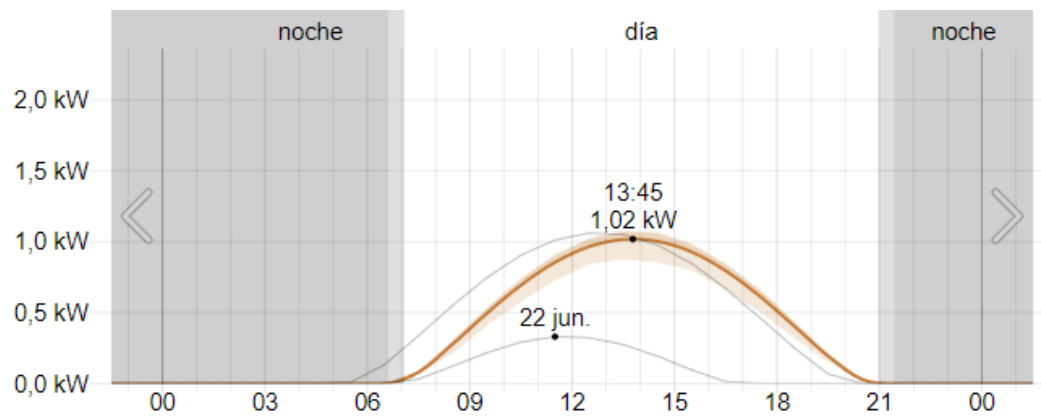


Figura 23: Energía solar promedio día de verano zona sur.

Fuente: weathersparkcom

1..20	1 E_{in} [Wh/m2/dia]	2 T_{inf} [K]	3 T_{Celda} [K]	4 $T_{celda,C}$ [°C]	5 E_{disp} [Wh/m2/dia]	6 E_{elec} [Wh/m2/dia]	7 $\eta_{calculada}$
Run 1	100	285	287	13,88	39,19	16,95	16,95
Run 2	147,9	285,9	289	15,8	58,06	24,89	16,83
Run 3	195,8	286,9	290,9	17,73	76,99	32,7	16,7
Run 4	243,7	287,8	292,8	19,66	95,98	40,4	16,58
Run 5	291,6	288,8	294,7	21,59	115	47,97	16,45
Run 6	339,5	289,7	296,7	23,52	134,2	55,42	16,33
Run 7	387,4	290,7	298,6	25,46	153,3	62,75	16,2
Run 8	435,3	291,6	300,6	27,4	172,6	69,96	16,07
Run 9	483,2	292,6	302,5	29,35	191,9	77,05	15,95
Run 10	531,1	293,5	304,4	31,3	211,2	84,02	15,82
Run 11	578,9	294,5	306,4	33,25	230,7	90,86	15,69
Run 12	626,8	295,4	308,3	35,2	250,2	97,59	15,57
Run 13	674,7	296,4	310,3	37,16	269,7	104,2	15,44
Run 14	722,6	297,3	312,3	39,11	289,4	110,7	15,31
Run 15	770,5	298,3	314,2	41,08	309	117	15,19
Run 16	818,4	299,2	316,2	43,04	328,8	123,2	15,06
Run 17	866,3	300,2	318,2	45,01	348,6	129,3	14,93
Run 18	914,2	301,1	320,1	46,98	368,5	135,3	14,8
Run 19	962,1	302,1	322,1	48,96	388,4	141,2	14,67
Run 20	1010	303	324,1	50,93	408,4	146,9	14,55

Figura 24: Datos entregados por el software EES, sobre módulo fotovoltaico en el sur de Chile, día de verano.

- **Día de invierno**

Posteriormente se elige un día con la temperatura más fría en el año, considerando temperatura ambiente y radiación.

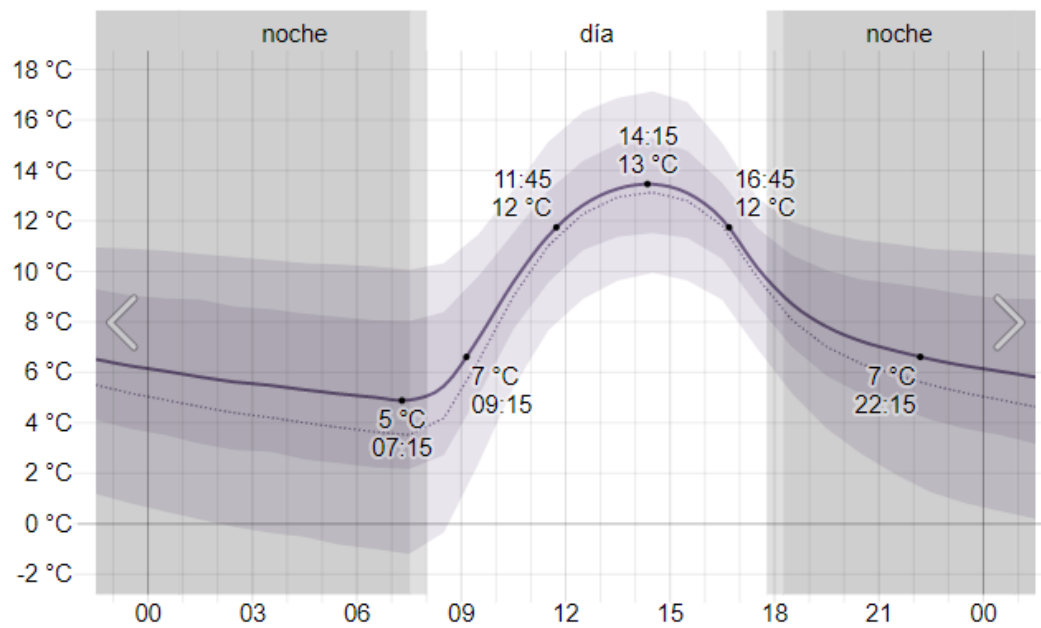


Figura 25: Temperatura promedio día de invierno zona sur.

Fuente: weathersparkcom

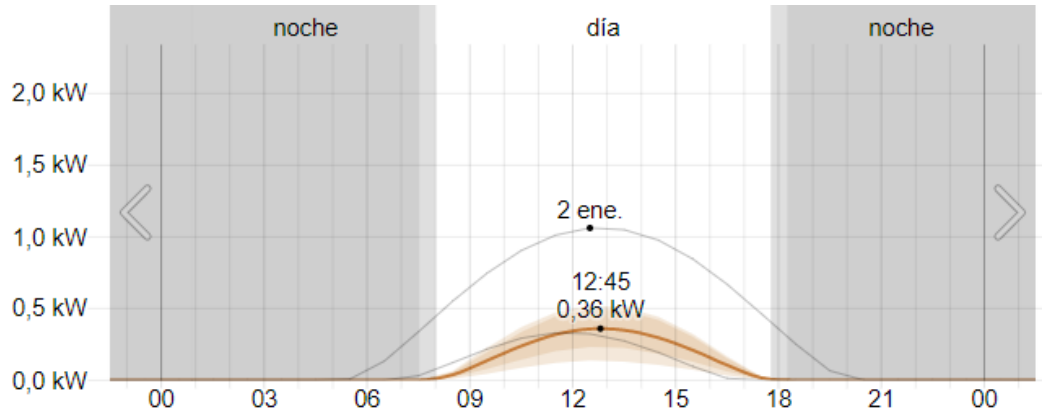


Figura 26: Energía solar promedio día de invierno zona sur.

Fuente: weathersparkcom

1..20	1 E_{in} [Wh/m2/dia]	2 T_{inf} [K]	3 T_{Celda} [K]	4 $T_{celda,C}$ [°C]	5 E_{disp} [Wh/m2/dia]	6 E_{elec} [Wh/m2/dia]	7 $\eta_{calculada}$
Run 1	100	283	285	11,87	39,12	17,08	17,08
Run 2	113,7	283,3	285,6	12,42	44,5	19,38	17,05
Run 3	127,4	283,5	286,1	12,96	49,88	21,67	17,01
Run 4	141,1	283,8	286,6	13,5	55,26	23,95	16,98
Run 5	154,7	284,1	287,2	14,04	60,65	26,21	16,94
Run 6	168,4	284,3	287,7	14,58	66,05	28,47	16,91
Run 7	182,1	284,6	288,3	15,13	71,45	30,72	16,87
Run 8	195,8	284,8	288,8	15,67	76,85	32,96	16,84
Run 9	209,5	285,1	289,4	16,21	82,26	35,19	16,8
Run 10	223,2	285,4	289,9	16,75	87,68	37,41	16,77
Run 11	236,8	285,6	290,4	17,3	93,1	39,62	16,73
Run 12	250,5	285,9	291	17,84	98,52	41,82	16,69
Run 13	264,2	286,2	291,5	18,39	104	44,02	16,66
Run 14	277,9	286,4	292,1	18,93	109,4	46,2	16,62
Run 15	291,6	286,7	292,6	19,47	114,8	48,37	16,59
Run 16	305,3	286,9	293,2	20,02	120,3	50,53	16,55
Run 17	318,9	287,2	293,7	20,56	125,7	52,68	16,52
Run 18	332,6	287,5	294,3	21,11	131,2	54,83	16,48
Run 19	346,3	287,7	294,8	21,65	136,6	56,96	16,45
Run 20	360	288	295,3	22,2	142,1	59,08	16,41

Figura 27: Datos entregados por el software EES, sobre módulo fotovoltaico en el sur de Chile, día de invierno.

5.3.4 Análisis de radiación con sistema de enfriamiento incorporado

Como se aprecia en la figura 17, 20, 23 y 26, donde se muestra el comportamiento del módulo fotovoltaico al estar sometido a diferentes condiciones de temperatura y radiación, se pueden obtener diversas afirmaciones:

- Mientras menor sea la radiación incidente, (el módulo estará expuesto a menor temperatura), mayor será la eficiencia del módulo.
- Mientras menor sea la radiación incidente, menor será la generación de electricidad, independiente de la eficiencia.

Ahora, es conveniente saber cuánto afecta el tener un sistema de enfriamiento instalado, por lo que se tomará el día de verano de mayor calor para realizar los análisis.

Como aún no está definido el diseño final ni el tipo de fluido que tendrá el sistema de enfriamiento, se buscará obtener el “*coeficiente convectivo h* ” necesario para mantener una temperatura de 35°C , con esto decidir los parámetros restantes.

1..100	1 E_{in} [Wh/m2/dia]	2 T_{inf} [K]	3 T_{Celda} [K]	4 $T_{celda,C}$ [°C]	5 E_{disp} [Wh/m2/dia]	6 E_{elec} [Wh/m2/dia]	7 $\eta_{calculada}$
Run 17	958,9	298,3	318,2	45,04	385,9	143,2	14,93
Run 18	1013	298,8	319,9	46,76	408,1	150	14,82
Run 19	1066	299,4	321,6	48,48	430,3	156,8	14,71
Run 20	1120	300	323,4	50,21	452,6	163,4	14,59

Figura 28: Módulo fotovoltaico sin sistema de enfriamiento.

1..20	1 E_{in} [Wh/m2/dia]	2 T_{inf} [K]	3 T_{Celda} [K]	4 $\eta_{calculada}$	5 E_{elec} [Wh/m2/dia]	6 $h_{conv,2}$ [W/m2K]	7 E_{disp} [Wh/m2/dia]
Run 17	958,9	298,3	308	15,59	149,5	64,59	572,3
Run 18	1013	298,8	308	15,59	157,9	76,23	625,5
Run 19	1066	299,4	308	15,59	166,2	89,88	678,8
Run 20	1120	300	308	15,59	174,6	106,1	732,1

Figura 29: Módulo fotovoltaico que incluye sistema de enfriamiento.

Las conclusiones de este estudio son las siguientes:

- Al utilizar una temperatura de la celda estándar de 35°C la eficiencia se mantiene constante en todo momento independiente de la radiación incidente. Para que esto se cumpla, el coeficiente de convección debe ir en aumento.
- En el caso donde la radiación es de $1120[\text{W}/\text{m}^2]$, la energía eléctrica generada por el módulo aumenta un 6,8%, la energía disponible aumenta un 61,7% y el coeficiente convectivo debe ser de $106,1[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$, que es accesible con agua y aire dependiendo de la velocidad.

5.3.5 Disipación térmica espumas de aluminio

Como lo establece la literatura, las espumas de aluminio son excelentes disipadores térmicos, debido a sus porosidades que permiten circular el aire de forma más eficiente.

Gracias al trabajo realizado por Quentin Levices, “Estudio computacional de la disipación térmica de espumas metálicas diseñadas mediante el método de Voronoi” [9], se aprecia que cuando las espumas están sometidas a convección forzada, los resultados son los siguientes:

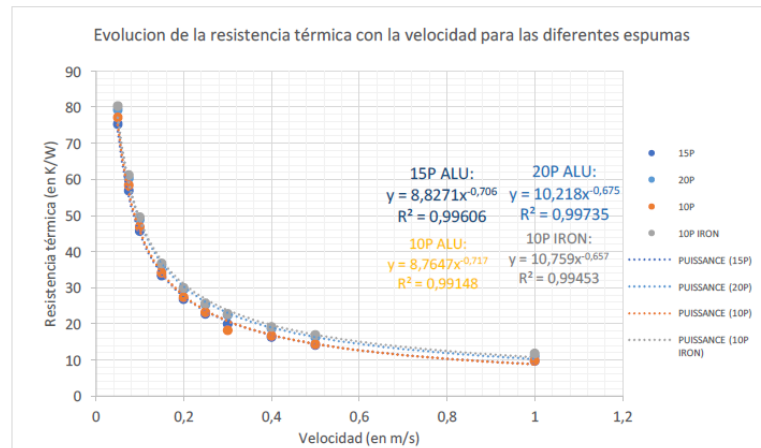


Figura 30: Gráfico de resistencias térmicas de la espuma de aluminio, respecto a la velocidad. [9]

En este gráfico se aprecian 4 tipos de espuma, 3 de aluminio con distinta porosidad, y una de acero. Como se puede apreciar en cualquiera de los 4 casos estudiados el comportamiento es bastante similar, lo que nos deja abiertos a tomar una decisión más bien enfocada en costos que en rendimiento.

Otro dato importante que arroja este estudio, que se relaciona directamente con la capacidad de enfriamiento de las espumas, es que son capaces de aumentar 2 a 3 veces la velocidad dentro de la espuma, como señala el autor:

“Se observa que la velocidad local del aire aumenta cuando entra en la espuma. Se puede aumentar en ciertos poros de 2 a 3 veces cuando entra en la espuma. Esto es debido a la caída de presión. Los valores de velocidad local que va a alcanzar en los

3 ejemplos son más elevados en el caso de la espuma de 20 puntos que en el caso de la espuma de 10 puntos. En el caso de una velocidad de entrada de 0.5 m. s⁻¹ (fig. 4.5.), la velocidad local máxima observada para la espuma de 10 puntos es de 1.25 m.s⁻¹ (aumentando un 250%) mientras que en la espuma de 20 puntos es de 1.41 m.s⁻¹ (aumentando un 282%)” (página 48 [9]).

Al tener una velocidad más alta, aumenta considerablemente el coeficiente de disipación térmica “h”, lo que es muy beneficioso para este estudio.

6 Construcción y validación del sistema de enfriamiento

6.1 Diseño prototipo

Para validar los cálculos y supuestos, se procede a construir un prototipo de bajo costo, que sella al panel y que sólo deja libre una entrada y una salida, y así permitir la circulación de aire. Este prototipo se construirá con materiales económicos y de rápida construcción, siendo madera para la tapa y plástico para la entrada y salida.

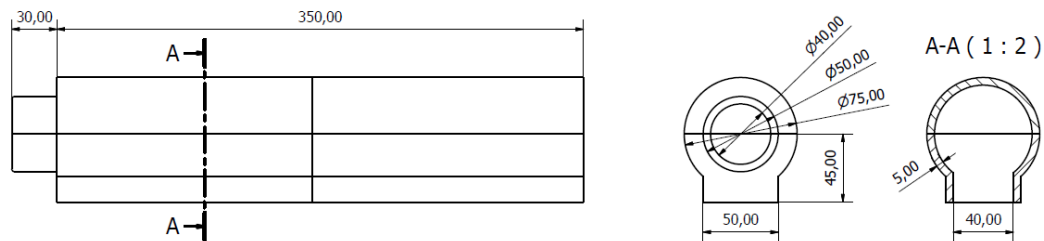


Figura 31: Diseño del canalizador de flujo para panel de 320W.

El diseño del colector de aire consta de dos partes idénticas que cumplen dicha función desde la salida del radiador; que tiene forma rectangular, y la dirigen a una única salida tubular de 50 mm de diámetro.

El radiador posee las mismas dimensiones que el exterior del marco del panel, con un marco interno que encaja en el interior del marco, evitando el desplazamiento de la tapa y disminuyendo fugas de aire.

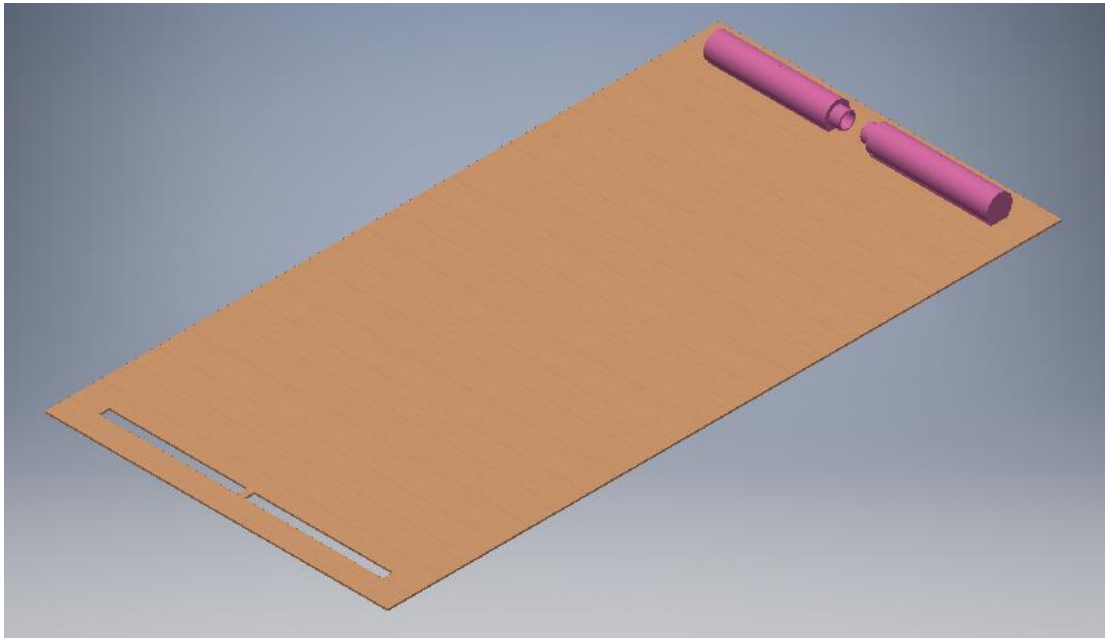


Figura 32: Diseño CAD sistema de enfriamiento.

6.2 Construcción de prototipo

Para la construcción, se utiliza una tapa terciado estructural de 15 mm con dimensiones igual a las exteriores del marco del panel, el marco interno se fabrica con el mismo material, tomando las dimensiones del interior del marco del panel. La entrada de aire se realiza por la abertura rectangular en un costado y la salida en la abertura rectangular con el canalizador de aire. Se fabrica el canalizador de flujo con tubos de PCV de 75 mm, tal como se aprecia en la imagen:



Figura 33: Canalizador de flujo para radiador de aire fabricado mediante tuberías de PVC.

Para adherirse al panel, se utilizan grapas en forma de “C” ajustadas con pernos a la tapa de terciado en las 4 esquinas del panel, la conexión eléctrica se realiza con alargadores de 20 cm con terminales MC4 y con salida por la tapa.



Figura 34: Radiador de aire de módulo fotovoltaico de 320W.

6.3 Construcción de simulador solar

Para validar los resultados del prototipo, se construye un simulador solar para módulos fotovoltaicos. El objetivo de esto es medir la eficiencia del radiador, aislándolo de otros efectos de transferencia de calor, principalmente de la convección forzada que genera el viento por la parte posterior del panel. Con esto, se asegura que las mediciones de generación y temperatura entre un panel con radiador, y otro sin, podrán ser comparadas para posteriores conclusiones.

Luego, se procede a definir las características físicas que debe tener el simulador, el cual debe ser económico, fácil de construir, que sea liviano y que pueda transportarse en un camión pequeño. Además, se busca que sirva para paneles de hasta $330[Wp]$ y que mida con el estándar de medición la norma STC, que exige una radiación de 1000 W/m^2 , $25^\circ C$ de temperatura y una distribución espectral AM 1.5G.

Por otra parte, se utilizarán las luces halógenas, ya que gracias a la velocidad que se puede hacer la medición, y su bajo costo, hacen que sea la mejor opción.

Para aumentar el rendimiento, se utilizarán caras reflectantes de aluminio, las que se añadirán en la parte frontal y posterior del panel.

Teniendo claridad en el diseño, se escoge la distribución y potencia de los halógenos. Se realizaron pruebas que consistían en variar la potencia, distancia y distribución, analizando halógenos de 150 W , 300 W y 500 W . (Ver Anexo)

Los resultados mostraron que, a mayor distancia entre el foco y el halógeno, mejor es la distribución, pero no estimula lo suficiente al panel, por lo que la generación disminuye. Para los halógenos de 300 W y 500 W , se varió la distancia coincidiendo que la mejor generación está a 300 mm desde la cara del panel. Entre los halógenos de 500 W y 300 W , se probaron diferentes combinaciones, obteniendo mejores resultados con los de 300 W .

Las pruebas y la distribución de los halógenos están disponibles para su revisión en la sección de Anexos.

6.3.1 Construcción y diseño

Teniendo clara la distribución de los halógenos, se diseña el simulador mediante el software Autodesk Inventor, obteniendo el siguiente resultado:

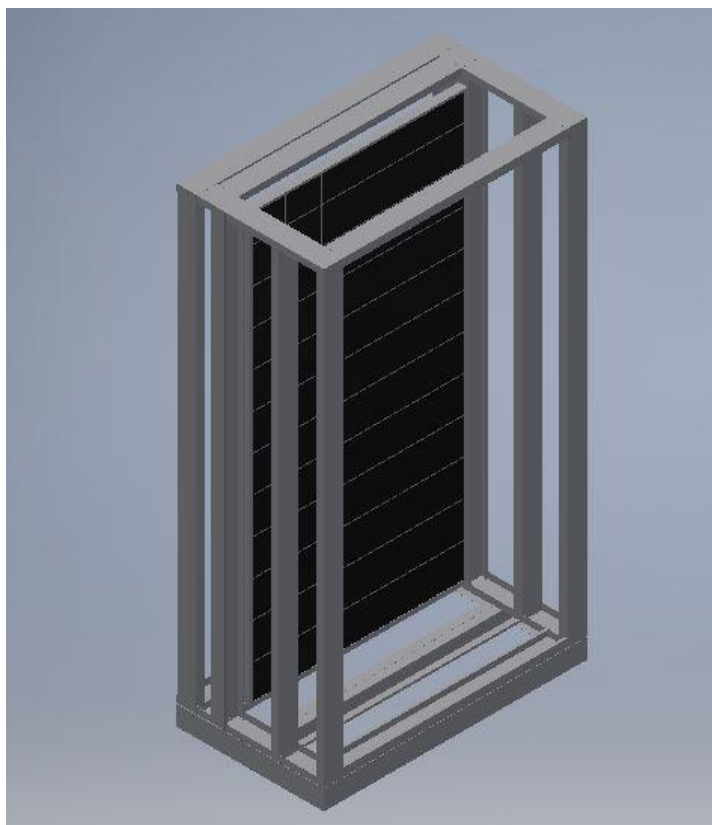


Figura 35: Esqueleto de simulador solar diseñado en software Autodesk Inventor.

Los planos y el paso a paso de la construcción se detalla en la sección de Anexos.

El resultado del simulador solar construido es el siguiente:



Figura 36: Simulador solar terminado.

6.4 Validación

La medición de temperatura y flujo del radiador se realiza con la siguiente configuración.

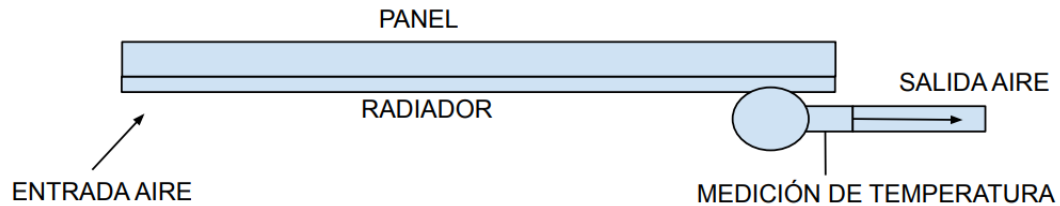


Figura 37: Esquema de medición de temperatura en conjunto panel + radiador.

La primera etapa del proceso de medición consiste en tomar la temperatura del módulo en el centro, así tener una referencia. Las variables térmicas se miden 1 vez por minuto durante 15 minutos o alcanzado un estado estacionario de la temperatura. Además, se toman las mediciones eléctricas para verificar condiciones de operación.

Posteriormente se instala el sistema de enfriamiento en el panel utilizado anteriormente y se efectúa una tanda de mediciones, en las que se mide temperatura de aire de entrada, temperatura de aire de salida y temperatura del centro del panel, además de las condiciones de operación y generación eléctrica.

6.4.1 Resultados

Se procede a realizar las mediciones, las que se detallaron anteriormente.

- Panel de referencia, sin sistema de enfriamiento, desviación curva ideal: - 7,2%

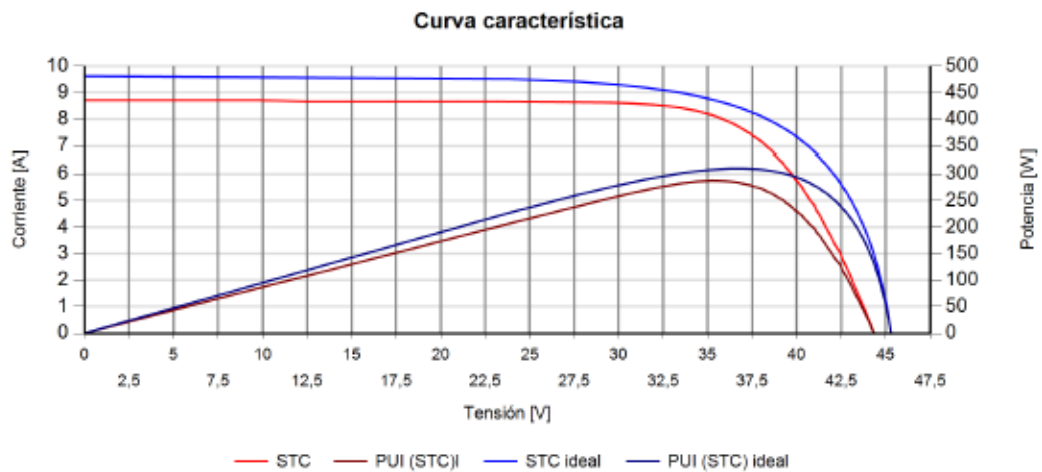


Figura 38: Curva I/V de panel sin sistema de referencia.

- Panel intervenido antes de realizar prueba, con radiador instalado, desviación de curva ideal: -10.1%

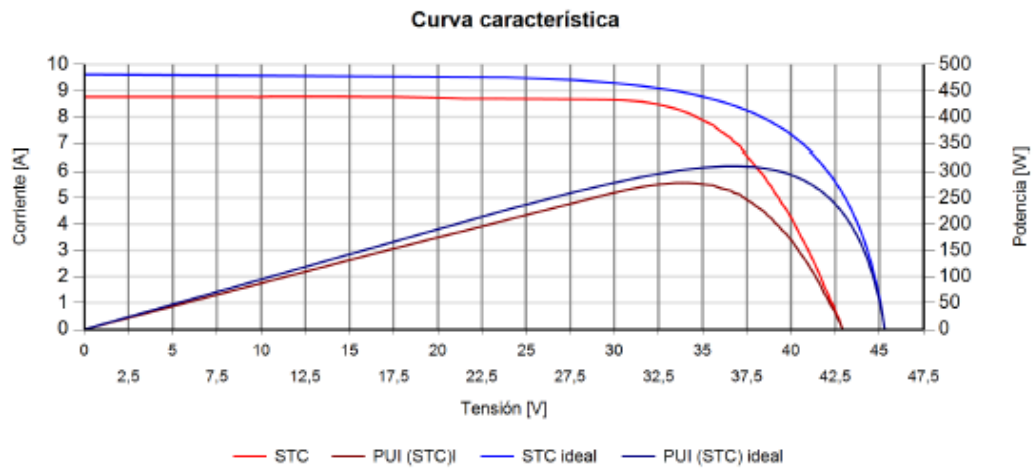


Figura 39: Curva I/V de panel con sistema de enfriamiento.

Las mediciones obtenidas en relación con las variables térmicas son las siguientes:

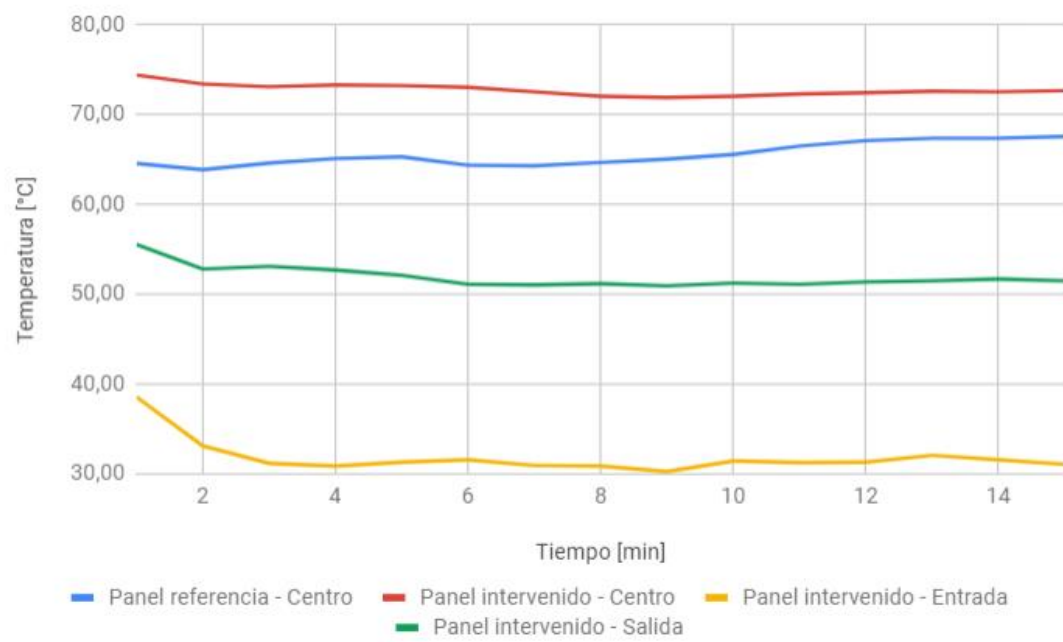


Figura 40: Resultado de mediciones de variables térmicas.

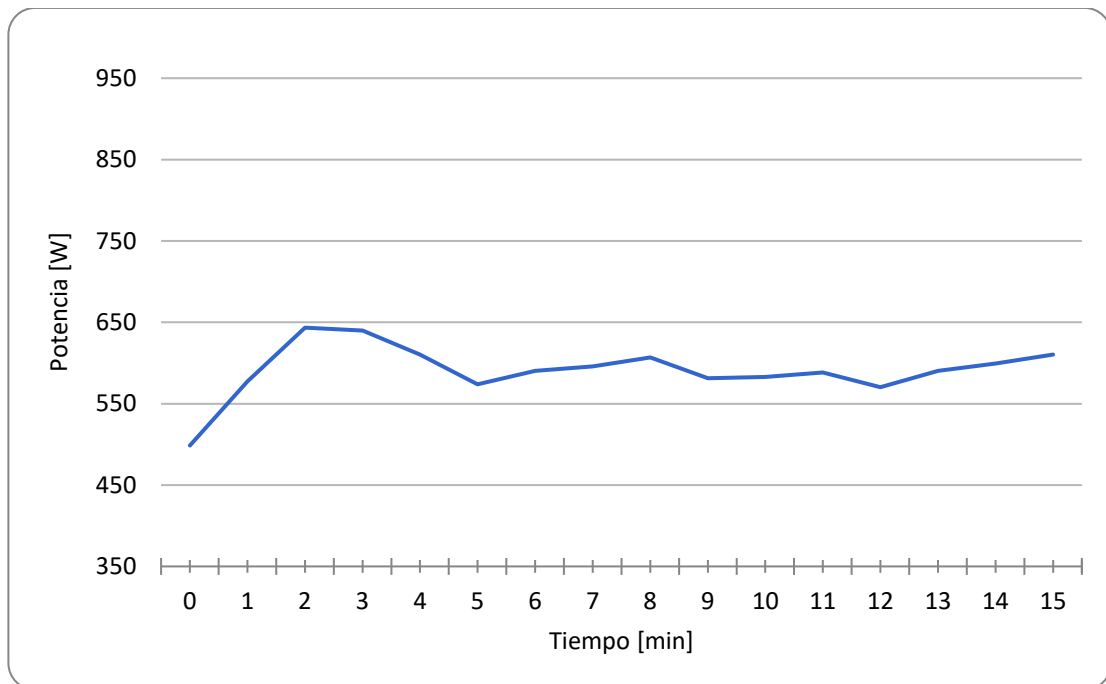


Figura 41: Potencia térmica generada por el módulo FV.

En la figura 41 se aprecia que el panel intervenido comienza con un aumento de su temperatura en aproximadamente 10°C como efecto de la instalación del radiador, una vez desarrollada la prueba, la temperatura del panel intervenido no varía significativamente. Además, se aprecia que la variación de temperatura entre entrada y salida se mantiene casi constante a lo largo de la prueba, lo que indica que el piloto de radiador trabaja de forma estable.

Por otra parte, en la figura 42 se aprecia la ganancia de energía térmica generada, debido al aumento de temperatura del aire.

En la siguiente tabla se deja el resumen de los resultados obtenidos, en relación con la generación.

Tabla 15: Resumen de resultados obtenidos.

	Módulo sin sistema de enfriamiento	Módulo con sistema de enfriamiento
Potencia panel STC [W]	287.6	278.8
Discrepancia curva ideal %	-7.2	-10.1
Energía térmica extraída [W/m ²]	0	321.5

6.4.2 Comparativa con modelo numérico

Posteriormente a la prueba experimental, se utiliza el modelo generado con el software EES, ingresando como valores de entrada los datos obtenidos en las mediciones experimentales, donde se procede a calcular la eficiencia, energía eléctrica y la energía disponible. Los cálculos se encuentran disponibles en la sección de anexos.

6.4.2.1 Caso 1: Sin sistema de enfriamiento

Para este caso, el modelo numérico arroja una eficiencia de 13,8[–] y generación máxima de 138 [W/m^2] (generación total del módulo FV 276 [W]).

La diferencia porcentual al considerar la energía eléctrica generada con la teórica es la siguiente:

$$\text{Diferencia porcentual} = \frac{(287,6 - 276)}{276} \times 100 = 4.2\%$$

6.4.2.2 Caso 2: Incluyendo sistema de enfriamiento

Para este caso, en primera instancia, se calcula el coeficiente de convección “ h ”, en relación con la temperatura del ambiente, del módulo y la velocidad del soplador. Para estos cálculos se utiliza un caso en particular que se adapta a las condiciones de trabajo utilizadas.

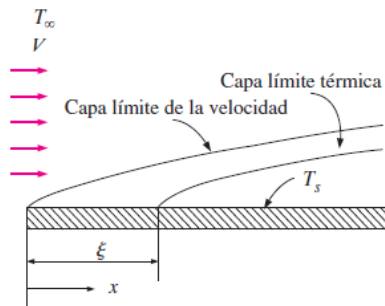


Figura 42: Flujo sobre placa plana con un tramo inicial no calentado. [15]

Los resultados de los cálculos del coeficiente de convección se encuentran en la sección de anexos.

Para este caso que integra el **sistema de enfriamiento**, el software arroja una eficiencia de 13,15[–], la generación de 131,5 [W/m^2] (generación total del módulo FV 263 [W]) y la máxima energía disponible en la parte posterior de módulo es de 713,2[W/m^2].

La diferencia porcentual al considerar la energía eléctrica generada con la teórica es la siguiente:

$$Diferencia\ porcentual = \frac{(278,8 - 263)}{263} \times 100 = 6\%$$

El coeficiente de convección calculado es de 44,25[$W/m^2 \cdot ^\circ K$], mientras que el generado por el software EES es de 34,5 [$W/m^2 \cdot ^\circ K$]. La diferencia porcentual es la siguiente:

$$Diferencia\ porcentual = \frac{(34,5 - 44,25)}{44,25} \times 100 = 22,03\%$$

Otras consideraciones:

- La energía térmica máxima disponible es de 713,2[W/m^2], el porcentaje extraído experimentalmente es de 45,07%.
- La velocidad medida del soplador utilizado experimentalmente es de 20 m/s , y la velocidad generada por el software EES es de 15,65 m/s .
- Si consideramos el coeficiente de convección que se busca para mantener el módulo a temperatura estable (106,1[$W/m^2 \cdot ^\circ K$]), la velocidad que debe obtener con el soplador es de 51,36 (m/s). Por ende, la velocidad al interior

del sistema de enfriamiento debe aumentar un 328% para obtener la temperatura buscada.

6.4.3 Análisis de resultados

Según los resultados obtenidos, se procede a hacer un análisis exhaustivo, para que posteriormente se logre obtener el diseño final del radiador con espuma metálica.

Cabe mencionar, que en el prototipo construido no se utilizó espuma de aluminio, esto se debe a que la obtención y adquisición estaba fuera del presupuesto de este trabajo. Pese a ello, el trabajo realizado únicamente con aire es representativo y las conclusiones obtenidas serán de gran utilidad para el diseño final.

En primera instancia se midió la temperatura y generación del módulo fotovoltaico, antes de la instalación del radiador. Estos valores son sustanciales, ya que con esto se puede realizar la comparación de eficiencia del sistema de enfriamiento. Luego, al instalar el radiador, y sin encender el soplador, se aprecia que el módulo aumenta su temperatura, esto se debe a que la madera, al ser un aislante, evita el intercambio por convección y eso genera el aumento en la temperatura, lo que es completamente esperable.

Al iniciar el soplador, se aprecia un aumento en la temperatura del panel, llegando prácticamente a los 80°C , mientras que el panel sin radiador bordea los 70°C . Esto se debe a que el radiador de madera aísla al módulo, evitando que la energía térmica salga del mismo por convección natural, lo que produce un inminente aumento de temperatura. Por una parte, es perjudicial para el módulo, ya que se ve disminuida su generación eléctrica, pero por otra parte es beneficioso, ya que es posible extraer mayor cantidad de energía térmica.

Al pasar los minutos, se aprecia que el módulo con radiador disminuye su temperatura, mientras que el módulo sin radiador la aumenta, esto se debe a que, con el transcurso

del tiempo, dentro del simulador el aire se calienta y la celda fotovoltaica es quien sufre este exceso de temperatura. Por otra parte, el módulo con el radiador tiende a disminuir su temperatura a medida que avanza ya que el aire que pasa por detrás del módulo es quien extrae este exceso de energía térmica.

Cabe señalar que al utilizar el simulador se evitan los efectos de convección natural en las caras del panel, con el fin de aislar y verificar en condiciones ideales el comportamiento del aire al interior del radiador. Este utiliza 18 luces de 300 [W] cada uno, equivalente a inyectar 5400 [W] de generación. Esto no es para nada óptimo, ya que se inyecta tal cantidad de watts, pero se generan aproximadamente 280 [W] de energía eléctrica, y 321 [W] de energía térmica, lo que es bastante ineficiente y para nada conveniente. Cabe mencionar que los 5400 [W] que utilizan los halógenos se disipan en energía térmica por la tapa del simulador.

Posteriormente, se compara el valor calculado con el experimental, donde se observa que el sistema es capaz de extraer un 45,07% de la energía total disponible en la cara posterior de panel, lo que es totalmente aceptable, ya que el coeficiente de convección forzada “ h ” utilizado es entre $34,5 [W/m^2 \cdot ^\circ K]$, debido a la velocidad del aire y la temperatura de entrada. Otros errores al que se le puede atribuir al porcentaje de extracción es que el cálculo realizado se lleva a cabo con supuestos de gas ideal, y con un comportamiento muy idealizado. Por esa razón, se concluye que la hipótesis de los cálculos es válida, y los supuestos con espuma de aluminio también debieran serlo.

Tal como señalaban los cálculos previos, al utilizar únicamente aire que tiene un coeficiente de convección forzada de $34,5 [W/m^2 \cdot ^\circ K]$, no sería capaz de enfriar el panel, ya que, según los cálculos previos se requiere un coeficiente de $106,1 [W/m^2 \cdot ^\circ K]$. Para conseguir este coeficiente, la velocidad del soplador debe aumentar en un 328%, por ende, es vital instalar y probar las espumas de aluminio, que teóricamente son capaces de aumentar 250% la velocidad de entrada.

Por otra parte, se debe mencionar que el modelo diseñado se acerca considerablemente a la realidad, pero no es certero, ya que existen más variables que se deben considerar y analizar, en comparación con las pruebas experimentales o a simulaciones matemáticas más complejas. El objetivo del modelo es más bien mostrar un comportamiento aproximado del módulo, y que sea útil para tomar decisiones a corto plazo, que no incluyan un riesgo monetario considerable.

7 Propuesta final de diseño

Antes de dar finalmente la propuesta de diseño, se realiza un análisis económico para conseguir, monetariamente, el diseño óptimo.

7.1 Análisis económico

En este análisis se busca obtener la cantidad óptima de espuma de aluminio, con la relación costo/beneficio; esto significa, utilizar la mínima cantidad de espuma, que sea capaz de generar la mayor ganancia monetaria.

Como condición inicial, el costo del sistema de enfriamiento no debe superar el precio de un módulo fotovoltaico de 320 [W], que es aproximadamente [128 USD].

Tabla 16: Costos reales de prototipo construido

Descripción	Precio
Soplador	\$16.000
Tapa de madera con conexión MC4	\$16.000
Canalizador PVC	\$10.400
Temporizador para apagar y encender el soplador	\$12.000
Total	\$54.400

Como se puede apreciar, el costo total del prototipo construido es de \$54.400, por lo que quedan aún \$45.600 para invertirlos en espuma de aluminio.

Lo ideal es que la espuma de aluminio ocupe la mayor cantidad de área posible, para tener mayor superficie de contacto y enfriar más rápidamente al módulo. Por otra parte, como se apreció en el apartado 4.2.6, la porosidad de la espuma no es del todo influyente, ya que las diferencias entre unas y otras no eran relevantes, más bien basta con utilizar la más económica.

En la página web, mwmaterialsworld.com, una espuma de aluminio de 600 x 1200 x 10[mm], con porosidades entre 50% a 90%, tiene un costo de \$112.000, por ende, se debe realizar un diseño que utilice aproximadamente el 50% de esa plancha como máximo.

No se consideran costos operacionales, ya que es probable que estos puedan ser neteados con la venta de ganancia eléctrica y térmica. Esto no es del todo seguro, ya que falta comprobar si con la espuma de aluminio que se instalará es capaz conseguir un coeficiente de disipación térmica “ h ” de $106,1[W/m^2K]$, variado el área de contacto, la velocidad o el fluido de entrada.

7.2 Propuesta de diseño

El diseño final propuesto es similar al prototipo ya construido, pero la diferencia es que en el borde tendrá espuma de aluminio. No se dejará todo el interior con espuma de aluminio ya que superamos los costos máximos estipulados.

A continuación, se dejan las imágenes del diseño final del radiador.

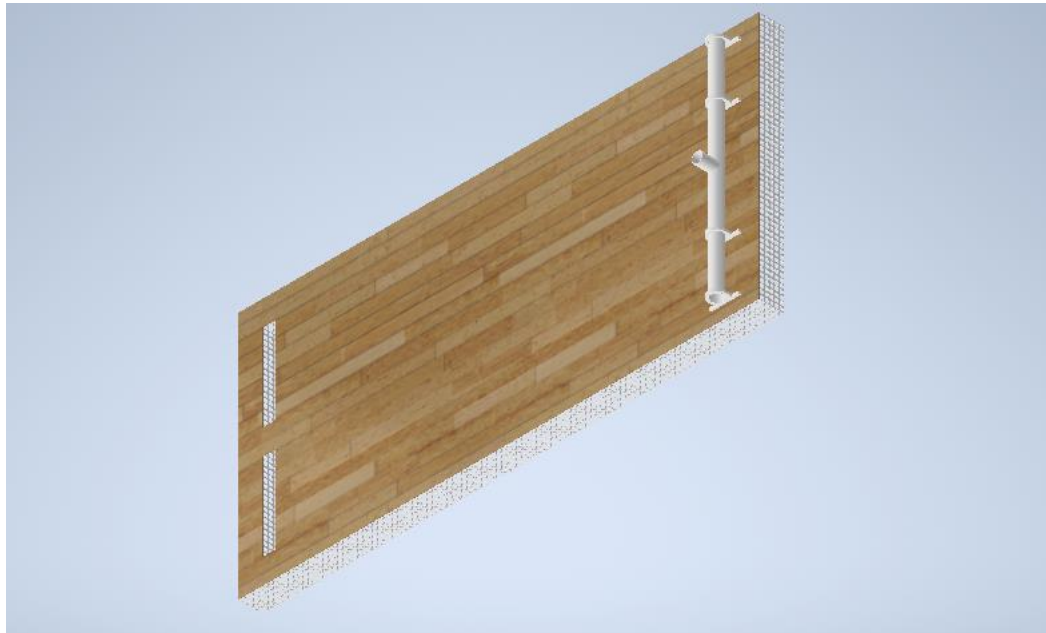


Figura 43: Vista 1 del diseño final prototipo

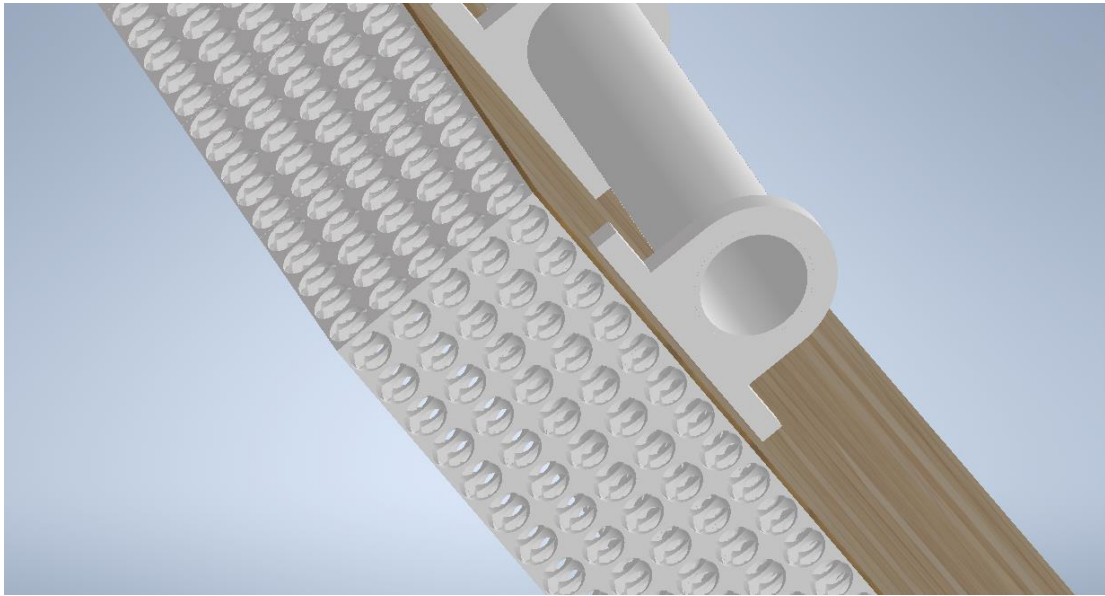


Figura 44: Vista 2 del diseño final prototipo



Figura 45: Vista 3 del diseño final prototipo

CONCLUSIONES

El sistema de enfriamiento construido, únicamente con la placa de madera, se ha convertido en la opción validada más viable y atractiva presente actualmente en el mercado, esto se debe principalmente a su bajo costo, y a su capacidad de aprovechar el exceso de energía térmica de los módulos. Si bien, este prototipo no fue capaz de enfriar el panel, por ende, no se aumentó la generación (al contrario, se calentó aún más), se obtuvo una ganancia de energía térmica considerable, y todo esto invirtiendo menos del 50% del costo de un panel convencional, cumpliendo ambos objetivos críticos de diseño. No es posible asegurar que con espuma de aluminio se logrará enfriar el módulo fotovoltaico, pero es 100% seguro que, incluyendo las espumas al diseño construido, se aumentará la eficiencia.

Los resultados obtenidos sobre generación de energía térmica y eléctrica se realizaron con el simulador solar, quien estandariza la luz solar y logra tener mediciones que son capaces de comparar, ya que evitan los cambios de radiación, además de los efectos de transferencia de calor. No obstante, para el siguiente prototipo construido, sería vital instalarlo en una planta que ya esté operando, para validar el funcionamiento del equipo en terreno.

Un posible cambio o evolución del diseño propuesto, es considerar a la espuma de aluminio como parte de la estructura que sujeta el módulo fotovoltaico, así ésta cumpliría un doble rol, sujetar al panel y enfriarlo, lo que aumentaría considerablemente el presupuesto, ya que las estructuras son casi el 20% del total de costos de una instalación solar fotovoltaica.

Al finalizar este trabajo de título, se concluye que el prototipo de sistema de enfriamiento propuesto es válido, cumple con los objetivos propuestos, por lo que es probable es que este proyecto continúe en ejecución, intentando levantar capital para así construir el prototipo con espuma de aluminio que tanto se busca concretar.

BIBLIOGRAFÍA

[1] 2020. Collado, Eduardo. *Los Efectos De La Temperatura En La Producción De Las Instalaciones Fotovoltaicas*. [En Línea] *Energías-Renovables*. Madrid (España). <<https://www.enerbias-renovables.com/fotovoltaica/los-efectos-de-la-temperatura-en-la-20150713>>.

[2] 2020. Ministerio De Energía. *Capacidad Instalada*. [En Línea] *Energías-Renovables*. Santiago (Chile) <<http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>>.

[3] 2019. Masson, Gaetan And Kaizuka, I. And Detolleanere, Alice And Lindahl, Johan And Jäger-Waldau, Arnulf. *Snapshot Of Global Photovoltaic Markets*.

[4] 2018. Consuelo Pillar Reyes. *Chile, El Paraíso De La Energía Solar*. [En Línea] *Array Technologies*. Santiago (Chile) <<https://www.pv-magazine-latam.com/comunicados/chile-el-paraiso-de-la-energia-solar/>> [Consulta: 7 Junio 2020]

[5] 2012. H. Teo, P. Lee Y M. Hawlader, «An Active Cooling System For Photovoltaic Modules» *Applied Energy*, Vol. 90, Pp. 309-315.

[6] 2010. S. Armstrong Y W. Hurley, «A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions» *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 1488-1495.

[7] 1961. Swanson, B. W., Somers, E. V., & Heikes, R. R. Optimization of a Sandwiched Thermoelectric Device. *Journal of Heat Transfer*, 83(1), 77.

[8] 2007. Mostafid A.M., *Entrance and Exit Effects on Flow Through Metallic Foams*, Tesis, Concordia university, Montreal, Quebec, Canada.

[9] 2016. Levices, Q. (2016). *Estudio computacional de la disipación térmica de espumas metálicas diseñadas mediante el método de Voronoi (Projecte/Treball Final de Carrera)*. UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/90503>

[10] 1999. Calmidi V.V., Mahajan R.L., *The Effective Thermal Conductivity Of High Fibrous Metal Foams*, *Asme Journal Of Heat Transfer*, Vol 121, N°2, P466--471.

[11] 2003. Boomsma K., Poulikakos D., Zwick F., *Metal Foams As Compact High Performance Heat Exchangers*, *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, Vol. 44, N°4, P466--471.

[12] 1999. Battacharya A., Calmidi V.V., Mahajan, R.L., *An Analytical--Experimental Study For The Determination Of The Effective Thermal Conductivity Of High Porous Fibrous Foams*, *Conf. Asme Application Of Porous Media Methods For Engineered Materials*, Vol 23. P13--26.

[13] 2004. CRUZ--RUIZ E., *Modeling Of Heat Transfer In Open--Cells Metal Foams*, Master Thesis, Mechanical Engineering, University Of Puerto Rico, Mayagüez Campus, Porto Rico, 145p.

[14] 2009. Dieter, George E.; Linda C. Schmidt. *Engineering Design*. 4ta ed. New York: The McGraw-Hill Book Co. ISBN 978-0-07-283703-2

[15] 2011. Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones* (4a. ed.--.). México D.F.: McGraw Hill.

ANEXOS

Anexo 1: Tablas de pesos absolutos

Relación entre objetivos

Tabla 17: Relación entre objetivos.

	A	B	C	D	Total	Peso
A	1,000	7,000	2,000	6,000	16,000	0,428
B	0,143	1,000	0,143	0,200	1,486	0,040
C	0,500	7,000	1,000	5,000	13,500	0,361
D	0,167	5,000	0,200	1,000	6,367	0,170
					37,352	1,000

Tabla de costos

Tabla 18: Tabla de costos.

	A1	A2	A3	A4	A5	Total	Peso
A1	1,000	5,000	5,000	7,000	2,000	20,000	0,386
A2	0,200	1,000	3,000	5,000	0,333	9,533	0,184
A3	0,200	0,333	1,000	2,000	0,200	3,733	0,072
A4	0,143	0,200	0,500	1,000	0,143	1,986	0,038
A5	0,500	3,000	5,000	7,000	1,000	16,500	0,319
						51,752	1,000

Tabla de autonomía

Tabla 19: Tabla de autonomía.

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	Total	Peso
B1	1,000	5,000	0,200	0,200	0,143	0,333	6,876	0,081
B2	0,200	1,000	0,143	0,143	0,143	0,143	1,771	0,021
B3	5,000	7,000	1,000	3,000	3,000	5,000	24,000	0,282
B4	5,000	7,000	0,333	1,000	0,333	0,333	14,000	0,164
B5	7,000	7,000	0,333	3,000	1,000	3,000	21,333	0,250
B6	3,000	7,000	0,200	3,000	3,000	1,000	17,200	0,202
							85,181	1,000

Tabla de operación

Tabla 20: Tabla de operación.

	B1	B2	B3	B4	B5	B6		
B1	1,000	5,000	0,200	0,200	0,143	0,333	6,876	0,081
B2	0,200	1,000	0,143	0,143	0,143	0,143	1,771	0,021
B3	5,000	7,000	1,000	3,000	3,000	5,000	24,000	0,282
B4	5,000	7,000	0,333	1,000	0,333	0,333	14,000	0,164
B5	7,000	7,000	0,333	3,000	1,000	3,000	21,333	0,250
B6	3,000	7,000	0,200	3,000	3,000	1,000	17,200	0,202
							85,181	1,000

Tabla de estructuras

Tabla 21: Tabla de estructuras

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9		
D1	1,000	0,143	0,143	2,000	0,333	0,333	0,333	0,333	0,200	4,819	0,030
D2	7,000	1,000	3,000	5,000	3,000	3,000	5,000	3,000	3,000	33,000	0,204
D3	7,000	0,333	1,000	7,000	3,000	3,000	5,000	5,000	3,000	34,333	0,212
D4	0,500	0,200	0,143	1,000	0,200	0,333	3,000	3,000	0,200	8,576	0,053
D5	3,000	0,333	0,333	5,000	1,000	3,000	3,000	5,000	3,000	23,667	0,146
D6	3,000	0,333	0,333	3,000	0,333	1,000	5,000	5,000	3,000	21,000	0,130
D7	3,000	0,200	0,200	0,333	0,333	0,200	1,000	3,000	0,200	8,467	0,052
D8	3,000	0,333	0,200	0,333	0,200	0,200	0,333	1,000	0,200	5,800	0,036
D9	5,000	0,333	0,333	5,000	0,333	0,333	5,000	5,000	1,000	22,333	0,138
										161,995	1,000

Anexo 2: Cálculo EES

{Datos}

{t = 1}

epsilon_Vi = 0,94 {-}{@90°C} "Emisividad del vidrio"

epsilon_Ted = 0,9 {-} "Emisividad del Tedlar"

sigma = 5,67E-8 {W/m^2*K4}

t_Vi = 4 / 1000 {m} "Espesor del vidrio"

k_Vi = 1,8 {W/mK} "Conductividad del vidrio"

t_EVA = 0,5 / 1000 {m} "Espesor del EVA"

k_EVA = 0,35 {W/mK} "Conductividad del EVA"

t_Si = 0,23 / 1000 {m} "Espesor del Silicio"

k_Si = 148 {W/mK} "Conductividad del Silicio"

t_Ted = 0,1 / 1000 {m} "Espesor del Tedlar"

k_Ted = 0,2 {W/mK} "Conductividad del Tedlar"

{Panel}

A_panel = 72*0,156*0,156 {m2} "Área del panel"

P_STC = 315 {W} "Potencia nominal del panel en STC"

$\gamma = -0,41$ {%/K} "Coeficiente de temperatura de la potencia"

$h_{conv_1} = 20$ {W/m²*K} "Coeficiente convección con el aire cara superior"

{ $h_{conv_2} = 20$ {W/m²*K}} "Coeficiente convección con el aire cara inferior"

$P_{STC_unitaria} = P_{STC} / A_{panel}$ {W/m²} "Potencia por m² en STC"

{Condiciones STC}

$Irr_{STC} = 1000$ {W/m²} "Irradiancia en STC"

$T_{celda_STC} = 25+273,15$ {K} "Temperatura de celda en STC"

$\eta_{modulo} = 16,23$ {%} "Eficiencia del módulo en STC"

$\eta_{calculada} = \eta_{modulo} * (1 + \gamma_{eficiencia} * (T_{Celda} - T_{celda_STC}))$

$\gamma_{eficiencia} = -0,004$

{Condiciones meteorológicas}{variables}

$\{E_{in} = 1000\}$ $\{Wh/m^2/dia\}$ "Irradiancia variable"
 $\{T_{amb} = 25+273,15\}$ $\{K\}$ "Temperatura ambiente variable"
 $T_{inf} = T_{amb}$ $\{K\}$ "Temperatura en el infinito"

 $U_{inf} = 6$ $\{m/s\}$ "Velocidad del viento variable"

 $E_{panel} = E_{elec} * A_{panel}$ $\{Wh/dia\}$ "Potencia eléctrica del módulo"

 {Cálculo}

 $E_{in} = E_{out}$ $\{Wh/m^2/dia\}$ "Balance energía"
 $E_{out} = E_{conv} + E_{rad} + E_{elec}$ $\{Wh/m^2/dia\}$ "Flujo de calor de salida total"
 $E_{cond} = E_{in} - E_{conv_1} - E_{rad_1}$ $\{Wh/m^2/dia\}$ "Flujo de calor por conducción"
 $E_{disp} = E_{in} - E_{elec} - E_{conv_1} - E_{rad_1}$ $\{Wh/m^2/dia\}$ "Flujo de calor de salida por cara posterior"

 $E_{conv} = E_{conv_1} + E_{conv_2}$ $\{Wh/m^2/dia\}$ "Flujo de calor de salida por convección total"
 $E_{rad} = E_{rad_1} + E_{rad_2}$ $\{Wh/m^2/dia\}$ "Flujo de calor de salida por radiación total"

$E_{conv_1} = (T_{s_1} - T_{inf}) / R_{conv_1}$ {Wh/m2/dia} "Flujo de calor de salida por convección por cara superior"

$E_{conv_2} = (T_{s_2} - T_{inf}) / R_{conv_2}$ {Wh/m2/dia} "Flujo de calor de salida por convección por cara inferior"

$E_{rad_1} = (T_{s_1} - T_{inf}) / R_{rad_1}$ {Wh/m2/dia} "Flujo de calor de salida por radiación por cara superior"

$E_{rad_2} = (T_{s_2} - T_{inf}) / R_{rad_2}$ {Wh/m2/dia} "Flujo de calor de salida por radiación por cara inferior"

$E_{elec} = (Eta_calculada/100) * E_{in}$ {Wh/m2/dia} "Potencia eléctrica unitaria en condiciones variables"

$R_{conv_1} = 1 / (h_{conv_1})$ {m2*dia/Wh} "Resistencia por convección cara superior"

$R_{conv_2} = 1 / (h_{conv_2})$ {m2*dia/Wh} "Resistencia por convección cara inferior"

$R_{rad_1} = 1 / (h_{rad_1})$ {m2*dia/Wh} "Resistencia por radiación cara superior"

$R_{rad_2} = 1 / (h_{rad_2})$ {m2*dia/Wh} "Resistencia por radiación cara inferior"

$h_{rad_1} = \epsilon_{Vi} * \sigma * (T_{s_1}^2 - T_{inf}^2) * (T_{s_1} - T_{inf})$ {m2*dia/Wh} "Coeficiente de radiación en cara superior"

$$h_{rad_2} = \epsilon_{Ted} * \sigma * (T_{s_2}^2 - T_{inf}^2) * (T_{s_2} - T_{inf})$$

{m2*dia/Wh} "Coeficiente de radiación en cara inferior"

$$E_{cond} = (T_{s_1} - T_{s_2}) / R_{cond_panel}$$

{Wh/m2/dia} "Flujo de calor por conducción entre caras"

$$R_{cond_panel} = R_{cond_Vi} + R_{cond_EVA} + R_{cond_Si} + R_{cond_Ted}$$

{m2*dia/Wh} "Resistencia equivalente total"

$$R_{cond_Vi} = t_{Vi} / (k_{Vi})$$

{m2*dia/Wh} "Resistencia por conducción en vidrio"

$$R_{cond_EVA} = t_{EVA} / (k_{EVA})$$

{m2*dia/Wh} "Resistencia por conducción en EVA"

$$R_{cond_Si} = t_{Si} / (k_{Si})$$

{m2*dia/Wh} "Resistencia por conducción en Silicio"

$$R_{cond_Ted} = t_{Ted} / (k_{Ted})$$

{m2*dia/Wh} "Resistencia por conducción en Tedlar"

$$\{R_{cond_espuma} = t_{esp} / (k_{esp})$$

$$t_{esp} = 500/1000$$

$$k_{esp} = 205\}$$

$$E_{cond} = (T_{s_1} - T_{Celda}) / R_{cond_hastacelda}$$

{Wh/m2/dia} "Flujo de calor por conducción de cara superior hasta centro de celda"

$$R_{\text{cond_hastacelda}} = R_{\text{cond_Vi}} + R_{\text{cond_EVA}/2} + R_{\text{cond_Si}/2}$$

{m2*dia/Wh} "Resistencia por conducción hasta centro de celda"

$$T_{\text{amb_C}} = T_{\text{amb}} - 273,15 \quad \{^{\circ}\text{C}\} \quad \text{"Temperaturas en } ^{\circ}\text{C"}$$

$$T_{\text{s_1_C}} = T_{\text{s_1}} - 273,15 \quad \{^{\circ}\text{C}\}$$

$$T_{\text{s_2_C}} = T_{\text{s_2}} - 273,15 \quad \{^{\circ}\text{C}\}$$

$$T_{\text{celda_C}} = T_{\text{celda}} - 273,15 \quad \{^{\circ}\text{C}\}$$

{Energía disponible}

Anexo 3: Resultados software EES en comparación con medición experimental.

Caso 1: Medición con software EES sin considerar sistema de enfriamiento.

Unit Settings: SI K kPa J mass deg

$A_{panel} = 1,752 \text{ [m}^2\text{]}$	$Costo_{elec} = 8915 \text{ [USD/m}^2\text{]}$	
$\varepsilon_{Vi} = 0,94 \text{ [-]}$	$\eta = 0,85$	
$\eta_{modulo} = 16,23 \text{ [%]}$	$E_{cond} = 874,5 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	
$E_{disp} = 736,5 \text{ [Wh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{disp,anual} = 268819 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$	
$E_{panel} = 241,8 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{rad} = 5,334 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	
$\gamma_{eficiencia} = -0,004$	$h_{conv,1} = 2,721 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	
$Irr_{STC} = 1000 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$	$k_{EVA} = 0,35 \text{ [W/m-K]}$	
$Precio_{elec} = 32,5 \text{ [USD/MWh]}$	$Precio_{gas} = 16,93 \text{ [USD/10}^6 \text{ Btu]}$	
$P_{STC,unitaria} = 179,8 \text{ [W/m}^2\text{]}$	$Q = 18037 \text{ [l/h]}$	
$R_{cond,panel} = 0,004152 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	$R_{cond,si} = 0,00001554 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	
$R_{conv,2} = 0,05634 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	$R_{rad,1} = 14,68 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	
$T_{amb,C} = 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_{Celda} = 335,6 \text{ [K]}$	
$t_{EVA} = 0,0005 \text{ [m]}$	$T_{inf} = 293,2 \text{ [K]}$	
$T_{s,1} = 338,2 \text{ [K]}$	$T_{s,1,C} = 65 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	
$t_{Vi} = 0,004 \text{ [m]}$	$U_{inf} = 6 \text{ [m/s]}$	
$Costo_{gas} = 16524 \text{ [USD/m}^2\text{]}$	$C_p = 4183$	$\varepsilon_{Ted} = 0,9 \text{ [-]}$
$\eta_{calculada} = 13,8$	$\eta_{calent,elec} = 0,98$	$\eta_{calent,gas} = 0,94$
$E_{conv} = 856,7 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{conv,1} = 122,4 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{conv,2} = 734,2 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$
$E_{elec} = 138 \text{ [Wh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{in} = 1000 \text{ [Wh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{out} = 1000 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$
$E_{rad,1} = 3,066 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{rad,2} = 2,268 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$\gamma = -0,41 \text{ [1/K]}$
$h_{conv,2} = 17,75 \text{ [W/m}^2\text{K]}$	$h_{rad,1} = 0,06814 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	$h_{rad,2} = 0,05482 \text{ [m}^2\text{/dia/Wh]}$
$k_{Si} = 148 \text{ [W/m-K]}$	$k_{Ted} = 0,2 \text{ [W/m-K]}$	$k_{Vi} = 1,8 \text{ [W/m-K]}$
$P_1 = 101,3 \text{ [kPa]}$	$P_{atm} = 101,3 \text{ [kPa]}$	$P_{STC} = 315 \text{ [W]}$
$\rho = 995,7$	$R_{cond,EVA} = 0,001429 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	$R_{cond,hastacelda} = 0,002937 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$
$R_{cond,Ted} = 0,0005 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	$R_{cond,Vi} = 0,002222 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	$R_{conv,1} = 0,3675 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$
$R_{rad,2} = 18,24 \text{ [m}^2\text{/dia/kWh]}$	$\sigma = 5,670E-08 \text{ [W/m}^2\text{-K}^4\text{]}$	$T_{amb} = 293,2 \text{ [K]}$
$T_{celda,C} = 62,43 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_{celda,STC} = 298,2 \text{ [K]}$	$T_{entrada} = 288,2$
$t_{Mad} = 0,01$	$T_{requerida} = 318,2$	$t_{Si} = 0,00023 \text{ [m]}$
$T_{s,2} = 334,5 \text{ [K]}$	$T_{s,2,C} = 61,37 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$t_{Ted} = 0,0001 \text{ [m]}$

Figura 46: Datos entregados por el software EES.

Caso 2: Medición con software EES considerando sistema de enfriamiento.

Unit Settings: SI K kPa J mass deg

$A_{panel} = 1,752 \text{ [m}^2\text{]}$	$Costo_{elec} = 8633 \text{ [USD/m}^2\text{]}$	
$\varepsilon_{VI} = 0,94 \text{ [-]}$	$\eta_1 = 0,85$	
$\eta_{modulo} = 16,23 \text{ [%]}$	$E_{cond} = 844,7 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	
$E_{disp} = 713,2 \text{ [Wh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{disp,anual} = 260321 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$	
$E_{panel} = 230,3 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{rad} = 5,96 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	
$\gamma_{eficiencia} = -0,004$	$h_{conv,1} = 2,721 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$	
$Irr_{STC} = 1000 \text{ [kWh/m}^2\text{]}$	$k_{EVA} = 0,35 \text{ [W/m-K]}$	
$k_{VI} = 1,8 \text{ [W/m-K]}$	$Precio_{elec} = 32,5 \text{ [USD/MWh]}$	
$P_{STC} = 315 \text{ [W]}$	$P_{STC,unitaria} = 179,8 \text{ [W/m}^2\text{]}$	
$R_{cond,hastacelda} = 0,002937 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$	$R_{cond,Mad} = 0,0365$	
$R_{cond,VI} = 0,002222 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$	$R_{conv,1} = 0,3675 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$	
$\sigma = 5,670E-08 \text{ [W/m}^2\text{-K}^4\text{]}$	$T_{amb} = 293,2 \text{ [K]}$	
$T_{celda,STC} = 298,2 \text{ [K]}$	$T_{entrada} = 288,2$	
$T_{requerida} = 318,2$	$t_{SI} = 0,00023 \text{ [m]}$	
$T_{s,2,C} = 40,67 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$t_{Ted} = 0,0001 \text{ [m]}$	
$Costo_{gas} = 16002 \text{ [USD/m}^2\text{]}$	$C_p = 4183$	$\varepsilon_{Ted} = 0,9 \text{ [-]}$
$\eta_{calculada} = 13,15$	$\eta_{calent,elec} = 0,98$	$\eta_{calent,gas} = 0,94$
$E_{conv} = 862,6 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{conv,1} = 149,7 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{conv,2} = 712,9 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$
$E_{elec} = 131,5 \text{ [Wh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{in} = 1000 \text{ [Wh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{out} = 1000 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$
$E_{rad,1} = 5,687 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$E_{rad,2} = 0,2734 \text{ [kWh/m}^2\text{/dia]}$	$\gamma = -0,41 \text{ [1/K]}$
$h_{conv,2} = 34,5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$	$h_{rad,1} = 0,1034 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$	$h_{rad,2} = 0,01323 \text{ [m}^2\text{*dia/Wh]}$
$k_{Mad} = 0,274$	$k_{SI} = 148 \text{ [W/m-K]}$	$k_{Ted} = 0,2 \text{ [W/m-K]}$
$Precio_{gas} = 16,93 \text{ [USD/10}^6\text{ Btu]}$	$P_1 = 101,3 \text{ [kPa]}$	$P_{atm} = 101,3 \text{ [kPa]}$
$Q = 17467 \text{ [l/h]}$	$\rho = 995,7$	$R_{cond,EVA} = 0,001429 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$
$R_{cond,panel} = 0,04065 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$	$R_{cond,SI} = 0,000001554 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$	$R_{cond,Ted} = 0,0005 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$
$R_{conv,2} = 0,02899 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$	$R_{rad,1} = 9,672 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$	$R_{rad,2} = 75,6 \text{ [m}^2\text{*dia/kWh]}$
$T_{amb,C} = 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_{celda} = 345,7 \text{ [K]}$	$T_{celda,C} = 72,52 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$
$t_{EVA} = 0,0005 \text{ [m]}$	$T_{inf} = 293,2 \text{ [K]}$	$t_{Mad} = 0,01$
$T_{s,1} = 348,2 \text{ [K]}$	$T_{s,1,C} = 75 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_{s,2} = 313,8 \text{ [K]}$
$t_{VI} = 0,004 \text{ [m]}$	$U_{inf} = 6 \text{ [m/s]}$	

Figura 47: Datos entregados por el software EES.

Caso 2: Resultado del cálculo de coeficiente de convección para soplador

Unit Settings: SI K kPa J mass deg

$Area_{panel} = 2$	$A_{panel} = 1$	$h = 44,25$
$k = 0,02699$	$L_{panel} = 2$	$\nu = 3279$
$Pr = 0,7241$	$Re_{cr} = 500000$	$Re_l = 2,286E+06$
$ro = 1,109$	$t_f = 45$	$t_{inf} = 20$
$t_s = 70$	$vis = 0,0000175$	$v_{viento} = 20$

No unit problems were detected.

Calculation time = ,0 sec.

Figura 48: Cálculo de coeficiente de convección para velocidad de 20 m/s

Anexo 4: Pruebas experimentales simulador solar.

Panel de 10 Wp

- Panel 10 Wp
- Cantidad de soquetes: 1
- Sin foco reflectante
- Potencia 1: 150 W

Tabla 22: Medición 1 de potencia panel 10 Wp

distancia [mm]	30	15	0
voc [V]=	16,6	16,9	16,6
isc [A]=	0,008	0,11	0,008
vmpp [V]=	12,2	12,6	12,2
impp[A]=	0,08	0,1	0,08
pmpp[Wp]=	1	1	1

- Potencia 2: 300 W

Tabla 23: Medición 2 de potencia panel 10 Wp

distancia [mm]	30	15	0
voc [V]=	18,8	19,1	18,9
isc [A]=	0,26	0,3	0,13
vmpp [V]=	14,7	14,9	16,9
impp[A]=	0,22	0,27	0,08
pmpp[Wp]=	3	4	1

- Potencia 3: 500 W

Tabla 24: Medición 3 de potencia panel 10 Wp

distancia [mm]	30	15	0
voc [V]=	19,4	19,4	19,4
isc [A]=	0,43	0,5	0,43
vmpp [V]=	15	15,2	15
impp[A]=	0,4	0,45	0,4
pmpp[Wp]=	6	7	6

- Panel 10 Wp
- Cantidad de soquetes: 1
- Con foco reflectante
- Potencia 1: 150 W

Tabla 25: Medición 4 de potencia panel 10 Wp.

distancia [mm]	30	15
voc [V]=	19,5	19,7
isc [A]=	0,73	0,8
vmpp [V]=	14,7	15,8
impp[A]=	0,78	0,79
pmpp[Wp]=	11	12

- Panel de 75Wp
- Módulo de 75Wp
- Cantidad de soquetes: 6

- Con aluminio reflectante en todas sus caras.
- Potencia de cada halógeno: 300 W

Tabla 26: Medición 1 de potencia panel 75 Wp

distancia [mm]	30	15	0
voc [V]=	21,9	21,7	21,8
isc [A]=	2,64	2,68	2,35
vmpp [V]=	18,9	19	19,5
impp[A]=	2,61	2,56	2,33
pmpp[Wp]=	49	49	45

- Módulo de 75Wp
- Cantidad de soquetes: 4
- Con aluminio reflectante en todas sus caras.
- Potencia de cada halógeno: 500 W

Tabla 27: Medición 2 de potencia panel 75 Wp.

distancia [mm]	30
voc [V]=	22,1
isc [A]=	3,07
vmpp [V]=	18,4
impp[A]=	2,73
pmpp[Wp]=	50

*Se hizo sólo la medición en la distancia óptima encontrada en los ensayos anteriores

- Módulo de 75Wp

- Cantidad de soquetes: 6
- Con aluminio reflectante en todas sus caras.
- Potencia de cada halógeno: 4 de 300 W y 2 de 500 W

Tabla 28: Medición 3 de potencia panel 75 Wp

distancia [mm]	30
voc [V]=	22,1
isc [A]=	3,06
vmpp [V]=	18,8
impp[A]=	3,07
pmpp[Wp]=	58

*Se hizo sólo la medición en la distancia óptima encontrada en los ensayos anteriores

Pruebas de irradiancia

- Potencia de cada halógeno: 4 de 500 W.
- Módulo de 75Wp
- Cantidad de soquetes: 4
- Con aluminio reflectante en todas sus caras.
- Separación de 45 [mm] desde el módulo FV a los halógenos.

Tabla 29: Medición 1 de irradiancia de potencia panel 75 Wp

centro [W/m ²]	760	764
Orilla [W/m ²]	932	890
orilla sin tapa [W/m ²]	729	730
centro orilla con tapa [W/m ²]	780	822
centro orilla sin tapa [W/m ²]	806	805

- Separación de 30 [mm] desde el módulo FV a los halógenos.

Tabla 30: Medición 2 de irradiancia de potencia panel 75 Wp.

centro [W/m ²]	497	498
Orilla [W/m ²]	1192	1196
orilla sin tapa [W/m ²]	1176	1187
centro orilla con tapa [W/m ²]	928	884
centro orilla sin tapa [W/m ²]	892	937

- Potencia de cada halógeno: 4 de 300 W.
- Módulo de 75Wp
- Cantidad de soquetes: 4
- Con aluminio reflectante en todas sus caras.
- Separación de 45 [mm] desde el módulo FV a los halógenos.

Tabla 31: Medición 3 de irradiancia de potencia panel 75 Wp

centro [W/m ²]	483	486
Orilla [W/m ²]	376	349
orilla sin tapa [W/m ²]	361	379
centro orilla con tapa [W/m ²]	515	556
centro orilla sin tapa [W/m ²]	543	541

- Separación de 30 [mm] desde el módulo FV a los halógenos.

Tabla 32: Medición 4 de irradiancia de potencia panel 75 Wp

centro [W/m ²]	360	357
Orilla [W/m ²]	1007	962

orilla sin tapa [W/m ²]	1023	971
centro orilla con tapa [W/m ²]	624	659
centro orilla sin tapa [W/m ²]	629	625

Anexo 5: Distribución de halógenos escogida.

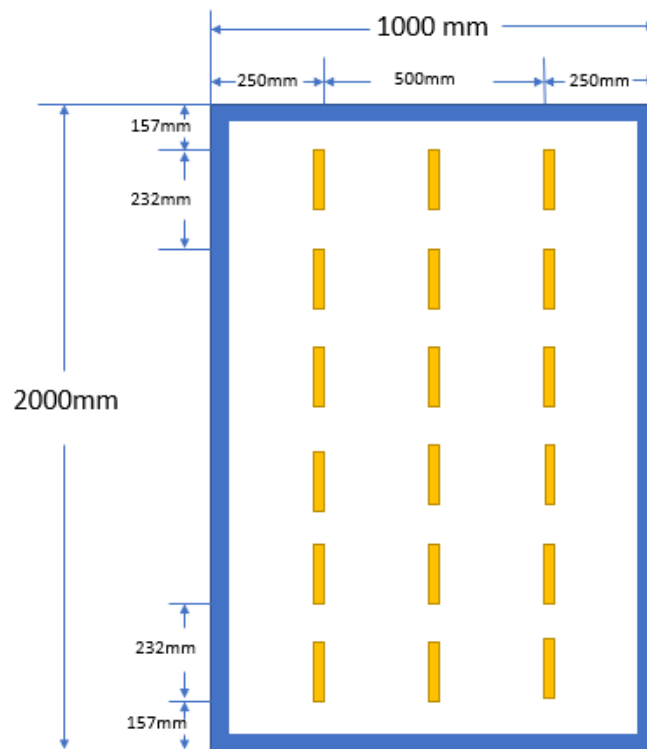


Figura 49: Distribución óptima de halógenos en módulos de 320 [W]

Anexo 6: Procedimiento de construcción del simulador solar

A continuación, el procedimiento se detalla paso a paso:

- Paso 1

Se miden y cortan los perfiles en función a las dimensiones mostradas en los planos generados por el software *Autodesk Inventor*. (Se debe recordar la correcta utilización de los EPP, que son overol, guantes, lentes, zapatos y orejeras de seguridad).



Figura 50: Imagen de metalcon y epp utilizados

- Paso 2

Se construye la base del equipo, la que consta de 4 perfiles C de 1200 [mm] y 2 perfiles u de 1200 [mm]. Los perfiles C van unidos por dentro de los perfiles u, como se aprecia en la figura 10. El esqueleto de la base queda como se aprecia en la figura 11. Luego, se pone una plancha de 3 mm de acero galvanizado en la parte superior para entregarle firmeza. Para finalizar, se le ponen ruedas en cada esquina.



Figura 51: Unión utilizada entre perfil c y u.



Figura 52: Imagen de base y ruedas construida.

- Paso 3

Se arma la estructura que se une a la base, la que está compuesta por 4 perfiles C de 2025 [mm], 2 perfiles U de 1200 [mm] y 2 perfiles U de 1018, además, se cortan 2 perfiles U de 100 [mm] para realizar uniones con los perfiles C. Al igual que en la base, se encajan los perfiles C dentro de los U y se aprietan mediante pernos autoperforantes o remaches. Además, se ponen las bisagras y se monta el soporte donde se cuelga el panel. Posteriormente se forra completamente con aluminio. El resultado es el siguiente:



Figura 53: Imagen de módulo fv montado en la estructura construida.

- Paso 4

Se procede a armar la puerta, que contendrá los halógenos. Se compone de 6 perfiles C de 2052 [mm], 4 perfiles C de 1018 [mm] y 4 perfiles u de 490 [mm]. Posteriormente se forra completamente con aluminio.



Figura 54: Imagen de la puerta del simulador construida.

- Paso 5

Para finalizar, la puerta y la estructura donde va el módulo fotovoltaico se refuerzan por medio de tensores de acero.



Figura 55: Imagen de tensores de acero.

- Paso 6

Se instalan los soquetes de luces de halógeno en la puerta, según la distribución escogida anteriormente.



Figura 56: Imagen de soquetes instalados en la puerta del simulador.