



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelado de un panel fotovoltaico-térmico (PV/T) basado en
paneles flexibles de película delgada (thin-film)*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Juan Carlos Crespo Gómez

DIRECTORES: Carlos Ulloa Sande
Guillermo Rey González

CURSO ACADÉMICO: 2017-2018

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelado de un panel fotovoltaico-térmico (PV/T) basado en
paneles flexibles de película delgada (thin-film)*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

En el ejército, como en cualquier otro ámbito, se es consciente de la necesidad de implementación de energías renovables. Reduciendo el consumo energético en las bases, se obtienen tres consecuencias inmediatas: La primera, el beneficio económico debido a la reducción del coste que supone dicha implementación. En segundo lugar, esta reducción de consumo lleva consigo un decremento de las emisiones, con el consecuente beneficio al medio ambiente. Por último, existe también un beneficio estratégico relacionado con la reducción de suministros energéticos, ya que cuanto más bajo sea este consumo, menor transporte hará falta para los mismos, reduciendo riesgos operacionales.

En el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se utilizan herramientas de simulación de sistemas energéticos (Trnsys®) para crear un modelo que nos permita predecir el desempeño de un panel fotovoltaico-térmico basado en panel flexible de película delgada en diferentes condiciones climatológicas.

La principal ventaja de este tipo de paneles se fundamenta en su sencilla portabilidad, lo que los hace idóneos para ser utilizados para atender ciertas demandas térmicas. Por ejemplo, las necesarias para la climatización de las tiendas de campaña de Infantería de Marina en sus despliegues.

El modelo, basado en la introducción del concepto de masa inercial como aproximación al comportamiento real del panel, ha sido validado a través de la comparación de datos obtenidos tras la simulación del modelo en Trnsys®, con los datos experimentales procedentes de la estación meteorológica de la AEMET, situada en la ENM, y los ensayos realizados sobre un banco de pruebas implementado por los directores del TFG.

La buena aproximación de los datos experimentales y simulados hace que el modelo propuesto pueda ser empleado para la predicción del comportamiento del panel fotovoltaico térmico. Futuros trabajos podrían ir orientados hacia el estudio de la idoneidad del sistema en diferentes emplazamientos, lo que permitiría analizar su viabilidad para su implementación en los despliegues de Infantería de Marina.

PALABRAS CLAVE

PV-T, modelo térmico, masa inercial, validación experimental, Trnsys®

AGRADECIMIENTOS

A mi abuelo Gabriel.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.1.1 Definición del problema	7
1.2 Objetivos	8
2 Estado del arte	9
2.1 Fuentes de Energía	9
2.1.1 Fuentes de Energía no Renovables	9
2.1.2 Fuentes de Energía Renovables	9
2.2 Panel fotovoltaico	13
2.2.1 Paneles flexibles de película delgada y estudios anteriores.....	14
2.3 Panel solar Fotovoltaiico-Térmico (PV/T).....	16
2.3.1 Clasificación de los paneles PV/T	17
2.4 Sistemas concentrados	20
2.5 Simulación Térmica	20
2.5.1 TRNSYS17®	20
2.5.2 Simulaciones en Trnsys®	21
3 Metodología.....	25
3.1 Conceptos previos	25
3.1.1 Punto de vista térmico	25
3.2 Simulación térmica	29
3.2.1 Resumen	29
3.2.2 Datos empleados.....	30
3.2.3 Definición de types	30
3.2.4 Lay-out y conexiones.....	37
3.2.5 Run Simulation	41
4 Resultados	43
4.1 Comparación de datos mediante Trnsys	43
4.1.1 Temperatura de salida simulada frente a la experimentada.....	43
4.1.2 Temperatura de entrada frente a temperatura de salida	44
4.1.3 Temperatura de salida frente a la temperatura de la masa inercial.....	45

4.1.4 Análisis HG2 frente a temperatura de salida	46
4.2 Comparación de datos mediante Excel®	47
4.2.1 Estimación del error en la simulación	47
5 Conclusiones y líneas futuras	49
5.1 Conclusiones	49
5.2 Líneas futuras	49
6 Bibliografía.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Modelo instalado en la Escuela Naval Militar [1]	8
Figura 2-1 Central de trigeneración con biomasa y energía solar para uso industrial en la fábrica de L'Oréal en Burgos [3]	10
Figura 2-2 Funcionamiento de una instalación solar térmica [5]	11
Figura 2-3 Paneles Fotovoltaicos [6]	11
Figura 2-4 Mapa de radiación solar en Europa [7]	12
Figura 2-5 Ejemplo de irradiancias global, directa y difusa en Galicia [10]	13
Figura 2-6 Tipos de paneles fotovoltaicos comerciales [12]	14
Figura 2-7 Ejemplo de panel fotovoltaico de capa delgada flexible [14]	15
Figura 2-8 Nano satélite con celdas solares [15]	15
Figura 2-9 Lona fotovoltaica [16]	16
Figura 2-10 Principio de funcionamiento de los módulos híbridos termo fotovoltaicos [17]	16
Figura 2-11 Diferencia de un panel híbrido con tecnología CTA [19]	17
Figura 2-12 Colector continuo en espiral [18]	18
Figura 2-13 Una de las configuraciones de <i>Hegazy</i> para colector de fluido gaseoso [18]	18
Figura 2-14 PV/T en fachada refrigerado por aire [18]	19
Figura 2-15 Reflector parabólico y lente concentradora [18]	19
Figura 2-16 Comportamiento de elementos como sistemas concentrados	20
Figura 2-17 Logotipos de las herramientas informáticas a utilizar	21
Figura 2-18 Diseño geométrico de un contenedor mediante <i>Google SketchUp®</i> [22]	21
Figura 2-19 Ejemplo resultados en hoja de cálculo <i>Excel®</i> (Puerto Príncipe) [22]	22
Figura 2-20 Modelo TRNSYS con colector PV/T [23]	22
Figura 2-21 Contenedor modelado en <i>TRNSYS3D</i> [24]	23
Figura 3-1 Esquema conceptual de la idea a implantar	25
Figura 3-2 Esquema de las pérdidas en el sistema	26
Figura 3-3 Cálculo del flujo másico para sección circular	26
Figura 3-4 Esquema <i>lay-out</i> para la simulación	29
Figura 3-5 Ventana de presentación de <i>Simulation Studio</i>	31
Figura 3-6 Elemento de la masa inercial “Lump” en Trnsys	31
Figura 3-7 Parámetros a introducir en la masa inercial en Trnsys	31
Figura 3-8 Entradas de la masa inercial en Trnsys	32
Figura 3-9 Cómo insertar una ecuación y presentación en pantalla	32
Figura 3-10 Ejemplo de definición de entradas en una ecuación	33
Figura 3-11 Ejemplo de incidencia “G” y descomposición	34

Figura 3-12 Cómo insertar archivo meteorológico TMY.....	35
Figura 3-13 Cómo introducir un plotter en Trnsys.....	36
Figura 3-14 Ejemplo entrada de dos temperaturas y representación gráfica	36
Figura 3-15 Ejemplo de cómo activar la simulación en Trnsys	37
Figura 3-16 Lay-out final	38
Figura 3-17 Salidas del archivo meteorológico implantado.....	38
Figura 3-18 Parámetros a modificar en Trnsys del archivo implantado	39
Figura 3-19 Esquema de cómo llegar a la temperatura de salida a través del lay-out	39
Figura 3-20 Aviso de <i>trnsys</i> ante un error recursivo.....	40
Figura 3-21 Type para evitar el error recursivo.....	41
Figura 4-1 Gráfica comparativa entre temperatura de salida real y simulada.....	43
Figura 4-2 Temperatura de salida simulada frente a la de entrada.....	44
Figura 4-3 Gráfica de T^a_{out} simulada, T^a_{masa} inercial y T^a_{in}	45
Figura 4-4 Radiación recibida y HG1	46
Figura 4-5 HG2 frente a la temperatura de salida	46
Figura 4-6 Cálculo de estimadores de error	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas de los diferentes paneles fotovoltaicos [12] [13].....	14
Tabla 2-2 Ejemplo de resultados de una simulación para Vigo [24]	23
Tabla 3-1 Valor de los parámetros Heat Gain 1	34
Tabla 3-2 Parámetros para obtener la velocidad de transferencia de calor	40
Tabla 4-1 Máximos de temperatura de salida simulada e incremento	44
Tabla 4-2 Medias del incremento de temperatura según el periodo de muestreo	45
Tabla 4-3 Temperatura de salida simulada frente a la real mediante Excel	47
Tabla 4-4 Valores característicos de la muestra	48

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En un mundo cada vez más adentrado en métodos para predecir el funcionamiento de sistemas antes de su puesta en marcha, la ingeniería térmica no se queda atrás. Estos métodos, mediante simulaciones de diversa índole, tratan de responder de la manera más exacta posible al futuro comportamiento tanto de elementos físicos –instalaciones por ejemplo- como intangibles –demanda de un producto basada en la experiencia anterior-. Estas simulaciones no sólo se realizan sin más coste que el de personal y los derechos del software en cuestión, que incluso puede llegar a ser gratuito, sino que además se llevan a cabo en la propia oficina, por lo que no hace falta viajar físicamente para comprobar el funcionamiento.

Por otro lado, no se debe olvidar que las simulaciones son, como su propio nombre indica, un intento de aproximación a la realidad. Dicho ésto, se debe ser consciente de las posibles variaciones que se tendrá a la hora de desarrollar el producto en la vida real. Y seguro que las habrá, pues como se suele afirmar ante estos métodos de cálculo: nada ocurre como se planea.

No obstante, el ahorro de tiempo que se nos ofrece mediante un software, así como el reducido coste y los pequeños errores que aceptamos a cambio de ellos, hacen del mismo una herramienta fundamental hoy en día en todos los ámbitos. Es más, a través de una rápida simulación se podría llegar a descartar una idea, o darse cuenta de que algo no va a funcionar como pensábamos.

Expuesto lo anterior, en el presente trabajo se llevará a cabo una simulación, encuadrada en el ámbito de la transferencia de calor.

1.1.1 Definición del problema

El fundamento del presente trabajo se basa en la validación de un panel que actúe como método de calefacción. Concretamente, la idea que lo impulsó fue la de analizar el comportamiento del mismo dentro de las tiendas de campaña empleadas por los alumnos de Infantería de Marina. De esta manera, a través de un acople, se introduciría el aire de salida del sistema a estudiar (hipotéticamente a mayor temperatura que el de entrada) a la tienda. Las demandas térmicas de dicho objeto fueron estudiadas por otro alumno de este centro mediante el mismo software que se utilizará en el presente trabajo, *Trnsys*®. Por lo tanto, tras lograr con éxito una simulación fiel con la realidad, se podrá comprobar cómo responde la tienda de campaña de acuerdo al incremento de temperatura que experimente.

Una vez conseguida esta tarea en un emplazamiento concreto, Marín en este caso (ubicado en Pontevedra, noroeste de España), se dispondrá de la seguridad suficiente como para predecir el

funcionamiento del mismo sistema en otros lugares a través de la simulación. Lo único que habrá que hacer será variar el archivo que contenga los datos meteorológicos.

Dicho lo cual, se dispone de una instalación solar fotovoltaica térmica en la Escuela Naval Militar, como muestra la Figura 1-1, a la cual se le integraron diversos sensores para la recogida de una serie de datos (temperaturas, velocidad del aire, etc) durante un periodo de tiempo. Algunos de estos datos serán necesarios para la posterior parametrización del sistema en *trnsys*, mientras que otros, como por ejemplo la temperatura del aire de salida registrada, servirán para comparar los resultados obtenidos. Resumiendo, mediante el software mencionado se tratará de modelar un sistema que atienda al comportamiento del panel instalado en la ENM, asumiendo un error en la simulación.



Figura 1-1 Modelo instalado en la Escuela Naval Militar [1]

1.2 Objetivos

Contenida en la introducción la idea general de este Trabajo de Fin de Grado, los objetivos del mismo quedan reflejados según los siguientes puntos:

Objetivo principal

-Crear un modelo digital, mediante *Trnsys*, del sistema fotovoltaico-térmico (PV-T) propuesto, que permita predecir su desempeño en situaciones climáticas diferentes. Para ello se establecerá un *lay-out* compuesto por diversos elementos ofrecidos por el software.

Objetivos secundarios

-Comprender el funcionamiento de la instalación en cuestión y desglosar las distintas ganancias/pérdidas ocurridas en la misma (radiación, convección, y cómo se dan en el sistema).

-Tras obtener la solución pertinente, exportar los datos a una hoja de cálculo *Excel*® y compararlos con los datos reales. Finalmente, se asumirá un error de cálculo a la simulación.

2 ESTADO DEL ARTE

En los sucesivos subapartados se asentarán los fundamentos teóricos en los que se basará el desarrollo del trabajo, tratando de ir desde lo general a lo concreto. Asimismo, se citarán los proyectos, investigaciones o sistemas que se han dado hasta la fecha en relación a nuestro título.

2.1 Fuentes de Energía

Bien es conocido por todos que existen dos clasificaciones en cuanto a las fuentes de energía: las no renovables y las que sí lo son. Las primeras, también denominadas fuentes convencionales o fósiles, hacen referencia a aquellas existentes de forma limitada en la naturaleza, como puede ser el petróleo. A día de hoy, se trata de la fuente de energía más utilizada, y esto tiene sus consecuencias: Para empezar, tardan muchos años en constituirse como tales (sirva de ejemplo el combustible fósil, originado a partir de la desintegración de organismos que habitaron el planeta hace millones de años); sin embargo, el ser humano las utiliza y agota a un ritmo creciente y no sostenible. Además, su combustión emite grandes cantidades de dióxido de carbono, entre otros gases contaminantes, a la atmósfera.

2.1.1 Fuentes de Energía no Renovables

Generalmente distinguimos tres grupos en este apartado: las fuentes de energía fósil, las fuentes de energía geotérmica, y la energía nuclear.

Fuentes de Energía Fósil: Derivan en el petróleo y sus derivados, en el gas natural y en el carbón mineral.

Energía Geotérmica: Extracción del calor del magma de la Tierra por medio de vapor. El proceso para la generación de electricidad no desarrolla una combustión.

Energía Nuclear: Al igual que el ejemplo anterior, tampoco involucra combustión alguna. Por el contrario, sí que produce otros derivados perjudiciales para el medio ambiente. Distinguimos dos procesos: Fisión y fusión. El primero consiste en la desintegración de átomos pesados, mientras que la fusión trata de obtener átomos de mayor tamaño.

Por los problemas que acarrea este tipo de fuente de energía (sobreexplotación y contaminación, principalmente), surge el segundo concepto mencionado: Fuentes de energía renovables, donde está encuadrado el presente trabajo.

2.1.2 Fuentes de Energía Renovables

A diferencia de las explicadas en el apartado anterior, estas fuentes de energía se caracterizan por la posibilidad de ser regeneradas una vez empleadas.

De acuerdo con la empresa española de promoción y gestión de infraestructuras y energías renovables “Acciona”, las energías renovables son fuentes de energía limpias cuyo crecimiento se está desarrollando de manera imparable, siendo imprescindibles para combatir el cambio climático [2].

La división que establece la misma fuente [2] es la siguiente:

- Eólica: Energía obtenida por acción del viento.
- Solar: Energía obtenida del Sol. Distinguimos la fotovoltaica y la térmica (explicadas en apartados posteriores).
- Hidráulica/hidroeléctrica: Energía obtenida de los ríos y corrientes de agua dulce.
- Biomasa/biogás: Energía obtenida de materia orgánica.
- Geotérmica: Energía calorífica del interior de la Tierra.
- Mareomotriz: Energía obtenida de las mareas.
- Undimotriz u olamotriz: Energía obtenida de las olas.
- Bioetanol: Combustible obtenido mediante procesos de fermentación de productos vegetales.
- Biodiésel: Combustible obtenido a partir de aceites vegetales.

En la Figura 2-1 se refleja un ejemplo de una construcción que emplea conjuntamente dos fuentes de energía mencionadas: biomasa y energía solar. De acuerdo al artículo emitido por la “Revista Técnica de Medio Ambiente (Retema)”: *“La central de trigeneración suministra el agua caliente y fría, vapor y electricidad utilizados en los procesos industriales de la Fábrica, y los paneles fotovoltaicos complementan el aporte eléctrico necesario para conseguir el objetivo marcado: ser neutros en emisiones de CO₂”* [3].



Figura 2-1 Central de trigeneración con biomasa y energía solar para uso industrial en la fábrica de L’Oréal en Burgos [3]

2.1.2.1 Energía Solar

Una vez visto los distintos tipos de fuentes de energía renovable existentes, nos vamos a centrar ahora en la energía solar, lo cual nos servirá a la hora de entender el posterior desarrollo del trabajo.

Como se dijo en el apartado anterior, de este tipo de energía cuelgan dos ramas: la térmica y la fotovoltaica.

- Energía Solar Térmica: Absorbe la energía del Sol y la transforma en calor. ¿Para qué? Deriva en varias aplicaciones, tales como calentar el agua de uso doméstico (comúnmente

conocido como “ACS”, o “Agua Caliente Sanitaria”) o para producción de energía mecánica y, a partir de ella, de energía eléctrica [4].

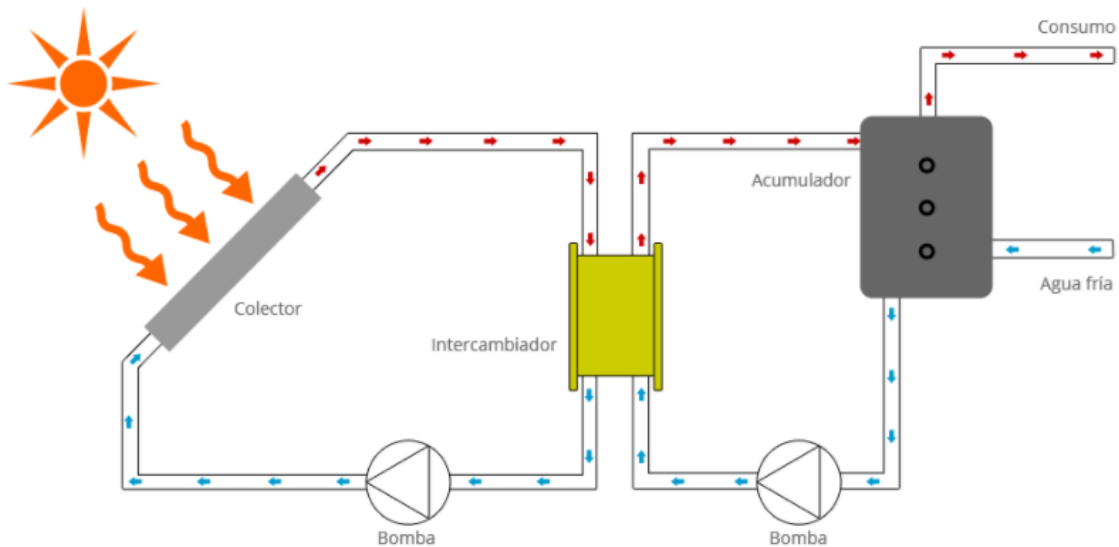


Figura 2-2 Funcionamiento de una instalación solar térmica [5]

Como se muestra en Figura 2-2, esta instalación no resulta compleja: el panel solar absorbe la energía del Sol en forma de calor. A través del mismo hacemos pasar agua, por lo que lógicamente se calentará y, haciendo pasar ésta por un intercambiador, conseguimos transferir de un fluido a otro parte de su calor. Éste último fluido es el que se llevará al punto de consumo en cuestión [5].

- Energía Solar Fotovoltaica: Se refiere a la energía obtenida mediante la transformación directa de la energía del Sol en energía eléctrica. Esta transformación se logra aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores a través de las células fotovoltaicas, las cuales funcionan como generadores de corriente al ser iluminadas por el Sol y al estar conectadas a una carga al mismo tiempo, en base a una diferencia de potencial [6].



Figura 2-3 Paneles Fotovoltaicos [6]

Cabe destacar que España posee un potencial enorme para la implantación de la energía solar, ya que la superficie de nuestro país recibe una elevada cantidad de radiación de este astro. Podemos percibir ésto ante un mapa de radiación solar, por ejemplo el europeo mostrado en la Figura 2-4:

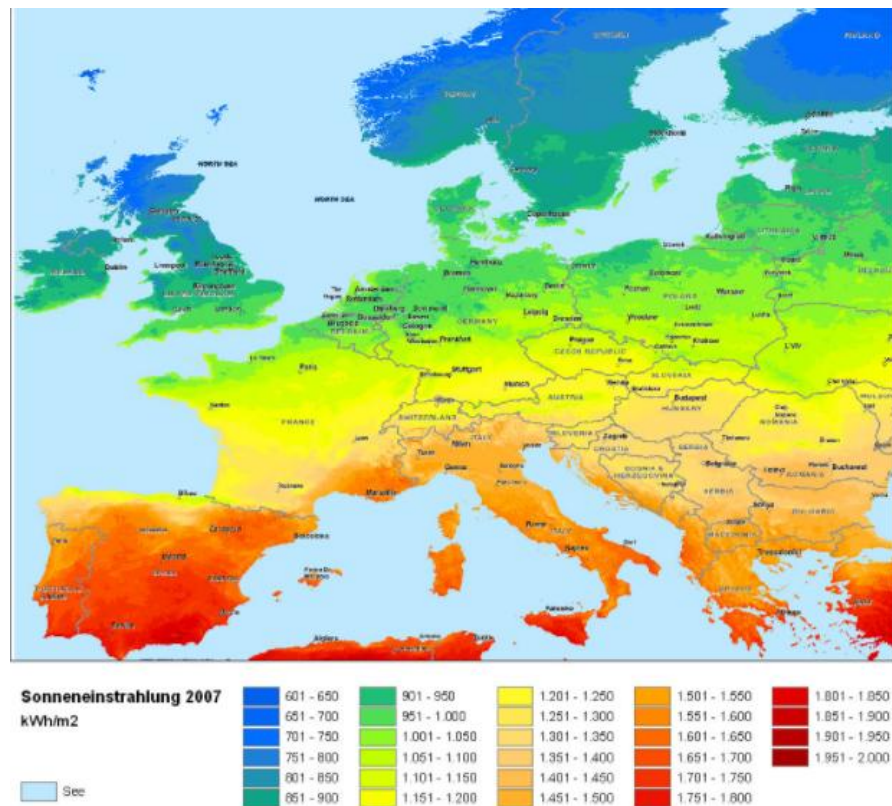


Figura 2-4 Mapa de radiación solar en Europa [7]

Siguiendo con lo que afirma el Instituto de Energía Solar: “En 2016, la fotovoltaica cubrió el 3% de la demanda eléctrica de España. En el momento en que se produjo el pico de demanda (13-14h del 6 de septiembre de 2016) la fotovoltaica representó el 7,2% de la generación” [8]. La misma fuente representa varios gráficos que dictan que el coste del kilovatio-hora producido con fotovoltaica ya compite con las otras fuentes de generación de energía tradicionales.

Para terminar con este subapartado, se procede a definir los tipos de irradiancia existentes: la global, la directa, la difusa y la reflejada. Como es lógico, la radiación solar varía según la hora del día, de estación a estación, y depende del ángulo de incidencia, entre otros parámetros.

Cuando hablamos de la radiación que recibe un metro cuadrado de superficie horizontal, hablamos de la global (que es igual a la suma de las otras mencionadas). La directa, como su nombre indica, es la que llega directamente del Sol. La radiación difusa es causa del efecto que se genera cuando la radiación solar se dispersa debido a las moléculas contenidas en la atmósfera. Por último, la radiación reflejada sería aquella reflejada por la superficie terrestre (se denomina “albedo” al coeficiente de reflexión de la superficie, del cual depende la cantidad de radiación). Se puede llegar a entender que la radiación directa se da cuando el Sol está visible, y que la radiación difusa es mucho mayor en invierno, siendo anualmente el equivalente al 55% de la global. [9].

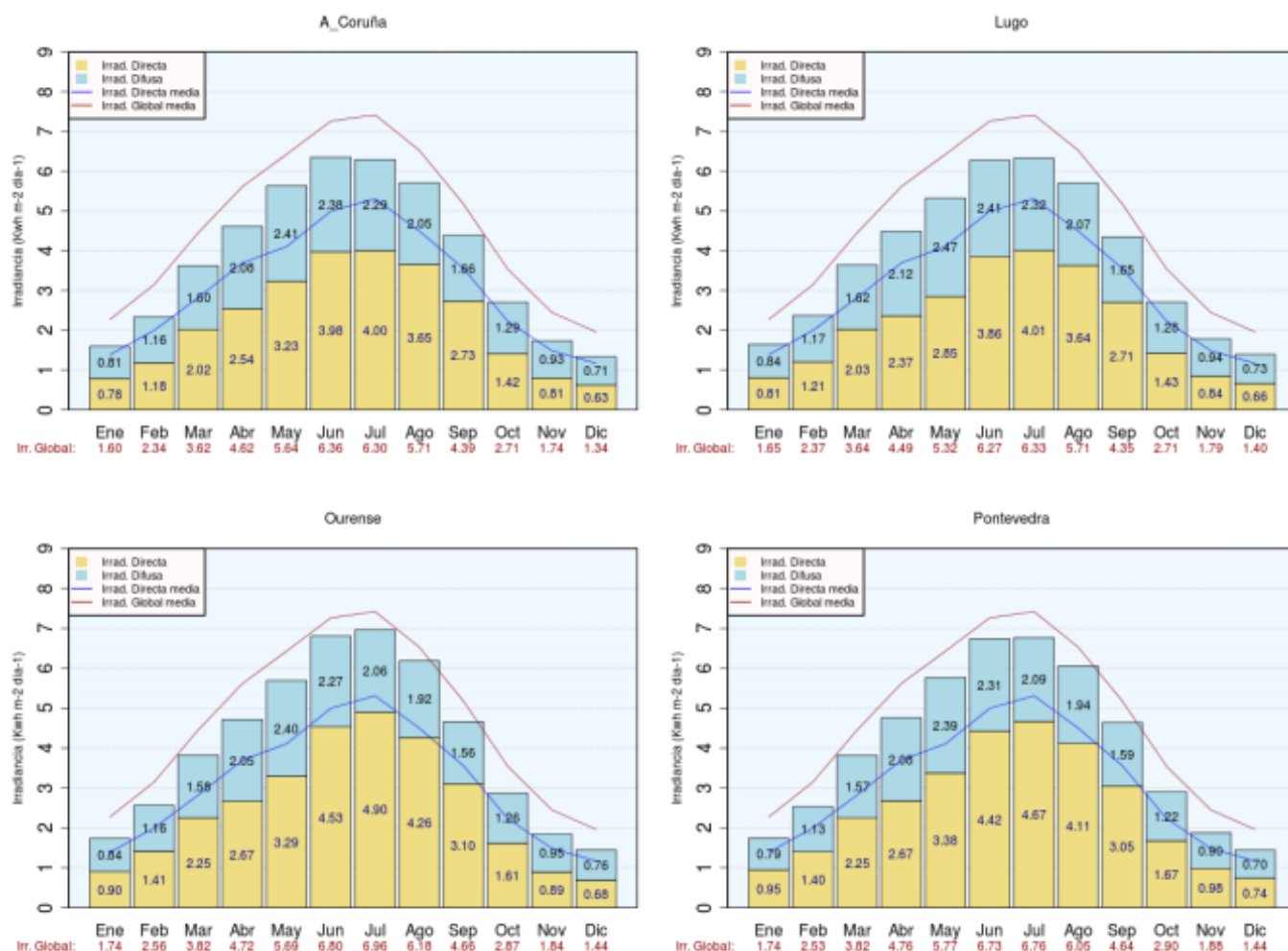


Figura 2-5 Ejemplo de irradiancias global, directa y difusa en Galicia [10]

2.1.2.2 La Armada Española y las energías renovables

Al estar el centro donde se realiza el presente trabajo ligado al Ministerio de Defensa, concretamente a la Armada española, cabe destacar que ésta cuenta entre sus planes con varios proyectos relacionados con las energías renovables. Su página web refleja lo dicho, llevándose a cabo varios estudios en este ámbito: estudio sobre la instalación de energías alternativas y renovables para calefacción y agua caliente sanitaria en la escuela de suboficiales de Cádiz, estudio de viabilidad para la construcción de plantas de cogeneración en la Escuela Naval de Marín y estudio de viabilidad para la implantación de paneles solares en la escuela de suboficiales de Cádiz. Todo ello tiene como fin sumarse al compromiso en la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Por otro lado, la Armada destaca la estación de radio de Bermeja (Madrid) como su máxima iniciativa, ya que se han sustituido dos calderas de gasóleo para calefacción y agua caliente por el uso de geotermia de baja entalpía, reduciendo las emisiones de dióxido de carbono a cero [11].

2.2 Panel fotovoltaico

La gran mayoría de la tecnología fotovoltaica usada hoy en día se basa en el silicio, el cual puede presentarse de varias formas. Cuanto más puro sea este elemento, mejor convertirá la energía solar en electricidad, debido a una mejor alineación de sus moléculas [12].

En este apartado nos centraremos en los distintos tipos de paneles fotovoltaicos con los que se comercializa hoy en día, que son tres:

- a) Monocristalinos de silicio.
- b) Policristalinos de silicio.
- c) De capa fina.

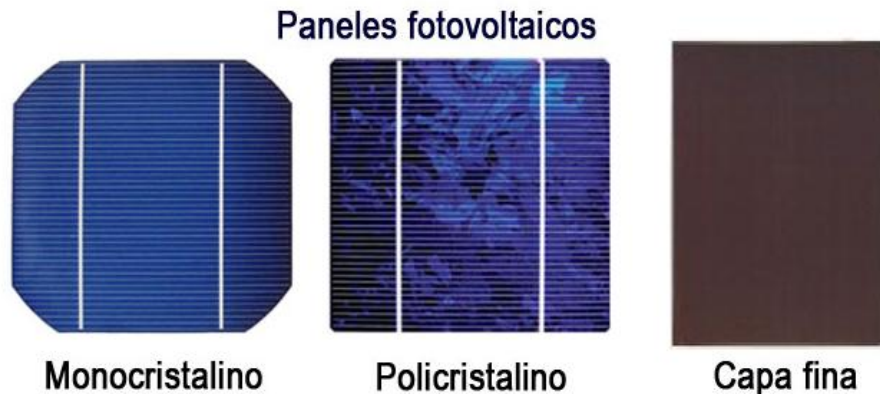


Figura 2-6 Tipos de paneles fotovoltaicos comerciales [12]

- a) Monocristalinos de silicio: Destacan por su alta pureza en silicio, aspecto que visualmente interpretaremos por su coloración y uniformidad. Las celdas monocristalinas son fabricadas por bloques cilíndricos de silicio. A diferencia de los policristalinos, éstos últimos poseen celdas perfectamente rectangulares y carecen de esquinas redondeadas.
- b) Policristalinos de silicio: Se consigue fundiendo el silicio en bruto. Posteriormente se vierte en un molde, se enfría y se corta en láminas cuadradas.
- c) De capa fina: Se fabrican depositando varias capas de material fotovoltaico sobre una base. Dependiendo del material, encontramos: de silicio amorfo, telurio de cadmio, cobre, indio, galio y selenio, o células fotovoltaicas orgánicas. Son cada vez más demandados.

Una vez definidos a grandes rasgos, veamos ahora sus ventajas e inconvenientes:

Tipo de Panel	Ventajas	Desventajas
a)	Son los de mayor eficiencia (+15%)	Más caros
	Vida útil más larga	Puede averiarse si el panel se cubre parcialmente
	Mejores que b) con poca luz	Se derrocha mucho silicio por el recorte
b)	Proceso más simple, menor precio	Menor resistencia al calor
	No derrocha tanto silicio	Eficiencias 13-16 %
		Requiere mayor espacio
c)	Son los más baratos	Eficiencias 7-13 %. Requieren mucho espacio para igualar producción eléctrica de un cristalino
	Apariencia muy homogénea	
	Pueden ser <u>flexibles</u>	Degradación más rápida
	Rendimiento no función de sombras o altas temperaturas	
	Mayor rango de tensiones	

Tabla 2-1 Ventajas y desventajas de los diferentes paneles fotovoltaicos [12] [13]

2.2.1 Paneles flexibles de película delgada y estudios anteriores

Hasta ahora, se han ido citando una serie de datos generales sobre el tipo de energía del que haremos uso, así como una división de los diferentes paneles existentes dentro de la misma. Dicho lo cual, en la Tabla 2-1 se aprecia una característica muy importante en relación al título del presente trabajo, encuadrada en los paneles fotovoltaicos de capa fina: la flexibilidad.



Figura 2-7 Ejemplo de panel fotovoltaico de capa delgada flexible [14]

La Figura 2-7 refleja el tipo de sistema que se deberá modelar más adelante. A continuación, citaremos algunos ejemplos en los que se ha empleado.

- Vamos a comenzar citando un estudio preliminar para su aplicación a nano y micro satélites [15]. En el resumen del mismo, se lee: *“Los resultados de la evaluación tecnológica demuestran la factibilidad de fabricación de este tipo de paneles solares a bajo costo y con equipamiento sencillo. Además mostraron baja transmisibilidad a vibraciones y choque. Como conclusión se puede afirmar que esta tecnología es aplicable a micro y nano satélites”*.

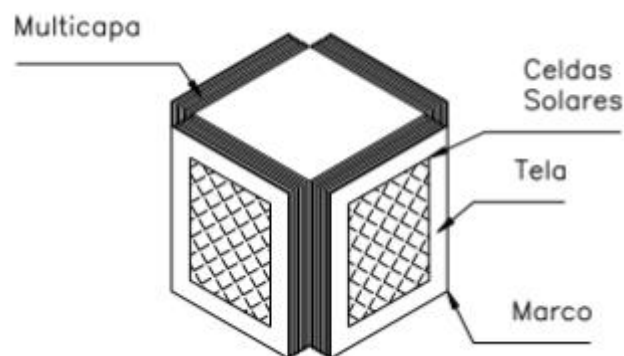


Figura 2-8 Nano satélite con celdas solares [15]

Dicho estudio concluye mencionando la aptitud de los paneles solares fabricados de sustrato flexible en el ámbito espacial aunque, recalca, que se debe hacer una investigación sobre el comportamiento térmico y resistencia espacial en caso de su uso en misión real.

- El segundo ejemplo a citar se encuadra dentro de un proyecto de fin de carrera de ingeniería industrial en Barcelona [16]. En el mismo se procede al estudio de esta tecnología para aplicación a las cubiertas de las naves industriales situadas en dos polígonos de Cataluña. De nuevo, de los principales motivos que impulsan a la autora a proponer estas instalaciones, se mencionan una conexión sencilla y económica. Añade que *“poner lonas fotovoltaicas en las cubiertas proporciona un aislamiento térmico adicional al edificio. Se*

consigue que en el interior de la nave, la temperatura durante el verano presente un descenso y el consecuente ahorro energético a nivel de climatización”.

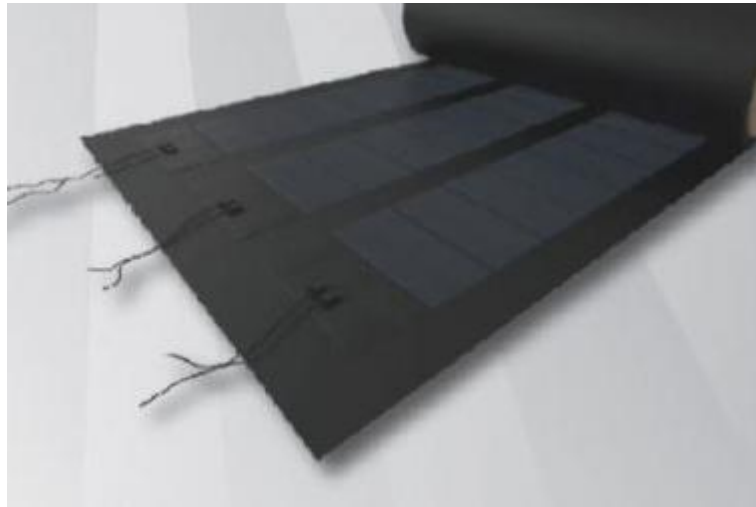


Figura 2-9 Lona fotovoltaica [16]

- El último ejemplo que trataremos hace referencia a un artículo relacionado con el aprovechamiento de la energía solar para su uso en un invernadero ubicado en Almería, a través de módulos fotovoltaicos de lámina delgada flexibles. Para ello, Pérez García et al. (2016) proponen una alternativa al diseño de la cubierta, como se observa en la Figura 2-10, para que la misma posea una geometría que sea capaz de concentrar la radiación incidente (lo que denominan como “*cubiertas activas termo-fotovoltaicas*”) [17]. En el mismo apartado se considera el “*acoplamiento con captadores térmicos constiuidos por tubos absorbedores adheridos a la superficie fotovoltaica, módulos TFV, que por un lado mejoran el rendimiento de conversión eléctrica al refrigerar el proceso fotovoltaico y por otro permiten obtener calor útil para otros procesos*”.

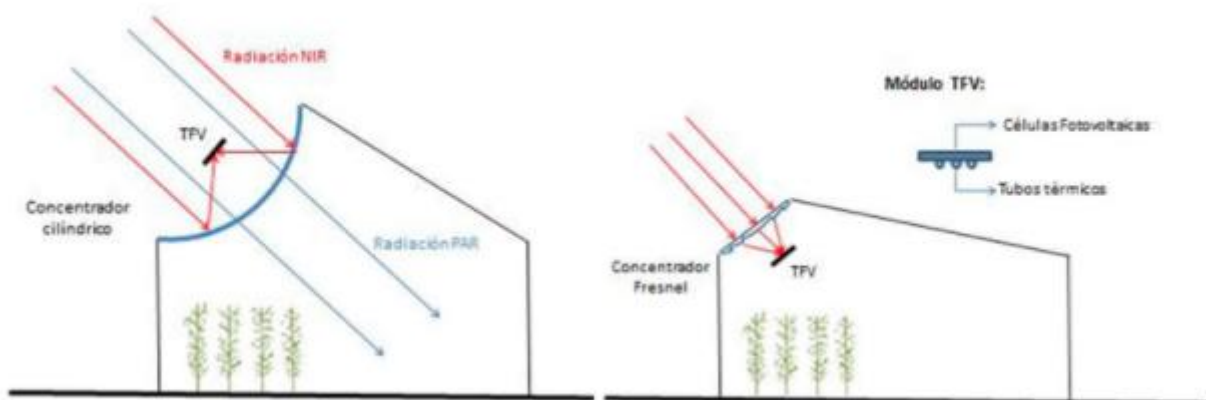


Figura 2-10 Principio de funcionamiento de los módulos híbridos termo fotovoltaivos [17]

2.3 Panel solar Fotovoltaico-Térmico (PV/T)

Se puede llegar rápidamente a la idea de que un PV/T no es más que la combinación de un panel fotovoltaico y un panel solar térmico, llegando a incrementar la eficiencia del panel por encima del 70%, de acuerdo a González, Díez, Alonso y Pérez (2015), los cuales participaron en el “IX Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica”, celebrado en Cartagena, con el título “Clasificación de los paneles solares híbridos (PVT)” [18].

Una de las ventajas que ofrece esta combinación se refleja en la superficie total del panel, ya que se reduce hasta en un 40% en comparación con la superficie que ocuparía cualquiera de estas dos clases de paneles por separado.

Existen varias empresas que están desarrollando nuevas ideas sobre este tipo de paneles híbridos, como por ejemplo *Ecomesh*. Esta empresa en concreto presume de haber conseguido que sus paneles híbridos de segunda generación (caracterizados por incorporar la tecnología CTA – Cubierta Transparente Aislante- diseñada y patentada por *EndeF*) aumenten de manera considerable su eficiencia energética. ¿Cómo lo logran? Recuperando las pérdidas de calor de la parte frontal de los paneles híbridos convencionales, como muestra la Figura 2-11.



Figura 2-11 Diferencia de un panel híbrido con tecnología CTA [19]

Con lo cual, con esta tecnología la empresa dicta lo siguiente: triplica la producción térmica a elevadas temperaturas y aumenta en un 15% la generación eléctrica debido a la refrigeración de las células [19].

2.3.1 Clasificación de los paneles PV/T

González et al. (2015) nos aclaran este apartado debido a su trabajo antes mencionado. Los autores proponen una clasificación de los paneles híbridos de acuerdo al fluido térmico empleado, así como a la tipología y geometría del recuperador de calor.

En la actualidad existen muchas configuraciones posibles, tanto de material como de posicionamiento, colocación de los elementos... que adentrarían este trabajo en temas más complejos y referentes a otros títulos. Con lo cual, al no ser esto el propósito del mismo, se recomienda al lector que acceda a la referencia para más información si lo desea.

En lo referente al tipo de fluido, distinguimos entre: colectores de fluido líquido o gaseoso, pudiendo resultar en una combinación de ambos.

- **Colectores de fluido líquido:** En ellos se orientan la mayoría de los desarrollos, ya que presentan similitudes con los paneles solares térmicos convencionales. El fluido a emplear, generalmente, es agua o un líquido refrigerante (los últimos para ciclos de compresión simple). Un estudio llevado a cabo por Ibrahim et al. (2009) en "*Performance of photovoltaic thermal collector (PVT) with different absorbers design*" concluye con que la geometría más eficiente en términos térmicos se corresponde con el de la Figura 2-12, un colector continuo en espiral, en referencia a una configuración de circulación del líquido por el PV/T con refrigeración por la parte inferior de las células fotovoltaicas mediante tubos. Estos últimos son los que más desarrollo están teniendo (tenemos otras

configuraciones según *Chow* y *Riffat* –en sus respectivas investigaciones-, como por ejemplo la refrigeración mediante la circulación de un flujo en lámina libre).



Figura 2-12 Colector continuo en espiral [18]

- Colectores de fluido gaseoso: Se trata de los más sencillos debido a su construcción. Como reflejan los autores “consisten en realizar una cámara por la que se hace circular el fluido refrigerante, que suele ser aire tomado del propio entorno o del recinto a calefactar”. Los mismos, en base al estudio de las configuraciones comparadas por *Hegazy* en el 2000, concluyen con que la mejor es la que se puede observar en la Figura 2-13, ya que el diseño cuenta con una refrigeración por cada lado de la célula fotovoltaica.

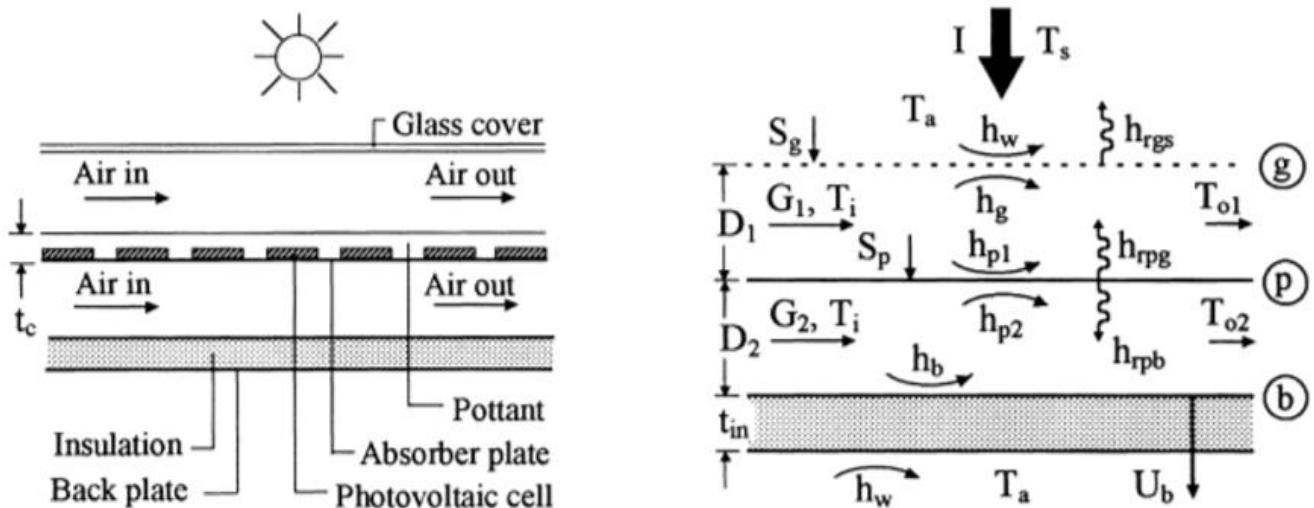


Figura 2-13 Una de las configuraciones de *Hegazy* para colector de fluido gaseoso [18]

Debido a la baja transmisión térmica que posee el aire, diferentes autores han perseguido la idea de aumentar la superficie de intercambio de calor (colector de aire con aletas), mientras otros plantean alternativas a la geometría del colector (geometría triangular o en forma de panel de abeja). Por otro lado, el aire caliente puede ser utilizado para climatización de ciertas partes de un edificio mediante la circulación de aire por una cámara hueca, ya que se consigue refrigerar el módulo PV como se muestra en la siguiente figura.

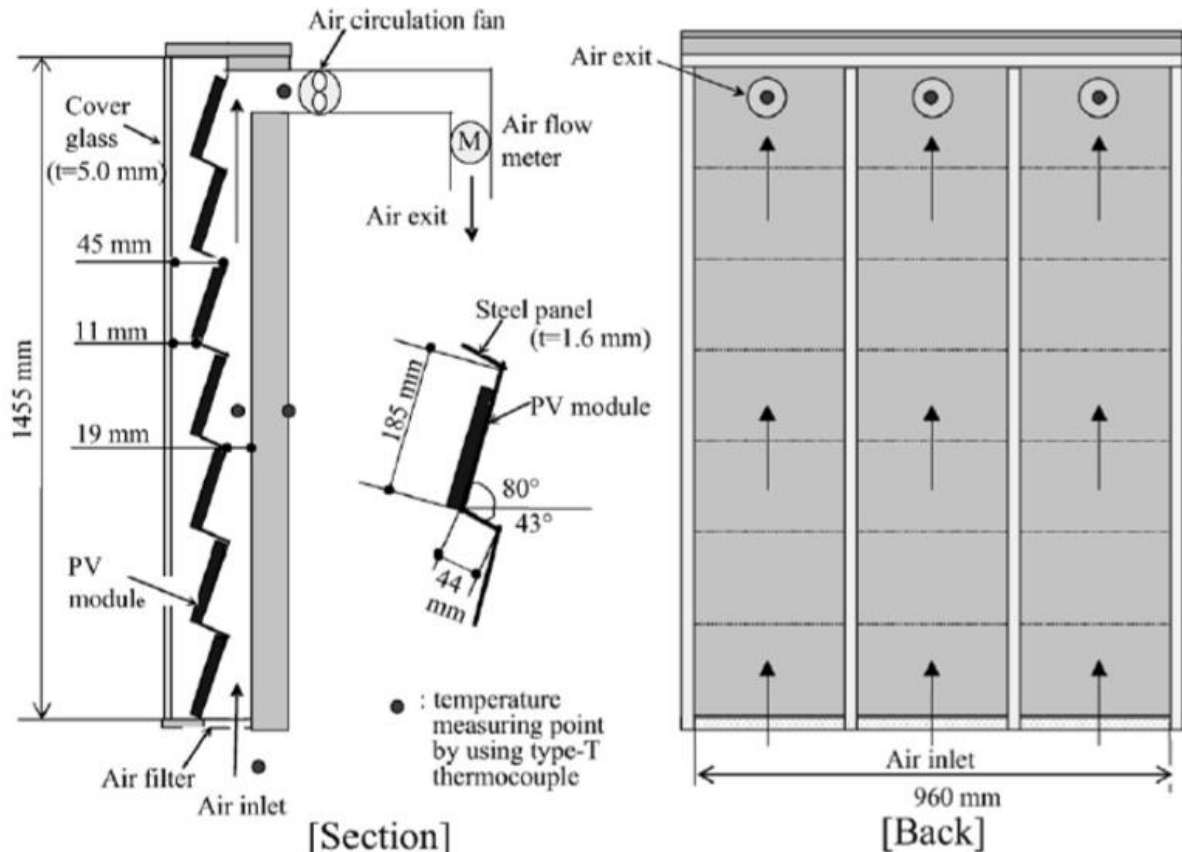


Figura 2-14 PV/T en fachada refrigerado por aire [18]

- Colectores mixtos agua-aire: Con este sistema se consigue calentar agua y aire al mismo tiempo. Son de compleja construcción, por lo que no son de gran utilidad, menos aún si a esto le sumamos la baja temperatura a la que salen los fluidos.

Para concluir este subapartado, vamos a hablar ahora sobre el panel híbrido de concentración. Se trata de buscar una disposición del mismo tal que la radiación solar se concentre en él, de tal manera que aumente la eficiencia. Pero esta alternativa al panel de módulo solar plano tiene una contrapartida, consecuencia de que un aumento de la radiación incidente sobre un panel fotovoltaico causa un sobrecalentamiento en el módulo PV, originando una pérdida de rendimiento eléctrico y mayor deterioro. Una posible solución es la de instalar refrigeración en las células fotovoltaicas. En función de la tecnología de concentración, nos podemos encontrar reflectores parabólicos por un lado y, por otra parte, lentes concentradoras.

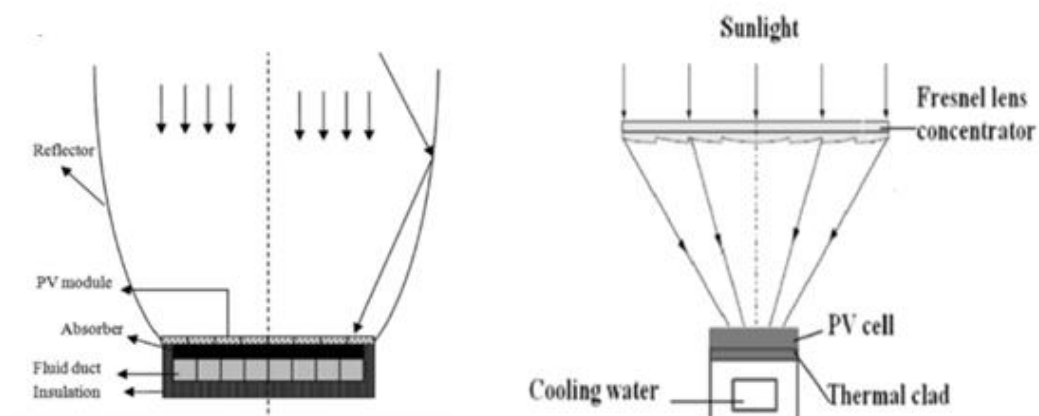


Figura 2-15 Reflector parabólico y lente concentradora [18]

2.4 Sistemas concentrados

A lo largo del apartado “Metodología”, se mencionará repetidas veces el concepto de sistema concentrado -sinónimo en este trabajo de masa inercial y de “lump”, como lo nombra el software a emplear-. Por lo tanto, este subapartado tiene como fin explicar los principios del mismo.

Existen algunos cuerpos cuya temperatura puede expresarse sólo como una función del tiempo, ya que responden a una uniformidad en la misma durante un proceso de transferencia de calor. El análisis de dicha transferencia basada en esta idealización es conocido como “análisis de sistemas concentrados”, resultando en una gran simplificación ante cierta clase de problemas sin perder demasiada exactitud [20].

Veamos un ejemplo visual a través de la siguiente figura:

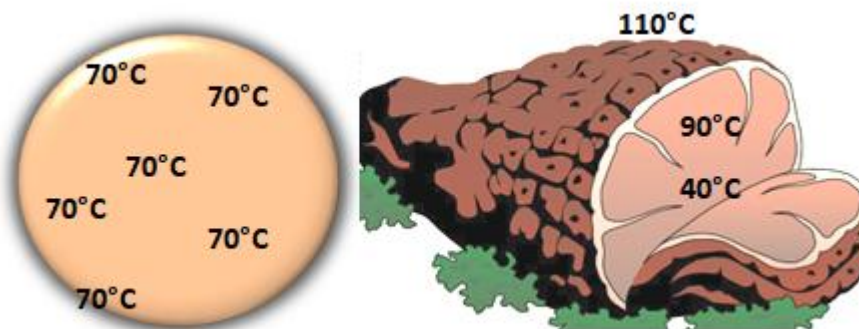


Figura 2-16 Comportamiento de elementos como sistemas concentrados

En la Figura 2-16, se aprecia cómo una bola de cobre se puede asemejar a un sistema concentrado, manteniendo su temperatura uniforme independientemente de la posición. Por el contrario, se puede experimentar fácilmente que ésto no ocurre guisando, por ejemplo, una carne, pudiendo uno cerciorarse de una variación en la temperatura de ésta según la zona observada.

2.5 Simulación Térmica

En este punto dejamos a un lado la teoría y nos adentramos en el mundo de la simulación térmica. Se expondrán diversos estudios cuya herramienta fundamental de simulación fue la misma que la que se empleará en este trabajo con posterioridad.

Como se nombró en la introducción, nos referimos al software de simulación *TRNSYS®* (actualmente en su versión 18, aunque en el presente trabajo se hará uso de la 17).

2.5.1 *TRNSYS17®*

Este software de referencia internacional simula el comportamiento de los sistemas transitorios. Una de las características más importantes del mismo es su flexibilidad a la hora de poder enlazar diferentes tipos de software informáticos. Por ejemplo, y como aconsejan Eguía Oller et al. (2012) en “*Simulación de Edificios con Trnsys17*” [21], resulta mucho menos complejo dibujar la geometría del objeto a simular mediante el software de CAD *Google SketchUp®* y realizar una posterior exportación a *TRNBuild* (incluido en el paquete *Trnsys*). Dicho software se puede descargar gratuitamente de la web y permite la edificación en 3D de una manera rápida (se aconseja seguir los pasos de la guía para la construcción mediante este software contenida en el libro antes citado).

Entonces, ¿para qué se usa *TRNBuild*? Teniendo el modelo geométrico, se hará uso de esta aplicación ante la posible necesidad de añadir información constructiva, sin la cual no se podría generar el modelo térmico. Ejemplo: materiales, cerramientos, conductividad, calor específico, absorptancia solar, etc.

Por otro lado, *Trnsys* interactúa de igual manera con multitud de programas que albergan archivos meteorológicos, como es el caso de *Meteonorm*®, una aplicación que internamente interpola los valores de las estaciones meteorológicas más cercanas a la ubicación que se le indique: temperatura, radiación solar, humedad...

Con toda la información geométrica, características térmicas y archivos meteorológicos, se nos presentará los resultados tras haberse realizado la simulación satisfactoriamente.



Figura 2-17 Logotipos de las herramientas informáticas a utilizar

2.5.2 Simulaciones en *Trnsys*®

Se procede a citar algunos ejemplos de trabajos/investigaciones en los que se ha hecho uso de esta herramienta.

El Centro Universitario de la Defensa (CUD) ubicado en Marín, cuenta ya con algunos Trabajos de Fin de Grado en los cuales se trabaja con los diferentes software/aplicaciones descritos en el apartado anterior.

Este es el caso, por ejemplo, del Trabajo de Fin de Grado de Hernández Serrano (2016) [22], que responde al título de: “*Estudio de cargas térmicas e idoneidad de equipos de suministro energético en módulos de servicios basados en contenedores marítimos*”, cuyos directores fueron los mismos que en el presente trabajo. En el mismo, se realiza una simulación térmica de los módulos a emplear, modificando tanto sus características interiores como la zona geográfica en la que se quiere realizar el estudio.

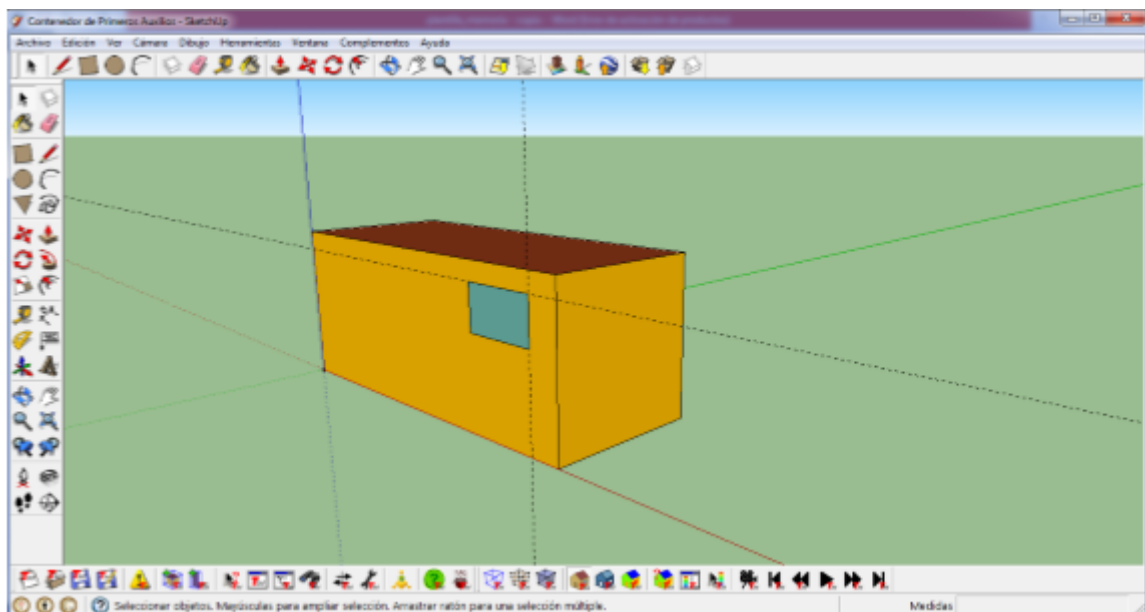


Figura 2-18 Diseño geométrico de un contenedor mediante *Google SketchUp*® [22]

Como se puede apreciar en la Figura 2-18, el autor define la geometría del contenedor a través del software que oferta *Google*, antes mencionado. Tras este paso, se debe guardar el archivo “.idf”, para ser exportado posteriormente.

Tras introducir los parámetros correspondientes y llevar a cabo la simulación, los resultados de ésta son exportados a *Microsoft Excel®*. Este software nos permitirá interpretarlos de una manera correcta e intuitiva a través de gráficas y tablas.

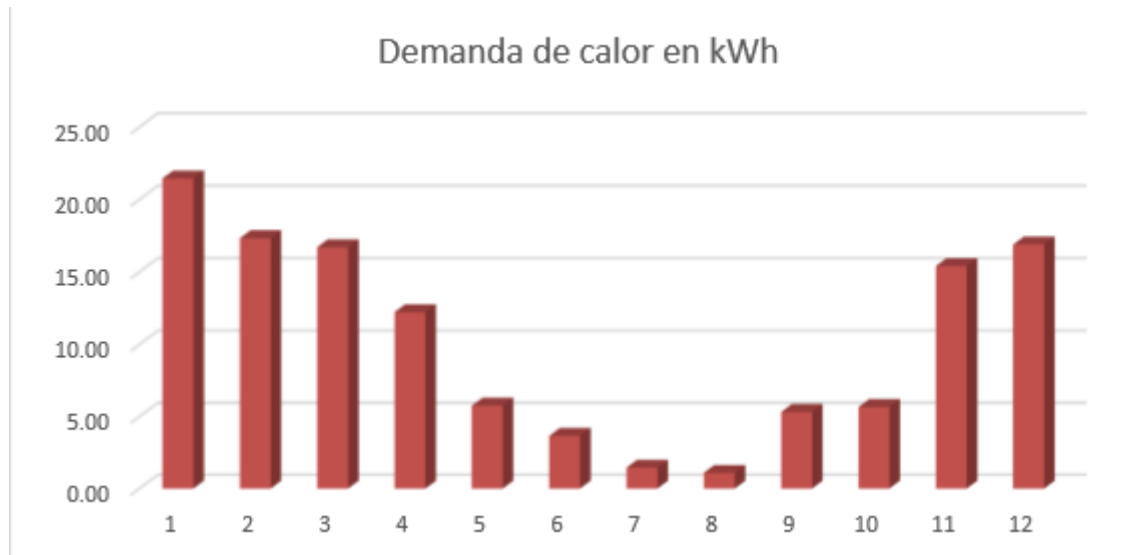


Figura 2-19 Ejemplo resultados en hoja de cálculo *Excel®* (Puerto Príncipe) [22]

Otro ejemplo, encuadrado también en los trabajos de fin de grado tutorizados por el CUD, se corresponde con el título “*Modelado de un panel solar híbrido a partir de datos experimentales*”, de Delgado González (2017) [23]. Mediante la simulación de una instalación real situada en Burgos, se estudian las prestaciones que un panel híbrido ofrece. Posteriormente, se comprueba la viabilidad de una instalación similar en maniobras y despliegues de la Infantería de Marina en diferentes ubicaciones.

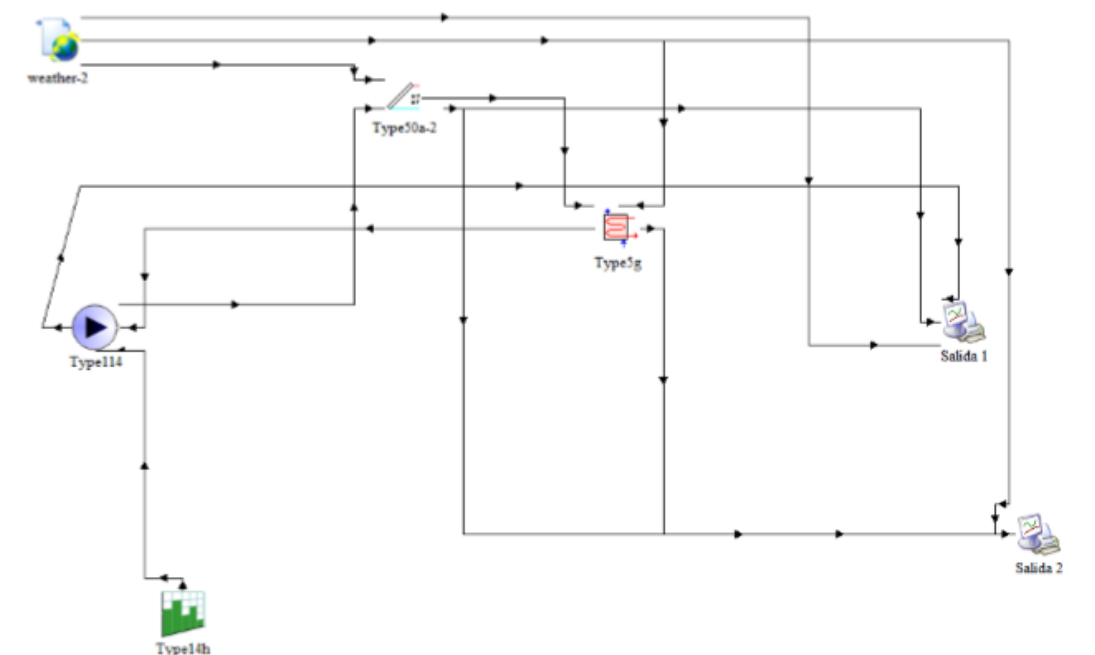


Figura 2-20 Modelo TRNSYS con colector PV/T [23]

En la Figura 2-20 se observa el empleo en la simulación del *type50a*, correspondiente a un colector híbrido PV/T de placa plana y pérdidas constantes.

Para terminar con el historial de este tipo de simulaciones, veamos uno que cuenta con la participación directa de los directores de este Trabajo de Fin de Grado, que responde al título de “*Diseño y estudio de cargas térmicas de una vivienda-contenedor utilizando Trnsys*” [24]. Rey, Ulloa, Miguez y Cacabelos (2015) presentan en el “IX Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica” una propuesta de diseño de una vivienda-contenedor y su modelización mediante la herramienta *TRNBUILD* ya mencionada.

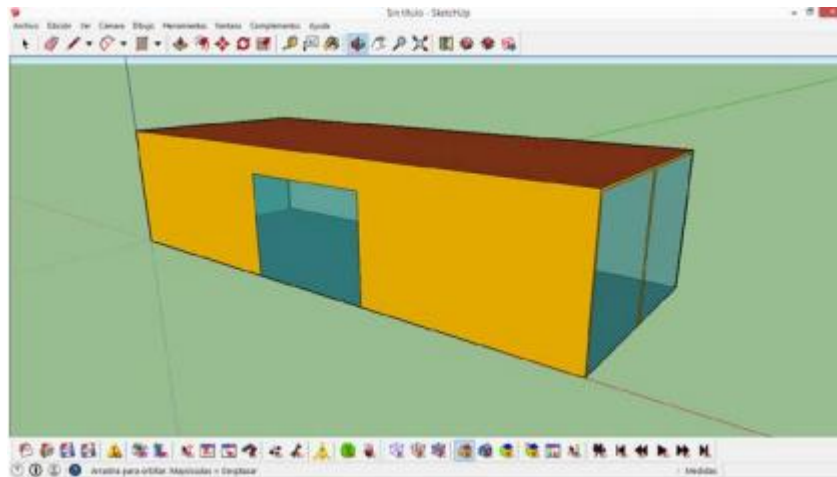


Figura 2-21 Contenedor modelado en TRNSYS3D [24]

En este caso, Rey et al. (2015) introducen una fuente de calefacción y otra de refrigeración para mantener siempre la temperatura dentro del margen deseado. Así mismo, los autores escogen tres ciudades en las cuales se desarrollará la simulación-Vigo, Madrid y Málaga- debido a su diferente clima- atlántico, interior y mediterráneo-. En la Tabla 2-2 encontramos los resultados por mes de demanda de calor para la ciudad de Vigo.

Mes	Potencia máxima de calor (kW)	Día de potencia máxima de calor	Hora de potencia máxima de calor	Temperatura ambiente (°C)	Demanda de calor (kWh)
1	5.41	28	9:00	2.3	1792.83
2	5.46	15	1:06	1.7	1445.45
3	4.88	9	0:06	3.2	1191.31
4	4.84	21	7:00	3.8	975.62
5	3.93	1	6:36	6.9	709.51
6	3.29	5	6:00	9.5	400.89
7	2.75	5	5:06	11.3	335.42
8	2.84	4	6:36	11.1	344.71
9	3.20	30	7:30	10.1	476.59
10	4.36	2	7:36	5.5	843.41
11	5.14	30	9:00	2.3	1425.13
12	5.27	25	7:00	0.9	1841.84

Tabla 2-2 Ejemplo de resultados de una simulación para Vigo [24]

3 METODOLOGÍA

3.1 Conceptos previos

3.1.1 Punto de vista térmico

Como ya se expuso, el propósito final del presente trabajo responde a la validación de un sistema de calefacción, basado en un panel PV-T flexible de capa fina, con posible aplicación a ser un método de acondicionamiento de una tienda de campaña. El esquema general de la idea se corresponde con el de la Figura 3-1. En la misma, se puede observar que el aire que entra en el objeto a acondicionar es precisamente el que sale de la instalación térmica. Lógicamente, todo este funcionamiento es dependiente de la radiación recibida, la cual varía según el emplazamiento y el ángulo de incidencia.

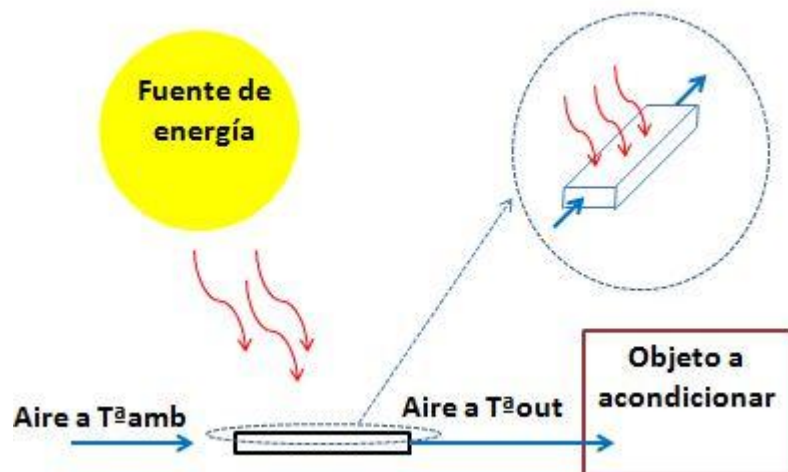


Figura 3-1 Esquema conceptual de la idea a implantar

Dicho esto, ¿cuál será el procedimiento a seguir para averiguar la temperatura de salida? Pues bien, la superficie del panel está recibiendo una radiación conocida, aportada por un archivo meteorológico que recoja este dato. Por otro lado, el mismo estará en continua transferencia de calor en base a los fenómenos de radiación y convección, dividiéndolos en dos partes: una relacionada con el panel en contacto con el exterior –pérdidas por radiación y convección-, y otra parte que hace referencia a la pérdida sufrida desde la superficie de la masa inercial hacia adentro -convección-.

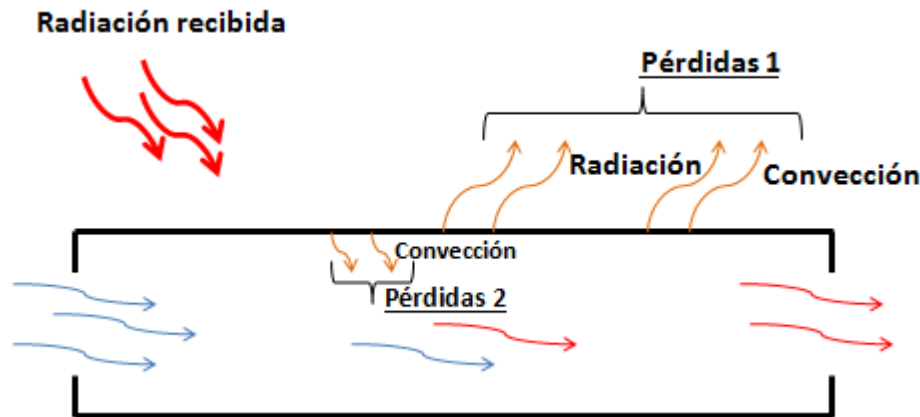


Figura 3-2 Esquema de las pérdidas en el sistema

Como se aprecia en la Figura 3-2, el sistema recibe una radiación externa, existiendo a su vez una transferencia de calor tanto con el exterior como en su interior.

Dicho sistema se modelará a través de *Trnsys* como una masa inercial. Este concepto, descrito en el apartado “Sistemas concentrados”, simplifica el problema de transferencia de calor sin descuidar la exactitud del mismo. Recordando la idea principal contenida en el capítulo mencionado: la temperatura de los cuerpos sometidos a este análisis se considera únicamente como función del tiempo, ya que experimentalmente se comprueba que su temperatura interior permanece uniforme durante el proceso de transferencia de calor.

Recogiendo las ideas anteriores, el panel PV/T absorbe una energía y se establece una transferencia de calor con el medio al mismo tiempo. Con la temperatura alcanzada por el sistema concentrado en cuestión, se desarrollará un fenómeno de convección hacia el fluido (aire) que circula por el interior (siempre que la diferencia de temperaturas permita la transferencia en tal sentido). Visto de otro modo, la energía perdida por la masa inercial hacia el interior, será igual a la energía absorbida por el aire que circula a través de él. Dicho esto, no habrá más que realizar un balance energético para lograr conseguir la temperatura de salida deseada.

La siguiente ecuación muestra la velocidad de transferencia de calor, la cual habrá que igualar a las pérdidas por convección como se menciona en las líneas anteriores.

$$\dot{Q}[\text{J/s}] = \dot{m}cp\Delta T \quad (1)$$

$\dot{m}^{(1)}$: Flujo másico. Expresa la variación de la masa respecto del tiempo sobre un área específica.

$cp^{(2)}$: Calor específico. Capacidad calorífica por unidad de masa.

ΔT : Diferencia de temperaturas. Al ser una variación de éstas, sus unidades no son un factor determinante.

(1) El flujo másico se puede definir como el producto de la densidad del fluido, la velocidad promedio de éste y el área de la sección transversal.

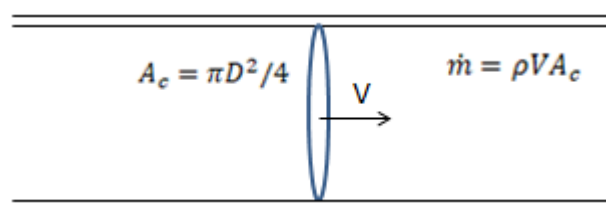


Figura 3-3 Cálculo del flujo másico para sección circular

(2) Sabemos que un cambio de 1°C en la temperatura es equivalente a un cambio de 1K . De esta manera: $1\text{KJ/Kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \equiv 1\text{J/g} \cdot ^{\circ}\text{C} \equiv 1\text{KJ/Kg} \cdot \text{K} \equiv 1\text{J/g} \cdot \text{K}$

A continuación, vamos a ir definiendo la energía desde que el panel la recibe hasta el interior del sistema.

En primer lugar, la irradiación " G " se define como la velocidad con la que la radiación incide sobre un área unitaria. La proporción de la irradiación total absorbida por la superficie del panel es igual a:

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2)$$

donde " α ($0 \leq \alpha \leq 1$)" hace referencia a la absorptividad.

Como se dijo y expresó en el esquema Figura 3-2, lo que se denominó "Pérdidas 1" se divide en pérdidas por radiación y pérdidas por convección. En cuanto al calor radiado intercambiado, se puede definir según la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_{rad}[\text{W}/\text{m}^2] = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) \quad (3)$$

ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$): Emisividad.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$

T_s : Temperatura de la superficie en contacto con el fluido. En grados Kelvin.

T_{sky} : Temperatura de las superficies circundantes, en grados K. Estimada a través de la T_{amb} de acuerdo al modelo propuesto por Swinbank (convertir T_{amb} a K previamente):

$$T_{sky} = 0,0552 T_{amb}^{1,5} \quad (4)$$

Por otro lado, las pérdidas por convección las definiremos por la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_{conv}[\text{W}/\text{m}^2] = h(T_s - T_{amb}) \quad (5)$$

h : Coeficiente convectivo. Con unidades $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$, se estimará haciendo uso de la velocidad del viento, introduciéndola en m/s, a través del modelo clásico que sugiere Nusselt-Jürges:

$$h = 5,8 + 3,95 V_w \quad (6)$$

Ahora bien, se puede definir el flujo de calor normal a la superficie del panel bajo estudio haciendo uso de las ecuaciones (2), (3) y (5):

$$-k \frac{dT_s}{dx} = h(T_s - T_{amb}) + \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) - \alpha G \quad (7)$$

Una vez definidas las pérdidas hacia el exterior, veamos ahora lo que ocurre desde la superficie del panel hacia el interior. Al tratarse de nuevo de una pérdida por convección, ésta responderá a la misma ecuación que (5), salvo que en lugar de T_{amb} , habría que ir introduciendo la temperatura que el fluido va adquiriendo a lo largo del conducto de nuestro sistema. Dicha tarea se resolvería mediante una

integración que abarcase toda la longitud del mismo, puesto que el aire va a ir ganando temperatura a medida que lo recorra.

Esta ganancia resulta en una pérdida del poder convectivo (se da una mayor rapidez de transferencia de calor cuanto mayor diferencia de temperaturas exista) a medida que el fluido avanza, ya que la diferencia de temperaturas ($T_{lump} - T_{aire}$) va disminuyendo como es de esperar (dado que la temperatura del sistema inercial es la misma independientemente de la posición, mientras que la del aire contenido incrementa).

Por lo tanto, para la simplificación del problema, se va a suponer una temperatura media del fluido contenido en el conducto. Esta suposición es más que válida para la solución a la que se desea llegar, ya que mediante este sistema de calefacción no se experimentan variaciones de temperatura elevadas. Más adelante se reflejará esquemáticamente la idea descrita, compuesta por una serie de iteraciones dadas, ya que la temperatura media del aire depende en parte de la temperatura del mismo a la salida del sistema, que es justamente lo que se quiere resolver.

Por otro lado, anteriormente se introdujo la idea de realizar un balance energético para obtener T_{out} . Hasta este punto ya sabemos que la energía que pierde el panel hacia el interior por convección se corresponde con la que obtiene el flujo de aire, de tal manera que si juntamos las ecuaciones (1) y (5) –esta última adaptada a la temperatura media interior del fluido como ya se dijo- daremos con dicho balance:

$$h_{in}A_{PV}(T_{Lump} - T_{ma}) = \dot{m}cp(T_{out} - T_{amb}) \quad (8)$$

A_{PV} : Área del panel.

T_{Lump} : Temperatura de la masa inercial.

T_{ma} : Temperatura media del fluido en el interior.

Entonces, si en el balance energético a realizar sólo entra en juego la transferencia de calor del sistema hacia adentro, mediante convección, ¿por qué hemos definido de igual manera tanto la radiación recibida como las pérdidas del panel al exterior? La respuesta radica en que estas dos últimas afectan directamente a la temperatura adquirida por la masa inercial, con lo cual la temperatura de salida sí que es dependiente de las mismas. Todo ello se verá reflejado en un conjunto de ecuaciones en las que todas estas transferencias de calor entran en juego y permiten definir la temperatura de la masa inercial.

En lo que a la simulación respecta, se tratará de conseguir la temperatura de salida a través de un *lay-out* similar al que se puede observar en la Figura 3-4 , en el que vemos que las ecuaciones implantadas están alimentadas tanto por los parámetros correspondientes como por la temperatura de la masa inercial, T_{lump} , a la vez que este elemento requiere al mismo tiempo de estas ecuaciones para obtener una solución de dicha temperatura.

Tras las iteraciones correspondientes, o *time step* (intervalo de tiempo en el que se ejecutan las ecuaciones -una hora en nuestro caso-) se obtendrá T_{out} , la cual –como se dijo al principio de este apartado- será la temperatura de entrada al objeto a acondicionar (la tienda de campaña, por ejemplo).

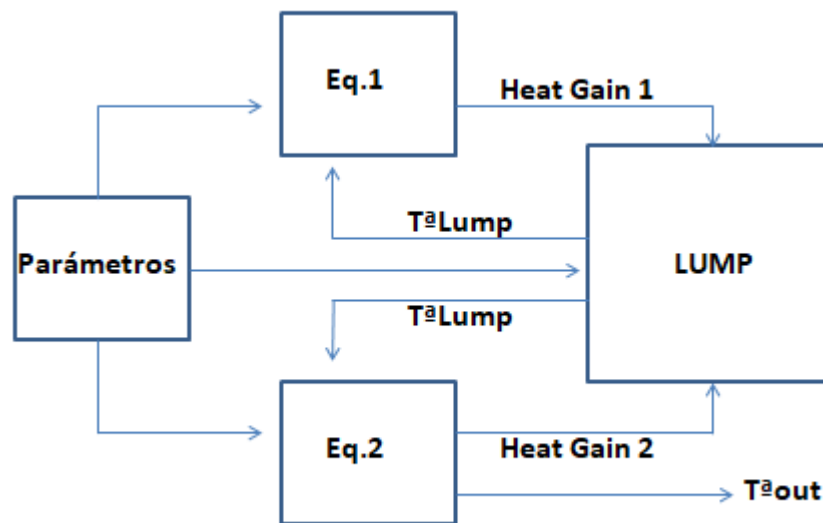


Figura 3-4 Esquema lay-out para la simulación

Como es lógico, este conjunto de calefacción será útil en cuanto la temperatura de salida, o de entrada al objeto a acondicionar, sea mayor que la existente dentro de ella. Debido a esto, se deberá instalar un sensor que haga una comparativa entre ambas temperaturas, activando un sistema paralelo que detenga la entrada de aire cuando se detecte que se está enfriando el interior en lugar de calentando.

3.2 Simulación térmica

3.2.1 Resumen

Como ya se ha dicho, se va a llevar a cabo la validación de un panel solar fotovoltaico térmico (PV/T) basado en película delgada flexible. Para ello, se cuenta con la instalación de un sistema similar en una de las torres de la Escuela Naval Militar.

El sistema en cuestión lleva recogiendo datos desde el mes de enero del pasado año (2017), lo que nos permitiría realizar una simulación que abarcara un año entero (8760 horas). Sin embargo, se procederá a la simulación de ocho días de un mes característico del año que no presente datos erróneos o incompletos -lógicamente, no procede escoger unos datos correspondientes a una época del año calurosa, puesto que se busca la calefacción-. Los datos recogidos son los siguientes: temperatura del aire tanto a la salida como a la entrada, temperatura adquirida por la instalación en sí, voltaje resultante en circuito abierto y la intensidad en corto-circuito (a través de los cuales, y junto a otros parámetros establecidos por el fabricante, se podría llegar a otros, como la potencia -aunque este trabajo sólo se centra en la parte térmica, no eléctrica-).

Dicha validación se desarrollará mediante el software de simulación térmica *trnsys*, capaz de simular sistemas transitorios como se expuso en el apartado 2.5.1. El mismo consta de numerosos *types* o elementos, entre los que se puede encontrar, por ejemplo, el correspondiente a insertar un archivo meteorológico externo. Una de las varias posibilidades de formato que ofrece el software se corresponde con el “TMY”, cuya resolución de *time step* o, lo que es lo mismo, cada cuánto tiempo el software resuelve la ecuación introducida, será de una hora. Dado que la simulación a establecer responde a los datos contenidos en ocho días completos, ello hará un total de 192 resultados, uno por cada hora de los días simular.

Ahora bien, se cuenta con la ventaja de que la Escuela Naval Militar posee una estación meteorológica que recoge datos cada diez minutos. Con lo cual es lógico pensar que deberíamos emplear éstos, en lugar de importar los datos de alguna aplicación como puede ser *Meteonorm*, ya que ésta se basa en encontrar las estaciones más cercanas a la ubicación deseada e interpolar datos. Dicho de otro modo, resulta mucho más práctico, sin ninguna duda, el manejar datos reales sobre el emplazamiento en cuestión. Por este motivo, se solicita a esta estación meteorológica un archivo que contenga los datos correspondientes al periodo a simular, el cual se tendrá que modificar para transformarlo en un archivo que *transys* pueda interpretar (se podría proceder a convertirlo en un “TMY”, o bien copiar los datos en un archivo de texto e insertarlo mediante un *type* diferente). Por otro lado, se haría uso de la aplicación *Meteonorm* en caso de querer simular el comportamiento del sistema en otros lugares.

Llegados a este punto, los datos recogidos por la instalación real también deben ser convertidos a un tipo de texto entendible de igual manera por *transys*. De la misma manera explicada en el párrafo anterior, esto puede llevarse a cabo mediante un archivo de texto donde, separadas por tabulaciones, las columnas indicarán los distintos parámetros existentes, mientras que debajo de ellas se colocarán los datos pertinentes fila a fila. Así pues, se llegará a un total de 192 filas, una por cada hora de los días a simular, de tal manera que el software, por cada *time step*, sea capaz de ir haciendo barridos una a una e ir aplicando la ecuación introducida a cada una de ellas. La manera de insertar estas ecuaciones se explicará más adelante.

Una vez se consiga todo lo expuesto, es hora de interpretar los resultados de la simulación y compararlos con los obtenidos mediante el panel PV-T instalado en la torre. Para una mejor interpretación de los resultados, la cual se consigue plasmando los resultados en gráficas y tablas, se exportarán los resultados a una hoja de cálculo *Excel*.

Una vez se tenga todo planteado, se llegará a una conclusión sobre la simulación realizada, asumiendo un porcentaje de error sobre la misma.

3.2.2 Datos empleados

La mayoría de los datos que se relacionan en los apartados sucesivos, provienen del artículo que responde al título de “*AHP-based design method of a lightweight, portable and flexible air-based PV-T module for UAV shelter hangars*” [1]. En el mismo, los autores Ulloa, Rey, Nuñez y Cheng-Xian (2018) –todos ellos pertenecientes al Centro Universitario de la Defensa, y, los dos primeros, directores del presente Trabajo de Fin de Grado– llevan a cabo una simulación CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para el diseño de un sistema fotovoltaico-térmico a fin de abastecer necesidades tanto caloríficas como eléctricas en el ámbito militar en base a la misma instalación ubicada en una de las torres de la Escuela Naval Militar de la que se habló a comienzos del presente trabajo.

3.2.3 Definición de types

Una vez se abra la aplicación *Simulation Studio*, perteneciente al paquete que ofrece *transys*, seguiremos estas instrucciones para comenzar a trabajar sobre un proyecto nuevo desde cero: “File - New - Empty TRNSYS Project”, de acuerdo con la Figura 3-5.

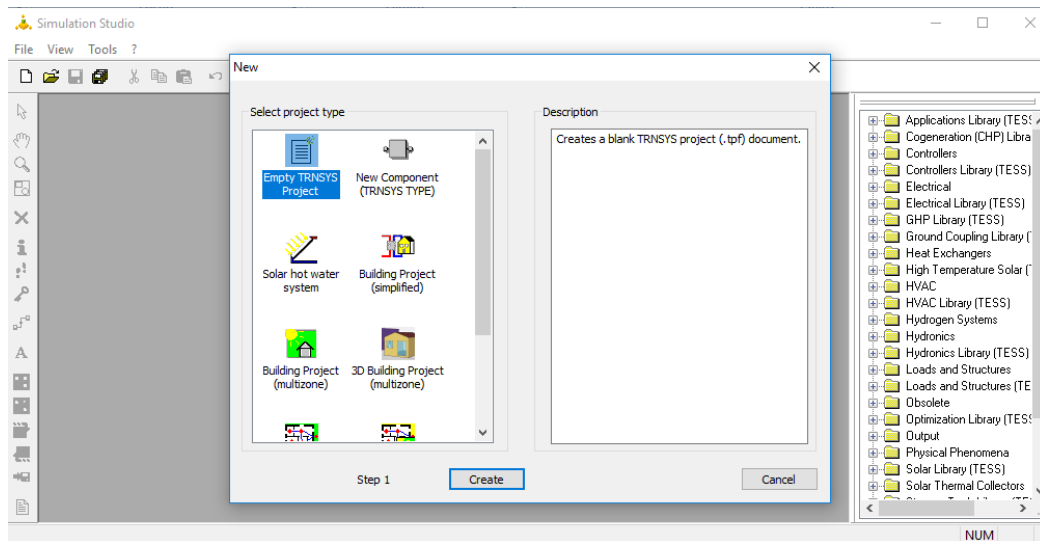
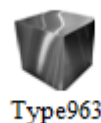


Figura 3-5 Ventana de presentación de *Simulation Studio*

En la misma imagen, se puede observar la existencia de una librería en la parte derecha. Ésta es la que contiene todos los diferentes elementos, *types*, que se podrán utilizar en una simulación. Nótese que algunas carpetas añaden al final “(TESS)”, extra que no viene con la descarga en sí del software. Por lo tanto, y para este trabajo, hará falta su instalación.

Si se abre el desplegable que responde al título “Loads and Structures (TESS)”, encontraremos el elemento que da esencia a esta simulación en concreto: “Lump”.



Fifura 3-6 Elemento de la masa inercial “Lump” en Trnsys

Lump (Type 963): Dicho elemento se corresponde con lo que antes se denominó como masa inercial o sistema concentrado. Haciendo doble click sobre el mismo, se abrirá una nueva ventana en la que estarán contenidos los parámetros, inputs, y outputs, principalmente.

- Parámetros: Se nos ofrecen los correspondientes a la siguiente figura.

		Name
1		Number of heat gains
2		Capacitance
3		Surface area
4		Initial temperature

Figura 3-7 Parámetros a introducir en la masa inercial en Trnsys

A pesar de leer “**heat gains**” (ganancias de calor), nosotros tenemos que trabajar con pérdidas de igual manera. Ésto no supone ningún problema, puesto que bastará con añadir el signo negativo delante del parámetro que corresponda. Dicho lo cual, se marcará con un “dos” la casilla de valor de la misma, en concordancia con lo explicado en otro apartado mediante la Figura 3-2, la cual engloba dos pérdidas diferenciadas. Por otro lado, sí que se cuenta en efecto con la ganancia debida a la radiación recibida, lo cual se introducirá como un sumando más. Más adelante se desarrollarán las ecuaciones necesarias. En cuanto a lo

que la **superficie** (correspondiente al área del panel PV-T) y la **temperatura inicial** respectan, son datos conocidos (el segundo término se establecerá, por ejemplo, en la temperatura ambiente al comienzo de la simulación). Por último, la **capacitancia** será tasada en 9 KJ/K .

- Inputs: Reflejados en la figura mostrada a continuación:

		Name
1		Environment temperature
2		Heat transfer coefficient
3		Heat gain-1
4		Heat gain-2

Figura 3-8 Entradas de la masa inercial en Trnsys

Se aprecia la fuente azul de estas entradas. Ésto nos servirá para darnos cuenta de cuáles de ellas no están referenciadas y cuales sí, en cuyo caso se cambiará la fuente azul por una negra automáticamente. La temperatura del medio ambiente tendrá conexión con el fichero meteorológico pertinente; las ganancias, con las ecuaciones establecidas de cada una de ellas (ojo con las unidades); y el coeficiente de transferencia de calor se establecerá en “0” en nuestro caso.

- Outputs: De las diversas salidas que se nos ofrece, sólo se utilizará la de “Average temperature”, que responde a la siguiente descripción: La temperatura del lump por cada *time step*. Por lo tanto, la trataremos como la T_{lump} mencionada anteriormente. Cabe destacar que se trata de una temperatura devuelta en grados centígrados. La misma, como se explicó en su momento, alimentará a las dos ecuaciones para resolver las pérdidas tanto por convección como por radiación.

Ecuaciones: Cuando se desee introducir una ecuación, no hay que buscar en la librería, sino en la barra de herramientas superior: “Assembly - Insert New Equation”. Aunque nuestras principales ecuaciones serán dos -las que alimenten a las “heat gains”-, más adelante se verá que son requeridas algunas más, a veces sencillamente por la comodidad de descomponer el problema en partes más simples.

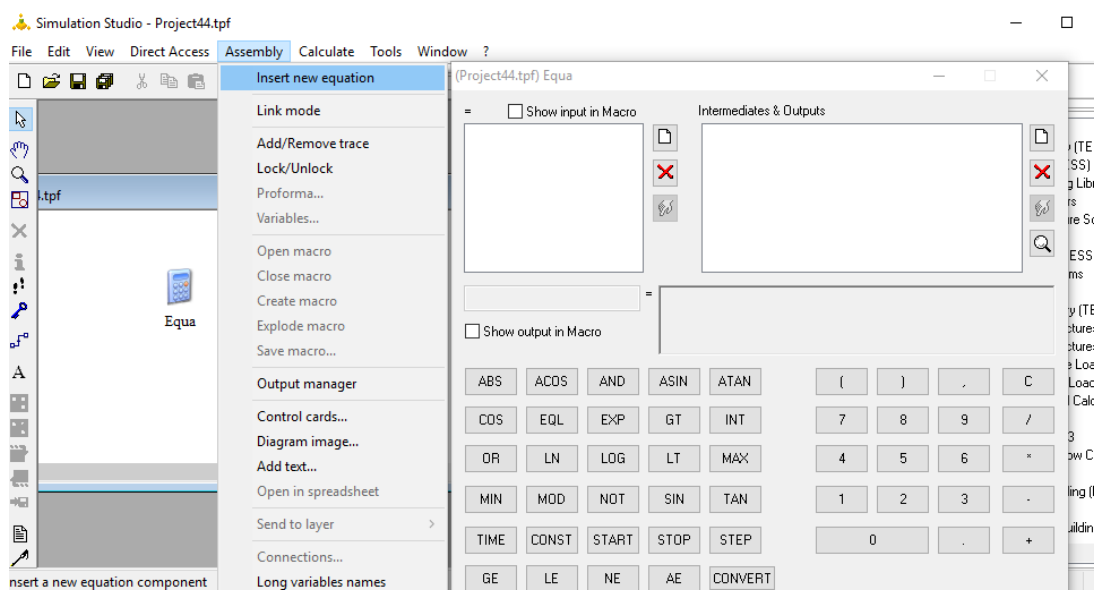


Figura 3-9 Cómo insertar una ecuación y presentación en pantalla

El mecanismo para hacer funcionar este elemento queda explicado en estas líneas. Haciendo doble click sobre la calculadora que aparece en pantalla, se abrirá, valga la redundancia, una ventana con la calculadora en sí, tal y como se muestra en la Figura 3-9. En la parte derecha de la misma se establecerán las salidas o, dicho de otro modo, los parámetros a los que se quiera llegar (se introducen a través del dibujo del folio encima de las aspas rojas).

Ahora bien, por otra parte se definirán las entradas de las que depende dicho parámetro en la parte izquierda. Una vez definidas estas últimas, mediante una sencilla unión, se pueden conectar con datos encuadrados en otros elementos. Por ejemplo: Se define una entrada que sea “temperatura ambiente” y se conecta el archivo meteorológico que la contenga a dicha entrada. Se muestra un ejemplo en la siguiente figura:

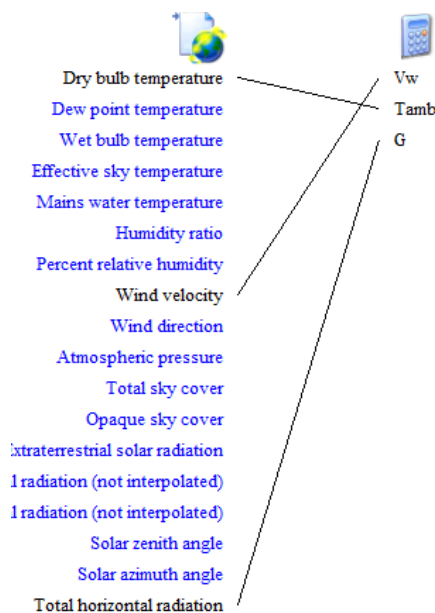


Figura 3-10 Ejemplo de definición de entradas en una ecuación

Una vez se tengan todas las entradas asociadas a un valor, es hora de definir la ecuación en sí. Para ello se irán añadiendo tanto las salidas como las entradas deseadas a través de la representación gráfica de una mano señalando, situada debajo de las mismas aspas rojas (Figura 3-9).

A continuación, iremos desarrollando las distintas ecuaciones empleadas, aclarando de igual manera el concepto del que provienen algunos términos cuando sea necesario.

a) Pérdidas 1: Como ya se adelantó, esta ecuación tendrá en cuenta el comportamiento del sistema de puertas hacia fuera; es decir, aquí se encuadrarán la radiación recibida, la pérdida por convección de la superficie del lump con el exterior y la pérdida debido a la radiación emitida por el mismo. La ecuación (7), contenida al comienzo de la metodología, expresa la fórmula que se debe usar de una manera genérica. Ésta, si la extrapolamos a nuestro caso, queda de la siguiente manera:

$$HG1[\dot{J}/S] = \alpha GA_{pv} - h_o A_{pv}(T_l - T_{amb}) - \varepsilon \sigma A_{pv}(T_l^4 - T_{sky}^4) \quad (9)$$

Parámetro	Valor	Unidades
Absortividad (α)	0,7	-

Área panel (A_{pv})	0,454	m^2
Emisividad (ε)	0,7	-
Cte. Boltzmann (σ)	$5,67 \cdot 10^{-8}$	W/m^2K^4
Coef.convección (h_o)	$5,8 + 3,95V_w$	W/m^2K
T_{sky}	$0,0552 T_{amb}^{1,5(1)}$	K

Tabla 3-1 Valor de los parámetros Heat Gain 1

(1) Se ha de introducir la temperatura ambiente en K .

Por otro lado, se deberá establecer una serie de relaciones: Tanto “G”, como “ T_{amb} ” y “ V_w ” estarán alimentados por el archivo que contenga los datos meteorológicos, mientras que “ T_{lump} ” lo hará a través del *type* correspondiente. Se vuelve a insistir en el tema de las unidades, ya que la mínima incoherencia en las mismas provocará un resultado erróneo. Para ello hemos de fijarnos en las ofrecidas en los archivos que importemos.

Por último, y también en relación a la radiación, es lógico pensar que ésta no incidirá de igual manera sobre una superficie si se varía su inclinación. Se observa esta afirmación en la Figura 3-11. Por lo tanto, cuando se tenga una superficie con cierta inclinación, habrá que multiplicar “G” por la relación trigonométrica correspondiente según su descomposición en los ejes equivalentes. En nuestro sistema en particular, dicha descomposición de la radiación no será necesaria, ya que se colocó en la torre con una disposición perpendicular a la incidencia.

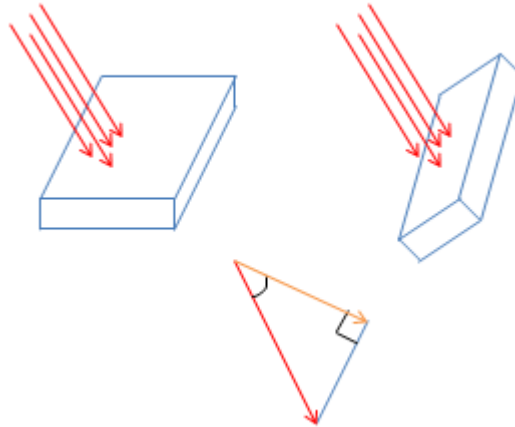


Figura 3-11 Ejemplo de incidencia “G” y descomposición

- b) Pérdidas 2: A pesar de responder estas pérdidas a la fórmula de convección ya citada, existen algunos conceptos que deben ser explicados para la correcta interpretación del problema planteado.

$$HG2[J/s] = -h_{in}(T_l - T_{airemedio})A_{pv} \quad (10)$$

Comenzando a definir la ecuación, el coeficiente convectivo del interior del sistema se va a tasar en $35 W/m^2K$ constantes.

Una vez establecido el mismo, el siguiente problema será calcular la temperatura media del aire en el interior del conducto. A continuación de la definición de la ecuación (7), queda

explicado el porqué de la simplificación que supone la temperatura media interior, en lugar de ir aplicando la ecuación en cada punto del interior. Dicho esto, el mecanismo a seguir será el de una simple media aritmética entre las temperaturas de entrada y la de salida. La primera de todas proviene del archivo meteorológico, y la segunda es la que se busca.

Entonces, ¿cómo se obtendrá un resultado si se está alimentando una ecuación precisamente con él? Se verá mas adelante que, a priori, el programa nos devolverá un error recursivo, al no ser capaz de resolver las ecuaciones por este motivo. Ante este fallo, en el próximo apartado se dará una solución.

Archivo meteorológico: Se ha ido viendo cómo varios de los parámetros tienen que ser alimentados por un archivo externo que contenga los datos. De igual manera, también se explicó la clase de archivo que debía ser éste para una correcta interpretación del programa (TMY o archivo de texto).

En la siguiente figura se muestran las instrucciones a seguir para, a través de la librería, acceder al *type* que sea capaz de leer un archivo TMY:

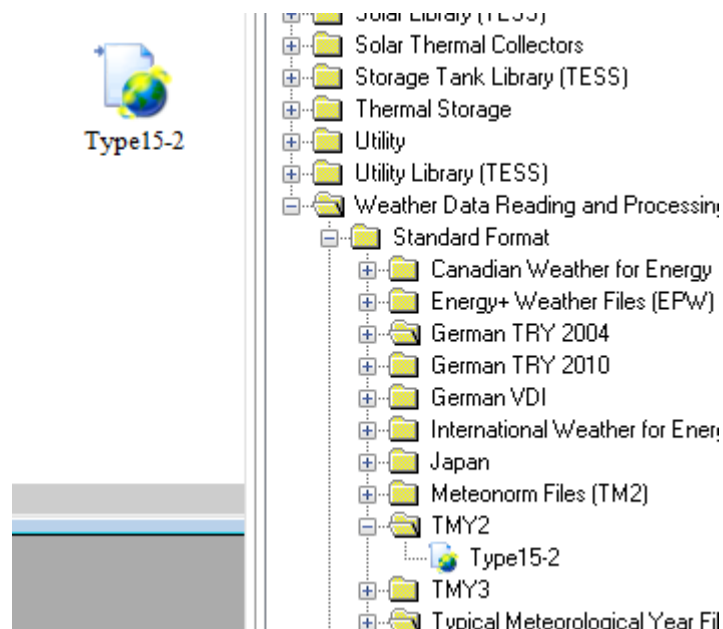


Figura 3-12 Cómo insertar archivo meteorológico TMY

En este *type* no será necesario modificar nada, ya que los datos estarán ya establecidos en él. Por lo tanto, simplemente habrá que establecer las conexiones deseadas. No obstante, el programa debe saber la ubicación de este elemento, la cual aportaremos al hacer click dos veces sobre el mismo e irnos al desplegable titulado “external files”.

Por otra parte, si lo que se desea es insertar un *type* que lea los datos contenidos en un archivo de texto: Librería - Utility - Data Readers - Generic Data Files - First Line in Simulation Start - Free Format - *type 9a*. Hay otras posibilidades de formato, éstos pasos se seguirán según la distribución por columnas tabuladas y filas explicada en apartados anteriores.

Gráfica (plotter): Se trata de una herramienta muy útil, tanto para el resultado final como para ir comprobando posibles errores de cálculo a medida que se avanza en la simulación. Se pueden añadir tanto gráficas sólomente como con un icono añadido de una impresora, que significa que los datos obtenidos serán enviados al archivo de texto que le ordenemos.

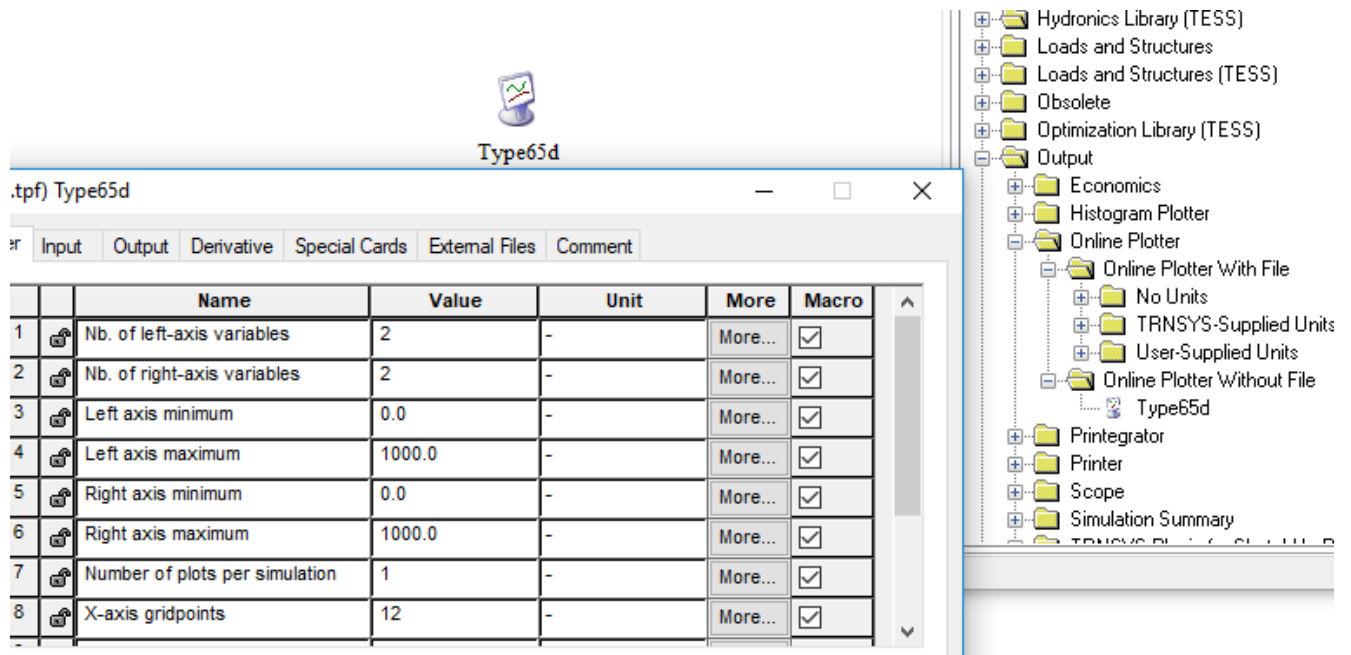


Figura 3-13 Cómo introducir un plotter en Trnsys

En la Figura 3-13 se ve como, pinchando dos veces sobre este type, se abrirá una ventana que contiene una serie de desplegables, en los cuales iremos introduciendo los valores que consideremos oportunos. Por ejemplo: número de variables en cada eje, valores máximos y mínimos en cada uno de ellos, en cuántos intervalos queremos que se divida el eje de las “X”, etc.

En “inputs” se podrá dar nombre a las variables representadas.

Establecer una conexión para enlazar, por ejemplo, una ecuación a esta clase de *type* es sencillo: se unirá la primera al segundo y se irá relacionando cada salida con la variable establecida correspondiente.

Las gráficas se mostrarán una vez activado el “run simulation”, y se nos permitirá hacer aumentos en zonas deseadas, cambiar los valores máximos y mínimos para centrar resultados, ver resultados numéricos teniendo pulsada la tecla “shift”, modificar el fondo y el grueso de las líneas, etc.

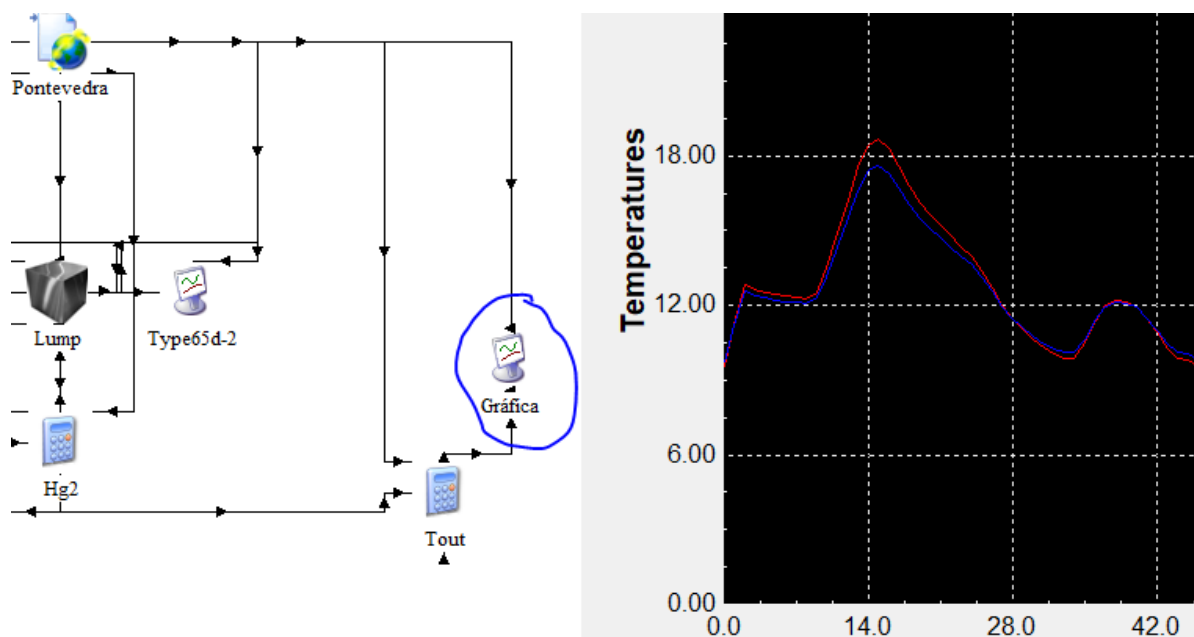


Figura 3-14 Ejemplo entrada de dos temperaturas y representación gráfica

Run simulation: Finalmente, el último paso es el de arrancar la simulación. Éste es un momento clave, puesto que el programa nos resaltaré los errores en caso de haberlos. Por la misma razón, se recomienda a la persona que haga uso del programa, ir simulando poco a poco y comprobar el correcto funcionamiento del proyecto, ya que de hacerlo una vez se dispone de todo el lay-out, puede resultar un poco caótico solucionar los mismos.

Antes de poner en marcha la simulación, es preciso aportar al programa algunos valores, de entre los más importantes: a qué hora queremos que empiece y termine la misma, y el time step deseado (intervalo que afecta al número de soluciones obtenidas). Téngase en cuenta que si se añade un archivo de texto, la primera fila será interpretada como hora “0”, además las filas deben ajustarse a un intervalo de tiempo constante.

Todo ello se realizará pulsando “control cards”, ubicado de acuerdo a la siguiente figura:

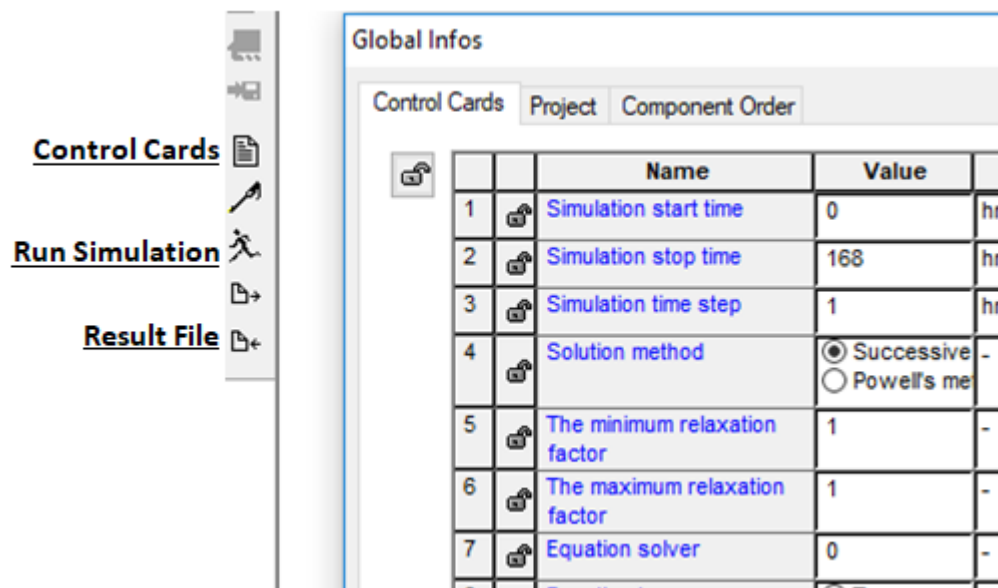


Figura 3-15 Ejemplo de cómo activar la simulación en Trnsys

Nótese que, en el ejemplo de la figura, se están simulando 168 horas, lo cual no se corresponde necesariamente con la primera semana de enero, puesto que, como se verá más adelante, en nuestro caso el valor “0” hace referencia al primer dato del archivo de texto importado (equivalente al 18 de enero). Dicho lo cual, estos parámetros dependerán del intervalo que se quiera simular y de cómo estén introducidos los datos.

En la misma Figura 3-15, quedan reflejados otros dos pulsadores. Activando el primero, “run simulation”, el programa comienza a resolver las ecuaciones. Si hubiera algún fallo, el mismo nos lo indicaría y, a través de “result file”, seremos capaces de localizar el error para su correspondiente corrección.

3.2.4 Lay-out y conexiones

En este apartado se presenta la disposición final previa a la resolución de las ecuaciones, así como algunas de las relaciones establecidas entre los diferentes *types*.

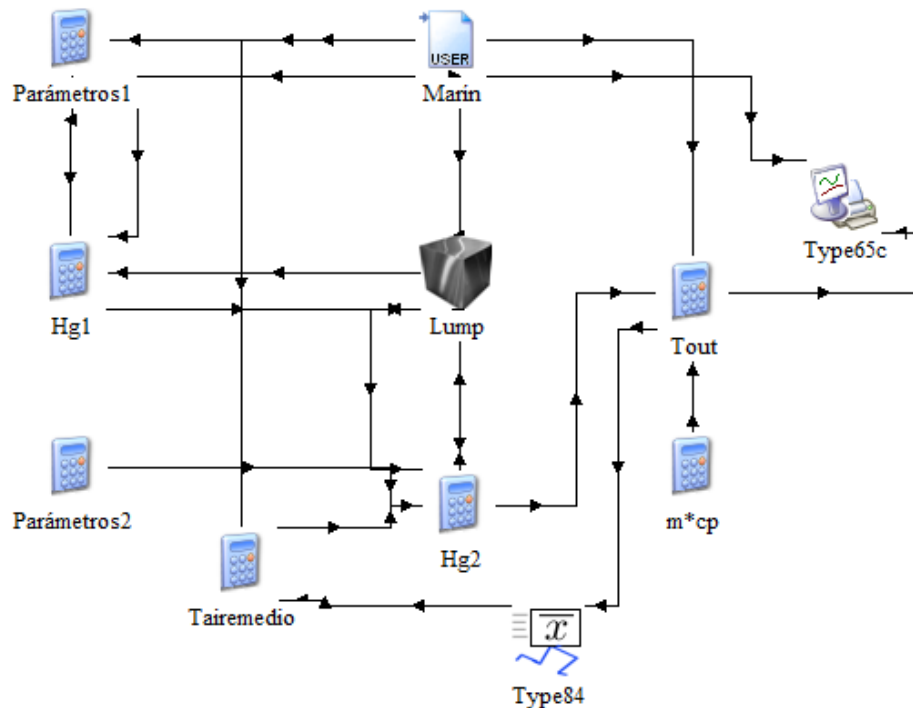


Figura 3-16 Lay-out final

En la Figura 3-16 quedan representados los diferentes elementos que se definieron con anterioridad, salvo el *type84*, que se explicará en el siguiente subapartado. Nótese que la misma sólo contempla una gráfica a modo de ejemplo, pero se podría poner tantas como se desee según lo que se quiera reflejar. En este caso representa, como se verá más adelante, la clave de la simulación: la representación gráfica que compara la temperatura de salida tanto simulada como real.

En este caso los resultados serán enviados a un archivo de texto (de ahí el icono de la impresora).

Comenzando por los datos importados, éstos han sido implantados mediante un archivo de texto en el que fueron ordenados mediante filas y columnas. Destacar que el mismo alberga tanto datos meteorológicos como datos recogidos por la instalación. Es preciso tener en cuenta algunos detalles para una correcta configuración de este *type*. Como se muestra en la Figura 3-17, el archivo a emplear tiene insertadas ocho salidas –de las noventa y ocho posibles-, de las cuales la 1, la 7, y la 8 (T_{in} , radiación solar, V_{wind}) serán las que alimenten los parámetros correspondientes; por otro lado, nos basaremos en algunas de las otras salidas para comprobación de resultados entre lo simulado y lo real.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files
					
					
					
		Name	Value	Unit	
1		Tin	0	any	
2		TIump	0	any	
3		Tout	0	any	
4		VO	0	any	
5		AC	0	any	
6		QA	0	any	
7		SI	0	any	
8		Vvw	0	any	

Figura 3-17 Salidas del archivo meteorológico implantado

En cuanto a la ventana “*parameter*” de este mismo *type*, se insertarán datos como: número de filas a saltar cuando comience la simulación (en nuestro caso se marca “1”, debido a que la primera fila del archivo “txt” se corresponde con la cabecera), número de valores a leer (el número de columnas a barrer por el programa cada *time step*), el intervalo de tiempo en el que son introducidos los datos (en nuestro caso se pusieron horariamente; por lo tanto, se marca con un 1), etc. Por otro lado, es muy importante marcar la opción de no interpolar los datos, Figura 3-18, –mediante el valor (-1) - pues requerimos de datos instantáneos en este trabajo.

4		Time interval of data	1.0	hr
5		Interpolate or not?-1	-1	-
6		Multiplication factor-1	1.0	-
7		Addition factor-1	0	-
8		Average or instantaneous value-1	1	-
9		Interpolate or not?-2	-1	-
10		Multiplication factor-2	1.0	-
11		Addition factor-2	0	-

Figura 3-18 Parámetros a modificar en Trnsys del archivo implantado

Como se explicó, los parámetros son los encargados de alimentar las variables, o constantes, que definen las ecuaciones. A su vez, éstas serán alimentadas tanto por el archivo que alberga los datos meteorológicos como por la temperatura devuelta del *lump*.

A continuación, se muestra la ecuación y las relaciones mediante las cuales se obtuvo T_{out} :

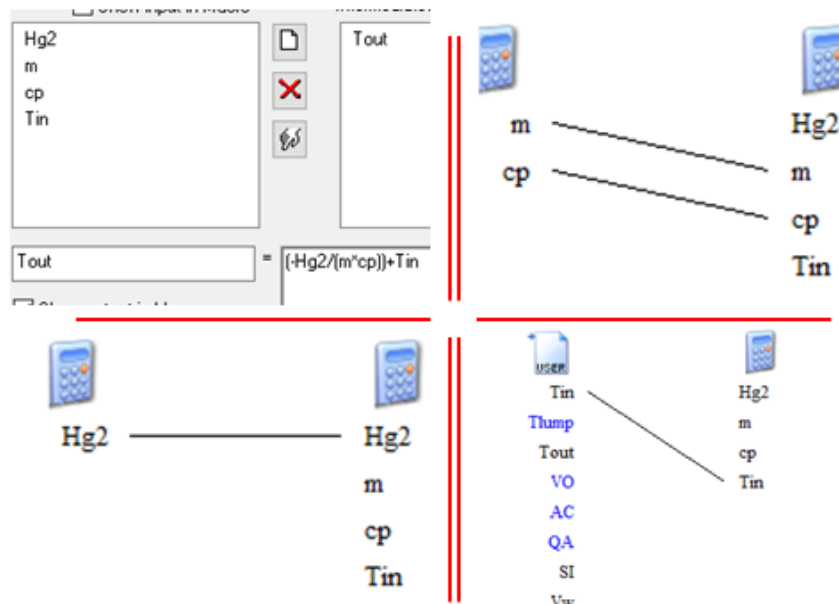


Figura 3-19 Esquema de cómo llegar a la temperatura de salida a través del lay-out

En la Figura 3-19 se reflejan dos parámetros directamente relacionados con la ecuación de velocidad de transferencia de calor, como son el flujo másico y el calor específico.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal (Q)	60 ⁽¹⁾	m^3/h
Densidad aire (ρ_{aire})	1 ⁽²⁾	Kg/m^3
Calor específico (cp)	1012 ⁽³⁾	$J/Kg \cdot K$

Tabla 3-2 Parámetros para obtener la velocidad de transferencia de calor

- (1) El sistema cuenta con dos ventiladores a la entrada del mismo, como refleja la Figura 1-1. Cada uno de ellos permite un máximo flujo de $8,2 g/s \approx 30 Kg/h$, considerando la densidad del aire que ofrece la tabla. Por lo tanto, el caudal resultante será dos veces dicho valor.
- (2) Densidad tomada de [1].
- (3) Calor específico del aire en condiciones típicas de habitación, suponiendo una altura de 194m (promedio de la población mundial), una temperatura de 23°C, 40,85% de humedad y 760mmHg de presión [25].

Mediante los dos primeros parámetros mostrados en la Tabla 3-2, se obtiene el flujo másico deseado:

$$\dot{m} = Q \times \rho_{aire} = 0,0166 Kg/s \quad (11)$$

3.2.4.1 Error recursivo

En la Figura 3-16 se observa la existencia de un *type* hasta ahora no explicado. Se trata del elemento que se ha de poner para que al arrancar la simulación, el programa no devuelva un error. ¿A qué se debe dicho error? Se asienta sobre el hecho de no poder alimentar un parámetro a través de él mismo.

Ésto, citado en apartados anteriores, sucede cuando se trata de alimentar la temperatura media con T_{out} , temperatura que queremos hallar. Por ello, es imposible hacer una conexión directa.

No	Severity	Time (h)	Unit	Type	Message
1	Notice	0,000	0	0	Message : The TRNSYS Executable (TRNExe.exe) and main DLL (TRNDLL.dll) are located in "C:\Trnsys17\
2	Error	0,000	0	0	TRNSYS Message 420 : The following variable defined in an EQUATIONS or CONSTANTS card could not be sol
3	Error	0,000	0	0	TRNSYS Message 420 : The following variable defined in an EQUATIONS or CONSTANTS card could not be sol
4	Error	0,000	0	0	TRNSYS Message 420 : The following variable defined in an EQUATIONS or CONSTANTS card could not be solved as this variable depends on either an undefined EQUATION or CONSTANT name or depends on another EQUATION or CONSTANT that cannot be solved. For example A=B and B=A would trigger this error Reported information : TAIREMEDIO

Fifura 3-20 Aviso de trnsys ante un error recursivo

Ante esta situación, entra a jugar el *type84*, ubicado en: “Librería-Utility-Moving Average”. El mecanismo del mismo es sencillo, ya que su función es la de calcular la media del parámetro introducido durante los anteriores “*N*” *time steps*. De esta manera, reemplazando “*N*” por el valor 1,

este *type* devolverá la media del valor de salida justamente anterior; es decir, nos será devuelto exactamente el valor de T_{out} del *time step* anterior (lo que necesitamos).

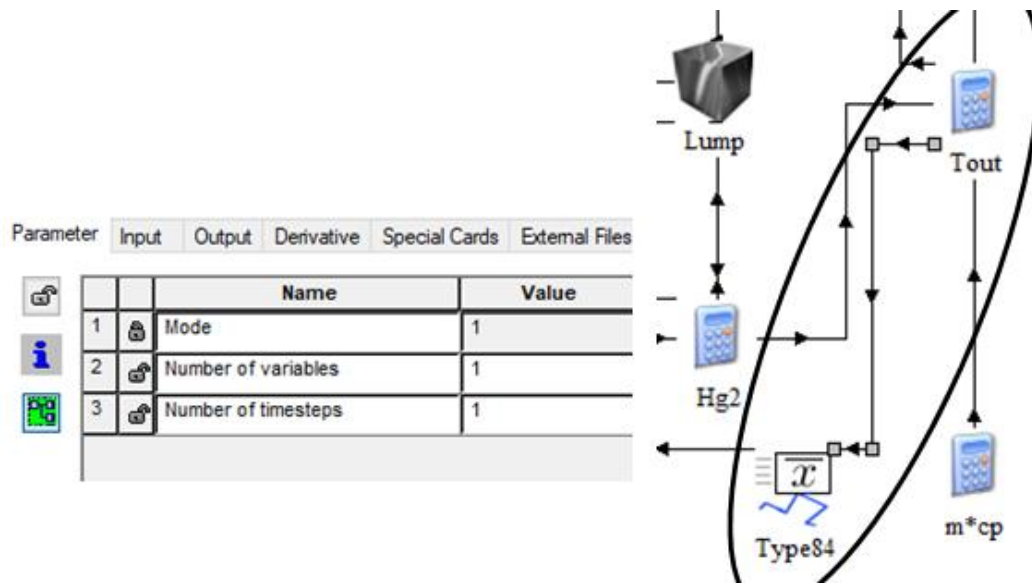


Figura 3-21 Type para evitar el error recursivo

3.2.5 Run Simulation

Establecido todo el modelo, es hora de activar la simulación para llegar a una solución. Para ello, definimos los parámetros necesarios en “Control Cards” como se dijo a través de la Figura 3-15. Nos basaremos en los mismos parámetros mostrados mediante la misma, salvo que esta vez se introducirá el valor de 192 en el “Simulation Stop Time”, correspondiendo estas horas al periodo comprendido entre el 18 y 25 de enero (8 días).

4 RESULTADOS

A lo largo de este apartado se analizarán los resultados según diferentes perspectivas, logrando entender lo que ocurre en cada una de las gráficas obtenidas.

4.1 Comparación de datos mediante Trnsys

Como se explicó, *Trnsys* ofrece la posibilidad de representación gráfica según las salidas que le ordenemos. Basándonos primero en este software, éstas se reflejan a continuación.

4.1.1 Temperatura de salida simulada frente a la experimentada

El objetivo final de este TFG responde a este subapartado, en el que se comparan las temperaturas de salida real y simulada

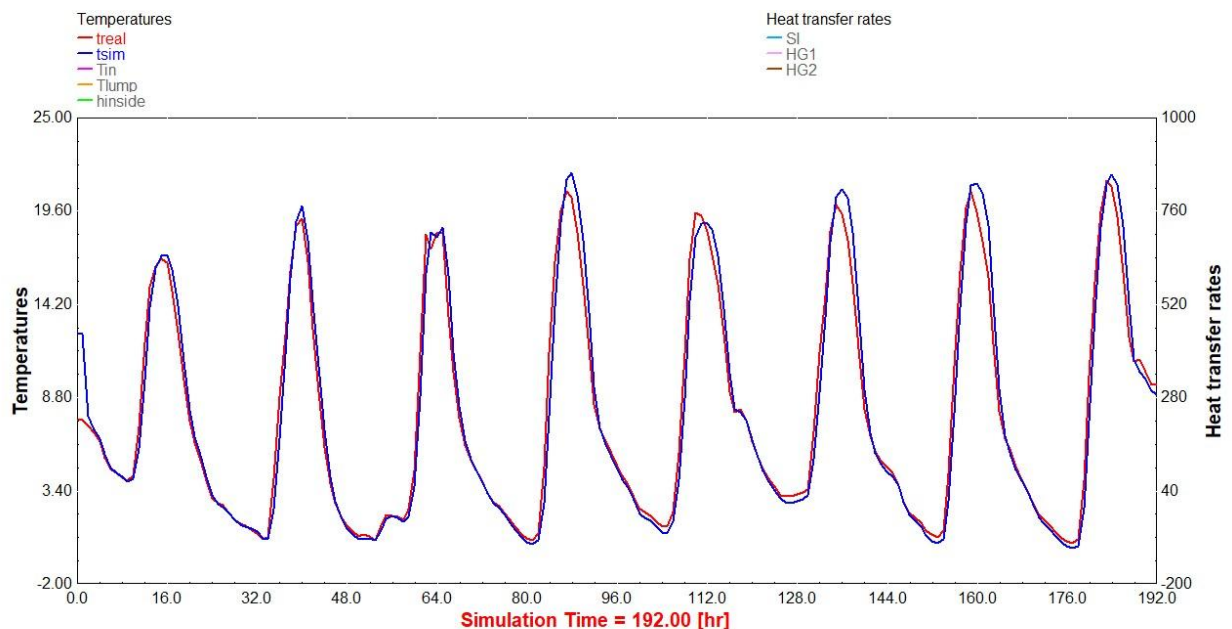


Figura 4-1 Gráfica comparativa entre temperatura de salida real y simulada

En la Figura 4-1 se muestra en rojo la temperatura real, mientras que la simulada lo hace en color azul. Se pueden apreciar de igual manera los ocho picos correspondientes a los ocho días simulados y a los periodos de máxima radiación recibida.

Como se puede observar, se obtiene un resultado satisfactorio, siguiendo ambas temperaturas la misma tendencia y unos valores muy aproximados. Más adelante se exportarán los resultados a una hoja de cálculo Excel y se obtendrá el error entre ambas temperaturas.

4.1.2 Temperatura de entrada frente a temperatura de salida

Una vez se ratifica la validación digital del panel, la siguiente tarea es estudiar el comportamiento del mismo de acuerdo al emplazamiento, en este caso Marín. De la variación resultante entre las temperaturas de entrada y salida dependerá la posibilidad de acondicionamiento térmico.

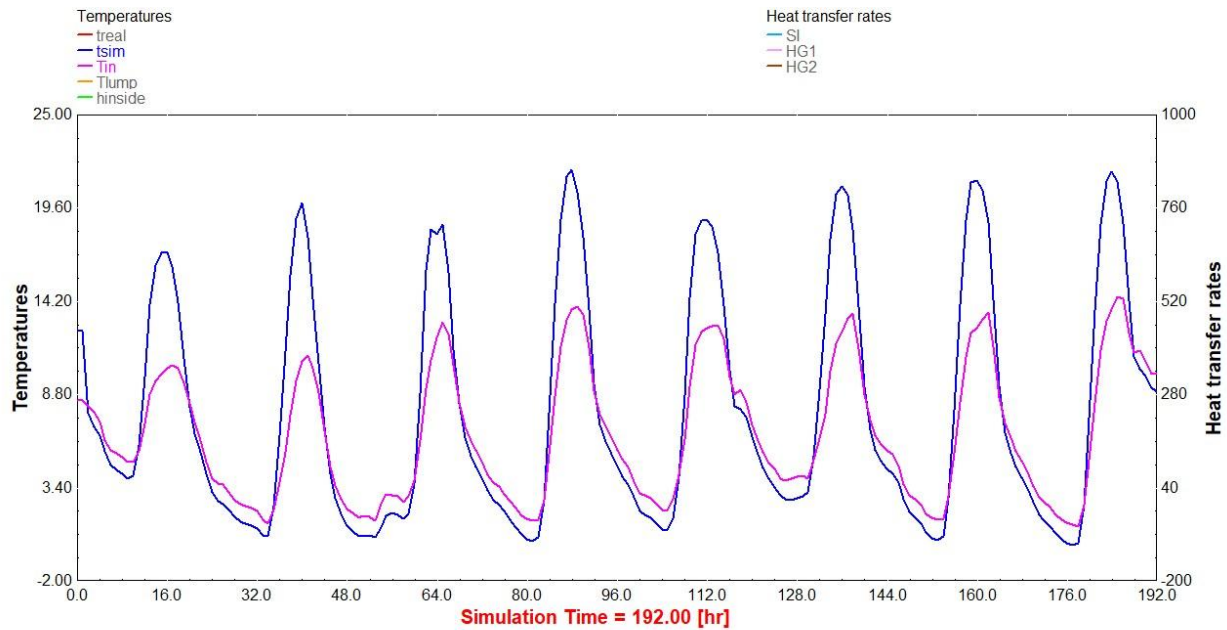


Figura 4-2 Temperatura de salida simulada frente a la de entrada

Mediante la Figura 4-2 se comprueba efectivamente la validez del sistema plasmado, puesto que se representa una mayor temperatura de salida que de entrada.

A continuación, mediante la Tabla 4-1, se definen los picos de la temperatura de salida según la hora simulada, la temperatura de entrada correspondiente, y el incremento de temperatura obtenido (remarcando el máximo y el mínimo).

Hora	Tout	Tin	Incremento
16	17,10	10,36	6,74
34	19,94	10,77	9,17
62	18,40	10,83	7,57
87	21,87	13,74	8,13
111	18,94	12,67	6,27
135	20,90	12,45	8,45
159	21,23	12,70	8,53
183	21,74	13,75	7,99

Tabla 4-1 Máximos de temperatura de salida simulada e incremento

Por lo tanto, mediante la misma tabla se concluye que, con las horas simuladas y la ubicación correspondiente, se llega a obtener un incremento de temperatura respecto a la de entrada de entre 6,27°C y 9,17°C correspondiente a las horas de máxima radiación recibida.

Periodo	Media T^{aout}	Media T^{ain}	Incremento
24h	7,74	6,59	1,24
$T^{aout} > T^{ain}$ (37,5%)	14,91	10,09	4,82

Tabla 4-2 Medias del incremento de temperatura según el periodo de muestreo

Por otro lado, si lo que se analiza son las 192 horas en conjunto, teniendo por tanto en consideración los periodos nocturnos en los que la temperatura de salida es menor que la de entrada, se obtiene una media del incremento de temperatura de 1,24°C de acuerdo con la Tabla 4-2. La misma, expresa de igual manera que si lo muestrado hace referencia únicamente a los períodos en los que el aire de salida gana temperatura (de lo contrario a través de un sensor se evitaría la entrada de aire al objeto a climatizar), ésto ocurre un 37,5% de las veces - 72 horas-, se llega a un incremento que responde a una media de 4,82°C.

Finalmente, es razonable el dato de que el sistema trabaje de acuerdo al fin deseado “sólo” un 37,5% de las horas, debido a que el periodo nocturno es el responsable de ocupar la mayor parte de ellas de acuerdo a la época del año simulada y, por lo tanto, se den menos horas de radiación solar.

4.1.3 Temperatura de salida frente a la temperatura de la masa inercial

Ya sabemos que la temperatura de entrada al sistema experimenta un incremento debido al fenómeno de convección producido en su interior. Dicho de otro modo, para que ésto se produzca, la temperatura de la masa inercial, o *lump*, debe estar a mayor temperatura.

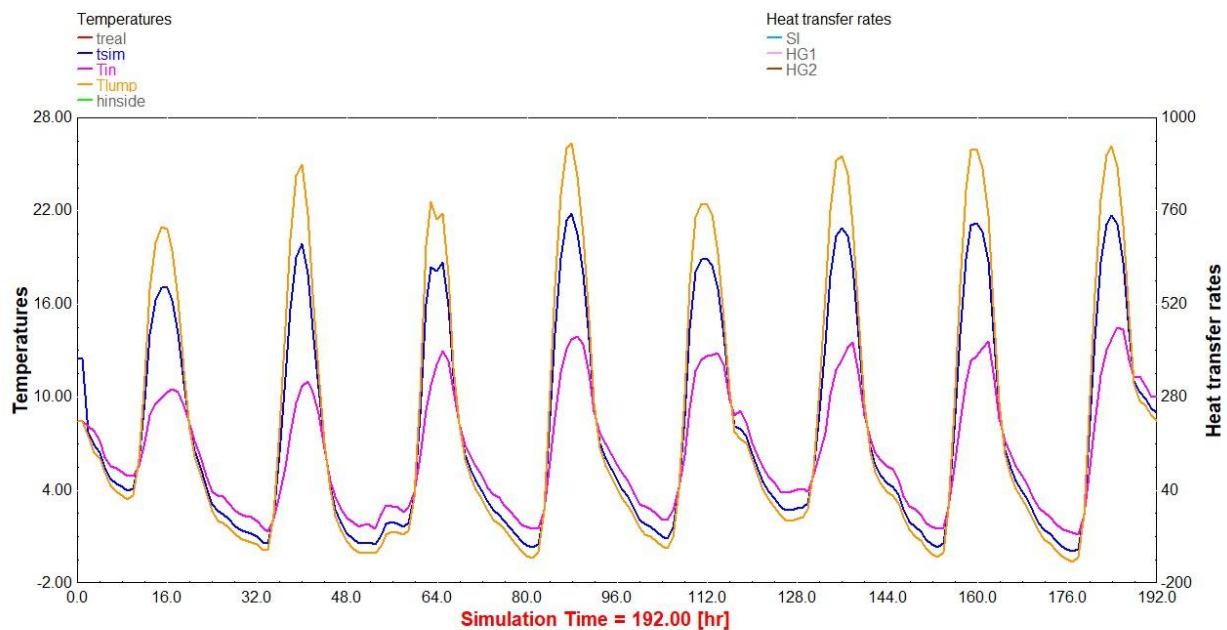


Figura 4-3 Gráfica de T^{aout} simulada, T^{a} masa inercial y T^{ain}

Pero, como se aprecia en la Figura 4-3, lo anterior no siempre ocurre, debido a que durante el periodo nocturno se observa una inversión en las temperaturas: la de entrada pasa a ser la mayor, seguida por la de salida, y finalmente la temperatura *lump* es la más baja. Esta situación se traduce en que el fenómeno de convección, durante el tiempo en que ésto se da, se dará al contrario de lo explicado: la temperatura del aire será la que transfiera calor a la masa inercial. Lógicamente, el mayor

responsable de que ocurra se trata de la radiación recibida que, como se muestra en la Figura 4-4, se desploma hasta valores cercanos a la unidad durante la noche.

Dicha figura se representa en conjunto con lo denominado “HG1”, apreciando su mutua concordancia (siendo este parámetro el representado mediante el color rosa).

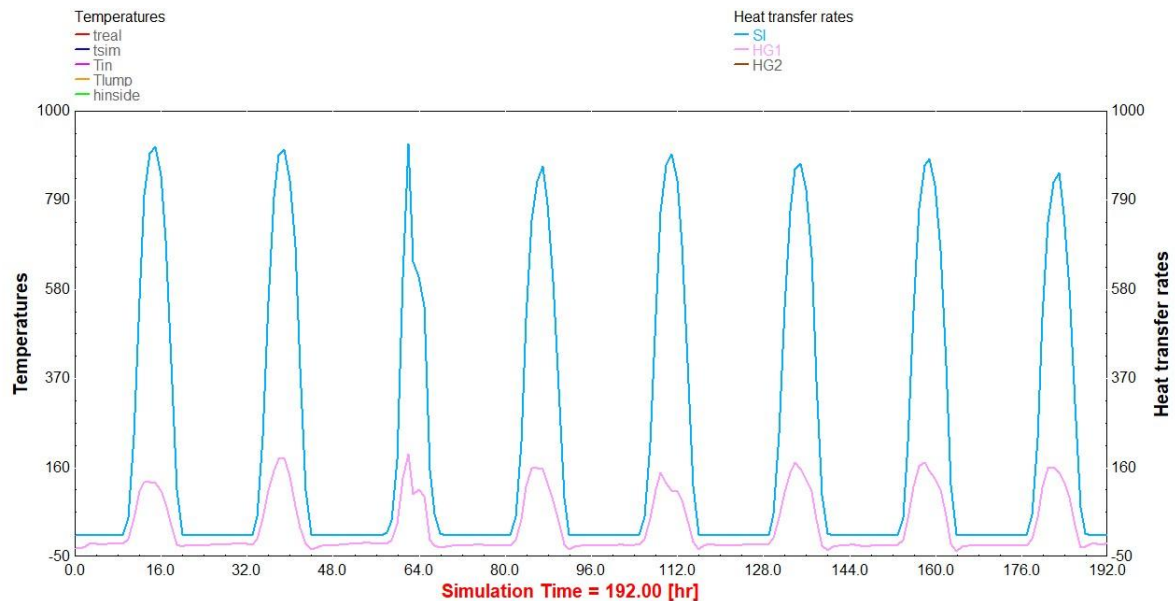


Figura 4-4 Radiación recibida y HG1

4.1.4 Análisis HG2 frente a temperatura de salida

La inversión en el fenómeno de convección también queda reflejada mediante lo que se denominó “HG2”. Ésta, se introdujo con un signo negativo, ya que se supuso como una pérdida de la masa inercial en beneficio del aire. Por lo tanto, cabe esperar que la gráfica de salida represente valores negativos de este parámetro cuando dicho aire vaya adquiriendo temperatura, siendo más negativo cuanto mayor sea este incremento de temperatura.

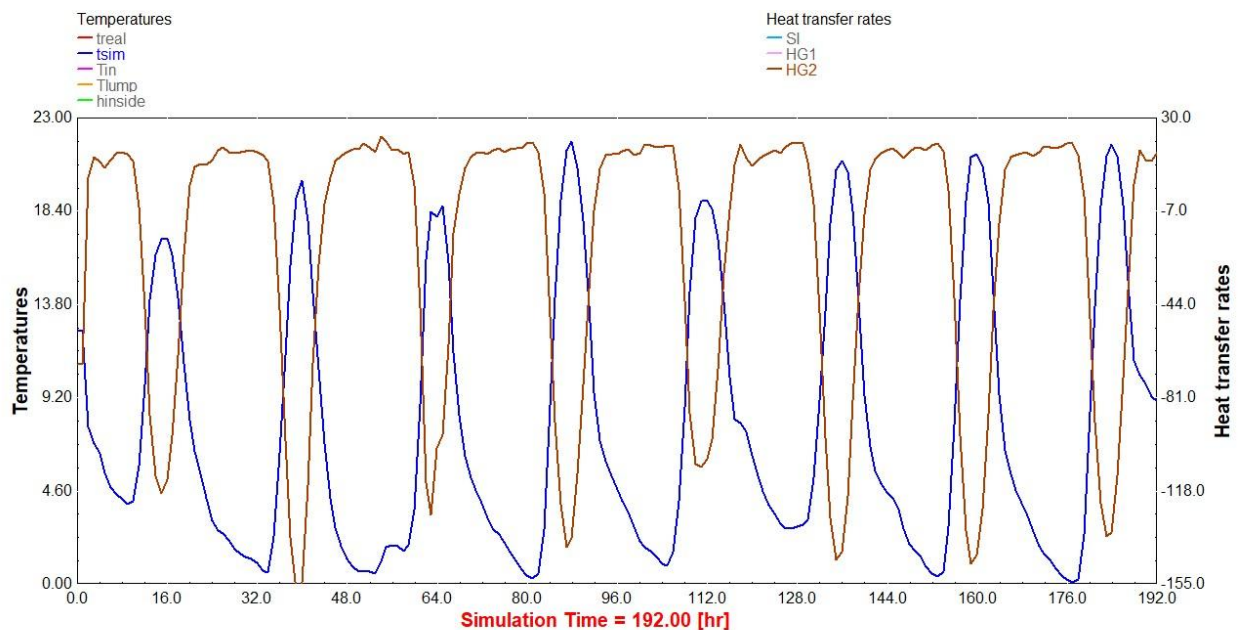


Figura 4-5 HG2 frente a la temperatura de salida

En la Figura 4-5 queda plasmado lo explicado en las líneas anteriores, localizando los valores de la temperatura de salida simulada a la izquierda de la misma, mientras que los de HG2 lo hacen a la derecha. Por otro lado y de manera opuesta a lo anterior, se refleja que esta transferencia de calor, HG2, se hace de signo positivo coincidiendo con las menores temperaturas de salida. Ésto nos vuelve a llamar la atención sobre que el fenómeno de convección se está llevando a cabo desde el aire hacia el *lump*, de nuevo durante el transcurso de la noche.

4.2 Comparación de datos mediante Excel®

Este software es una herramienta muy útil a la hora de realizar cálculos, los cuales se pueden introducir de una forma sencilla y, a través de ellos, sacar las gráficas o tablas oportunas. Dicho lo cual, se exportan los resultados obtenidos a una hoja de cálculo Excel.

En la Tabla 4-3 quedan reflejados tanto los valores como el comportamiento similar entre las temperaturas de salida (la simulada y la real).

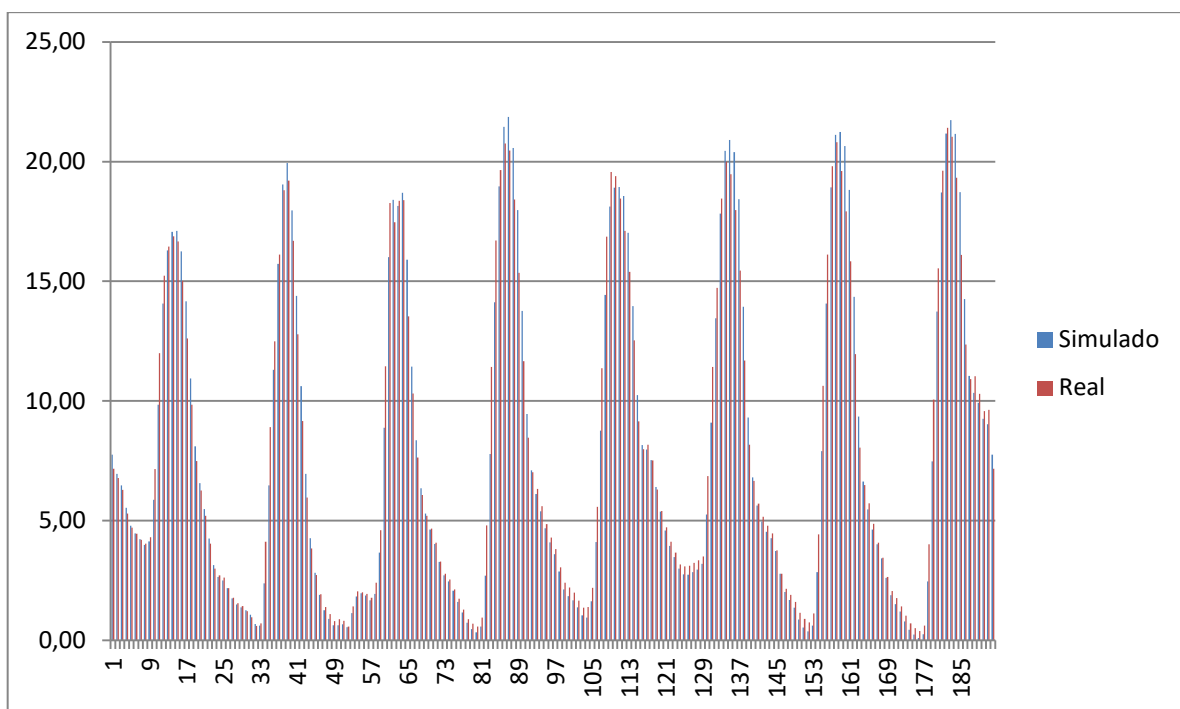


Tabla 4-3 Temperatura de salida simulada frente a la real mediante Excel

4.2.1 Estimación del error en la simulación

Para la estimación del error de los resultados obtenidos en la simulación hemos utilizado dos estimadores: el error medio absoluto (MAD) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Además, calcularemos el coeficiente de correlación (r^2).

RMSE: Mediante la fórmula “ERROR.TÍPICO.XY” se devuelve el error típico del valor de “y” para cada “x” de la regresión. Se trata de una medida del error cometido entre el pronóstico de valor “y” para un valor individual de “x”, siendo el primer parámetro un rango de datos dependientes y, el segundo, independientes. La ecuación para el error típico del valor “y” pronosticado es la siguiente:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (12)$$

MAD: El error absoluto medio se obtiene de la siguiente expresión matemática:

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (13)$$

n : Número de medidas (192 en nuestro caso).

Y : Resultados de la temperatura de salida de la simulación.

X : Datos reales de la temperatura de salida.

Datos Valores

n 192

$\bar{x}$ 7,78

$\bar{y}$ 7,75

Tabla 4-4 Valores característicos de la muestra

El cálculo de dichos parámetros ha sido realizado en Excel y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

	A	B	C	D	H	I	J	K
1	TIME	Modelo	Real	Error				
2	1	7,77	7,17	-0,60	RMSE	1,08	oC	
3	2	6,96	6,79	-0,17	MAD	0,72	oC	
4	3	6,48	6,29	-0,19	Coeficiente correlacion	0,99		
5	4	5,54	5,31	-0,23				
6	5	4,79	4,72	-0,07				
7	6	4,47	4,46	-0,01				
8	7	4,23	4,21	-0,02				
9	8	3,99	4,04	0,05				
10	9	4,13	4,31	0,18				
11	10	5,88	7,17	1,29				
12	11	9,85	12,00	2,14				
13	12	14,07	15,23	1,16				
14	13	16,29	16,45	0,16				
15	14	17,07	16,88	-0,19				
16	15	17,10	16,66	-0,44				
17	16	16,25	15,02	-1,24				
18	17	14,16	12,61	-1,55				
19	18	10,94	9,85	-1,10				
20	19	8,11	7,50	-0,62				
21	20	6,58	6,26	-0,32				
22	21	5,49	5,21	-0,28				
23	22	4,26	4,04	-0,22				
24	23	3,15	3,01	-0,15				
25	24	2,66	2,72	0,06				
26	25	2,51	2,63	0,12				
27	26	2,18	2,19	0,00				
28	27	1,76	1,78	0,02				

Figura 4-6 Cálculo de estimadores de error

En vista del resultado obtenido mediante la Figura 4-6, se devuelve un RMSE con valor 1,08°C, un MAD de 0,72°C y con un coeficiente de correlación positivo de 0,99.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos, se concluye que se alcanzan con éxito los objetivos descritos en la introducción de este TFG:

- (i) Es posible la simulación del sistema propuesto a partir de la modelización del panel PV-T como una masa inercial.
- (ii) Se ha obtenido una buena correspondencia entre los valores arrojados por la simulación y los medidos en el banco de ensayos. El error obtenido, de 1,08°C en según el estimador RMSE y de 0,72°C de acuerdo al estimador MAD y la calidad de la regresión, con un coeficiente del 0,98, se consideran razonables para su utilización en la predicción del comportamiento del sistema en condiciones climatológicas diferentes a las utilizadas en la validación.
- (iii) El sistema propuesto es capaz de aumentar la temperatura del aire de entrada una media de 4,82°C con valores máximos comprendidos entre 6,27°C y 9,17°C. Por tanto, la solución propuesta representa una excelente opción para la climatización de pequeñas estancias.

5.2 Líneas futuras

En base a los resultados obtenidos, se plantean, como posibilidad, las siguientes líneas futuras:

El estudio desde el punto vista eléctrico de sistema validado, ya que de igual manera el panel instalado en la ENM recogió datos como el voltaje en circuito abierto y la intensidad en corto circuito. Estos parámetros, junto a otros aportados por el fabricante, se emplean para obtener datos como la potencia y rendimiento eléctricos.

El análisis del impacto que tendría la utilización de paneles PV-T en la climatización de las tiendas de campaña usadas por la Infantería de Marina, cuyo comportamiento térmico ha sido modelado dos años atrás por un antiguo alumno del centro. Éste plasmó en su TFG los requerimientos térmicos por persona y tienda, con lo que se puede llegar a comprobar la viabilidad mediante el resultado obtenido en el presente trabajo.

Una vez probados los resultados en la ubicación donde se llevó a cabo el trabajo, Marín, y de acuerdo a las necesidades de la Infantería de Marina española, se deja abierta la posibilidad de analizar el desempeño de este modelo en aquellas zonas geográficas en las que ésta se halla o pudiera hallarse desplegada.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Ulloa, G. Rey, J. M. Nuñez y L. Cheng Xian, AHP-based design method of a lightweight, portable and flexible air-based PV-T module for UAV shelter hangars, Pontevedra, 2018.
- [2] Acciona, «La importancia de las energías renovables,» [En línea]. Available: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>. [Último acceso: 15 Enero 2018].
- [3] R.-R. T. d. M. Ambiente, «Retema,» 7 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.retema.es/articulo/central-de-trigeneracion-con-biomasa-y-energia-solar-para-uso-industrial-en-la-fabric-F2UUa>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [4] E. Renovables, «Energía Solar Térmica vs fotovoltaica,» 7 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/solar-termica-vs-fotovoltaica/>. [Último acceso: 15 Enero 2018].
- [5] e.-. E. Renovables, «Funcionamiento de la energía solar térmica,» Ekidom S.L., [En línea]. Available: <http://www.ekidom.com/funcionamiento-de-la-energia-solar-termica>. [Último acceso: 15 Enero 2018].
- [6] E. Solar, «Energía Solar Fotovoltaica,» 21 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [7] P. S. Barcelona, «Mapa de la radiación solar en Europa,» 14 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.panelessolaresbarcelona.com/mapa-de-la-radiacion-solar-en-europa>. [Último acceso: 17 Enero 2018].
- [8] I. d. E. Solar, «Gráficos significativos energía solar fotovoltaica,» Enero 2017. [En línea]. Available: http://www.ies.upm.es/sfs/IES/IES-UPM/Portada/2017_01_17%20datos%20fotovoltaica%20en%20Espa%C3%B1a.pdf. [Último acceso: 17 Enero 2018].
- [9] S. Technology, «La radiación solar,» [En línea]. Available: <http://www.aros-solar.com/es/la-radiacion-solar>. [Último acceso: 17 Enero 2018].
- [10] J. M. Sancho Ávila, J. Riesco Martín, C. Jiménez Alonso, M. Sánchez de Cos Escuin, J. Montero Cadalso y M. López Bartolomé, «Atlas de radiación solar en España,» 24 Abril

2012. [En línea]. Available: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf. [Último acceso: 17 Enero 2018].
- [11] A. Española, «Plan de eficiencia energética en la Armada española,» [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenosmedioambiente/prefLang-es/03CambioClimatico>. [Último acceso: 7 Febrero 2018].
- [12] E. Renovables, «Tipos de paneles fotovoltaicos,» 25 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>. [Último acceso: 16 Enero 2018].
- [13] S. Europe, «Tipos de paneles solares en el sector fotovoltaico,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/tipos-de-paneles-solares-fotovoltaicos/>. [Último acceso: 17 Enero 2018].
- [14] Blanca, «Los mejores paneles solares,» 14 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://erenovable.com/los-mejores-paneles-solares/>. [Último acceso: 17 Enero 2018].
- [15] R. Garay, E. Galian y G. Torresan, «Estudio preliminar de paneles solares con sustrato flexible,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 6, nº 1, 2002.
- [16] M. A. G. Bernal, «Aplicación de la tecnología fotovoltaica de capa fina en empresas del sector logístico,» Junio 2014. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23488/Memoria.pdf>. [Último acceso: 17 Enero 2018].
- [17] M. Pérez García, F. Cabrera, J. Sánchez Molina y F. Rodríguez, «Energía solar para invernaderos,» 26 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/151916-Energia-solar-invernaderos-enfoque-basado-innovacion-sistemas-redes-energeticas.html>. [Último acceso: 18 Enero 2018].
- [18] D. González Peña, C. Alonso Tristán, M. Díez Mediavilla y A. Pérez Burgos, «Clasificación de los paneles solares híbridos (PVT),» de *9º Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica*, Cartagena, 2015.
- [19] Ecomesh, «Panel Solar Híbrido,» Zaragoza, 2015.
- [20] Y. A. Çengel y G. A. J., *Transferencia de calor y masa*, México D.F.: The McGraw-Hill, 2011.
- [21] P. Eguía Oller, J. M. López Suárez, A. Quicler Costas y L. M. López Ochoa, *Simulación de Edificios con Trnsys17*, Vigo, 2012.
- [22] J. J. Hernández Serrano, *Estudio de cargas térmicas e idoneidad de equipos de suministro energético en módulos de servicios basados en contenedores marítimos*, Pontevedra, 2016.
- [23] C. Delgado González, *Modelado de un panel solar híbrido a partir de datos experimentales*, Pontevedra, 2017.
- [24] G. Rey González, C. Ulloa Sande, J. L. Miguez Tabarés y A. Cacabelos Reyes, «Diseño y estudio de cargas térmicas de una vivienda-contenedor utilizando Trnsys,» de *9º Congreso Nacional Ingeniería Termodinámica*, Cartagena, 2015.

- [25] Wikipedia, «Wikipedia,» 28 Febrero 2018. [En línea].Available:
https://es.wikipedia.org/wiki/Calor_específico. [Último acceso: 26 Enero 2018].