



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Aplicación de las pinturas termocrómicas en la eficiencia y sostenibilidad de la energía solar

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Sergio Abellán Saorin
Director: Andrés Cabrera Lozoya
Codirector: Javier Padilla Martínez



Universidad
Politécnica
de Cartagena

ÍNDICE

1. Introducción	6
1.1 Objetivos	6
1.2 Motivación	7
1.3 Planteamiento	7
2. Marco teórico	7
2.1 La radiación	8
2.1.1 Masa de aire (AM).....	8
2.1.2 Tipos de radiación.....	10
2.1.3 Propiedades.....	11
2.2 Termocromismo.....	13
2.2.1 Tipos	14
2.3 Principios básicos energía fotovoltaica	15
2.3.1 Efecto fotoeléctrico.....	16
2.3.2 Efecto fotovoltaico.....	16
2.3.3 Modelo célula fotovoltaica	17
2.3.4 Circuito equivalente.....	18
2.3.5 Componentes	19
2.4 Factores eficiencia fotovoltaica	21
2.4.1 Factor de rendimiento	21
2.4.2 Sobrecalentamiento e irradiancia.....	21
2.4.3 Conclusión	25
3. Estudio influencia del marco	26
3.1 Estudio de secciones de aluminio	26
3.1.1 Contexto.....	26
3.1.2 Contexto específico caso 1	27
3.1.3 Contexto específico caso 2	28
3.1.4 Metodología.....	29
3.1.5 Resultados.....	37
3.1.6. Conclusión	40
4. Simulación térmica placa fotovoltaica	42

4.1 Procedimiento	42
4.2 Resultados.....	46
4.2.1 Caso 1 (sin pintura).....	46
4.2.2 Caso 2 (con pintura).....	50
4.3 Conclusiones.....	54
5. Influencia del marco en la potencia	56
5.1 Contexto.....	56
5.1.1 Planteamiento	57
5.1.2 Suposiciones de cálculo	57
5.2 Metodología.....	58
5.2.1 Caso 1 (marco sin pintar).....	58
5.2.2 Caso 2 (marco pintado).....	58
5.3 Condiciones de contorno	59
5.3.1 Caso 1 (sin pintar).....	59
5.3.2 caso 2 (pintado).....	59
5.4 Procedimiento	60
5.5 Resultados.....	63
5.5.1 Caso 1 (sin pintar).....	63
5.5.2 Caso 2 (pintado).....	64
5.6 Conclusión	65
6. Posibilidad de aplicación de las pinturas termocrómicas	67
6.1 Estudio de secciones con diferentes colores	67
6.2 Ejemplo de aplicación.....	69
7. Conclusiones	69
8. Bibliografía	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rango del espectro electromagnético.....	8
Figura 2. Representación gráfica (AM).....	9
Figura 3. Tipos de radiación.....	10
Figura 4. Tabla de coeficientes (ϵ).....	12
Figura 5. Cristales que varían de color con la temperatura.....	14
Figura 6. Imagen de cristal líquido en lámina.....	14
Figura 7. Disposición molecular helicoidal.....	15
Figura 8. Proceso de generación eléctrica a nivel estructural.....	17
Figura 9. Circuito representativo de una celda solar.....	18
Figura 10. Componentes de un módulo fotovoltaico.....	19
Figura 11. Célula policristalina.....	20
Figura 12. Célula monocristalina.....	20
Figura 13. Modelo fotovoltaico (Matlab).....	22
Figura 14. Representación célula solar.....	22
Figura 15. Modelo matemático simplificado de una celda solar.....	23
Figura 16. Parámetros en el editor de Matlab.....	24
Figura 17. Curvas I-V / V-P (panel solar en condiciones STC).....	25
Figura 18. Montaje del equipo medidor.....	27
Figura 19. Secciones de aluminio (I).....	28
Figura 20. Secciones de aluminio (II).....	28
Figura 21. Conexiones del sensor DS18B20.....	30
Figura 22. Montaje del circuito basado en 3 sensores DS18B20.....	31
Figura 23. Conexiones a los puertos de la placa Arduino.....	31
Figura 24. Etiquetado de cada sensor correspondiente a su ruta.....	33
Figura 25. Almacenamiento de las mediciones.....	34
Figura 26. Variaciones en las conexiones del sensor DS18B20.....	35
Figura 27. Resultado distribución de temperaturas sensor 1.....	37
Figura 28. Resultado distribución de temperaturas sensor 2.....	37
Figura 29. Resultado distribución de temperaturas comparativa (I).....	38
Figura 30. Resultado distribución de temperaturas (+ espesor)(I).....	38
Figura 31. Resultado distribución de temperaturas aluminio bruto.....	39
Figura 32. Resultado distribución de temperaturas (+ espesor)(II).....	39
Figura 33. Resultado distribución de temperaturas comparativa (II).....	40
Figura 34. Influencia del espesor en el comportamiento de las curvas características...	41
Figura 35. Interfaz Workbench.....	42
Figura 36. Engineering data.....	42
Figura 37. Aluminio material (bruto).....	43
Figura 38. Aluminio material (con pintura).....	43
Figura 39. Material celda solar.....	43
Figura 40. Steady-State Thermal.....	43
Figura 41. Sketching/DesignModeler (I).....	44
Figura 42. Sketching/DesignModeler (I).....	44

Figura 43. Condiciones de contorno	45
Figura 44. Condiciones de contorno	45
Figura 45. Condiciones de contorno	45
Figura 46. Transición de temperaturas caso 1	46
Figura 47. Transición de flujo de calor caso 1	47
Figura 48. Variación del flujo de calor en el marco (2m) caso 1	48
Figura 49. Variación del flujo de calor en el marco (1m) caso 1	49
Figura 50. Dirección de propagación del calor caso 1	50
Figura 51. Transición de temperaturas caso 2	51
Figura 52. Transición de flujo de calor caso 2	51
Figura 53. Variación del flujo de calor en el marco (2m) caso 2	52
Figura 54. Variación del flujo de calor en el marco (1m) caso 2	53
Figura 55. Dirección de propagación del calor caso 2	54
Figura 56. Condiciones de contorno	54
Figura 57. Influencia de la velocidad del viento	55
Figura 58. Representación de la superficie del marco en contacto directo	56
Figura 59. Medición de temperaturas para el modelado del cálculo basado en nodos ...	58
Figura 60. Medición de temperaturas caso 2	58
Figura 61. Representación gráfica caso bidimensional	60
Figura 62. Campo de temperaturas	60
Figura 63. Campo de temperaturas (aproximación unidimensional)	61
Figura 64. Ley de Fourier	61
Figura 65. Representación gráfica planteamiento de cálculo	61
Figura 66. Analogía eléctrica para el cálculo	62
Figura 67. Modelado de resistencias para el cálculo teórico	62
Figura 68. Distribución de temperaturas (marco sin pintar)	63
Figura 69. Medición de voltaje (marco sin pintar) hora de medición 14:37	64
Figura 70. Distribución de temperaturas caso 2 (marco pintado)	64
Figura 71. Medición de voltaje (marco sin pintar) hora de medición 17:40	65
Figura 72. Curvas del fabricante (caso 1)	66
Figura 73. Curvas del fabricante (caso 2)	66
Figura 74. Gráfica comparativa diversos colores	68
Figura 75. Secciones de ensayo (diferentes colores)	68

Agradecimientos a:

Andrés Cabrera Lozoya, director de TFG

Javier Padilla Martínez, codirector de TFG

Francisco Ramón Pamies Porras, por su apoyo y motivación

Antonio Saura Cánovas, por su ayuda y apoyo, me ha facilitado muchos procedimientos y me ha aconsejado desde el minuto cero

A mis padres, por toda la ayuda y energía que me han dado para realizar con ganas e ilusión este estudio

A todos los amigos que me han acompañado durante todo el trayecto

1. Introducción

Cada día que transcurre, a raíz de la aprovechable radiación solar, las energías renovables están más presentes en nuestras vidas. Desde placas fotovoltaicas en los tejados de las casas para abastecer parte de la energía necesaria para el día a día, hasta hectáreas de paneles fotovoltaicos. Sin embargo, tan sólo somos capaces de aprovechar aproximadamente una tercera parte de esta valiosa energía, debido a una serie de factores que influyen en su aprovechamiento, desde su emisión desde el núcleo solar hasta su captación en las células fotovoltaicas.

Es cierto que se está trabajando mucho desde hace años en la mejora de la eficiencia solar, por lo que este campo está muy investigado, en cambio, si no fuera gracias a las personas que se aventuraron a dar el paso, no se habrían conseguido los numerosos y exitosos avances que han dado pie a la tecnología actual. Además, muchos de los progresos actuales han tenido éxito a raíz de numerosas investigaciones y ensayos fallidos. Por lo tanto, llevar a cabo una hipótesis, puede ser correcta o errónea, pero el cualquier caso, se estará contribuyendo a la comunidad científica, para que, en función de los resultados obtenidos, se sepa si seguir o no profundizando en dicho estudio o dar pie a otras investigaciones.

Por otro lado, el termocromismo es un ámbito que con el tiempo se está dando a conocer y se está aumentando su infinidad de aplicaciones. Desde lo más cotidiano como pueden ser las tazas de café que cambian de color cuando sobrepasan cierta temperatura, hasta edificios con enormes ventanales que según interese aumentar o disminuir la luminosidad de su interior, cambian de color de más claro a más oscuro y viceversa. Sin embargo, contempla muchas ramas derivadas de este concepto que todavía quedan por estudiar y profundizar.

Por ello, el fin de este estudio, se basará en mezclar ambos ámbitos (generación fotovoltaica y termocromismo) e intentar obtener efectos beneficiosos para el ser humano, ya sea mejorar la eficiencia energética de los paneles (suponiendo un ahorro de coste en las facturas), mejorar la estética de los lugares donde apliquemos dicha combinación o simplemente que este estudio sirva de ayuda o como punto de partida para futuras investigaciones.

1.1 Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo la combinación de pinturas termocrómicas y paneles fotovoltaicos con el fin de conseguir algún efecto beneficioso para el ser humano. Por un lado, se llevará a cabo un estudio basado en la aplicación de pinturas termocrómicas sobre las áreas no efectivas de los módulos para ver si así se contribuye a la optimización de la eficiencia fotovoltaica. Por otro lado, se llevará a cabo un estudio secundario con el objetivo de mejorar la estética y el confort del lugar en el que se implementen los paneles,

reflexionándose acerca del incremento de la estética y sus posibles consecuencias. Por lo tanto, el objetivo de este estudio queda motivado por la ambición de conseguir un avance y contribuir a la comunidad científica.

1.2 Motivación

En el ámbito de la energía solar, hay una gran cantidad de ramas en las que se ha profundizado mucho, tanto en temas relacionados con la geometría, como en temas afines al tipo de materiales a implementar, en cualquier caso, con el objetivo de maximizar la cantidad de energía solar recibida. Por ello, encontrar o descubrir un avance en este campo es bastante complejo, sin embargo, la ambición e ilusión por descubrir algo nuevo, una aplicación, un método que produzca como consecuencia un avance o una futura implementación en el día de mañana, me motiva a abordar el estudio a realizar. Por ello, la intención de este trabajo reside en la aportación de ideas a la comunidad, ya que, como ingenieros, somos capaces de solventar problemas, buscar soluciones continuamente, y sobre todo y más importante, saber qué consecuencias pueden tener nuestras decisiones y saber evaluar el riesgo de cometerlas o no.

Así, investigando qué tema abordar en el amplio campo de la energía fotovoltaica, pensé que se podría buscar alguna aplicación del termocromismo que encajase de forma satisfactoria, por lo que a continuación, se van a explicar los conceptos que se han de conocer para entender este estudio. Se detallará en que consiste el termocromismo, para entender su aplicación y los principios básicos de las placas fotovoltaicas, para entender su funcionamiento y los parámetros que lo afectan.

1.3 Planteamiento

En primer lugar, se procederá a explicar los conceptos fundamentales de este estudio para su entendimiento. En segundo lugar, se llevará a cabo la primera hipótesis planteada (eficiencia energética), se explicará la idea a desarrollar, posteriormente se realizarán pruebas experimentales y una vez obtenidos los resultados, se hará una conclusión. Consecutivamente, se realizará un segundo breve estudio, basado en la estética y como puede afectar al entorno la aplicación de éstas, donde se llevarán a cabo una serie de pruebas experimentales y seguidamente una conclusión a partir de los datos obtenidos.

2. Marco teórico

2.1 La radiación

Llamamos radiación solar a la energía que proviene de las reacciones nucleares (mediante fusión) producidas en el núcleo solar. Ésta, se transmite por medio de ondas electromagnéticas que alcanzan la atmósfera terrestre en forma de conjunto de radiaciones o espectro electromagnético, con un rango de longitudes de onda comprendido entre 0.15-4 μm .

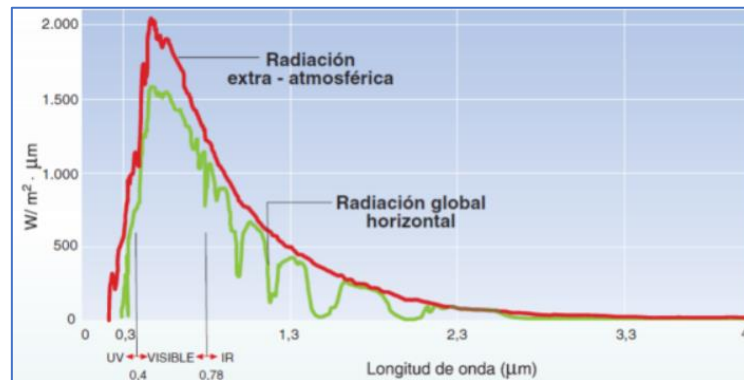


Figura 1. Rango del espectro electromagnético

Así, la radiación emitida por el sol llega a la atmósfera de la Tierra bastante debilitada (aproximadamente 1360 W/m^2) debido a la distancia de separación entre ambos. Después de dicha atenuación, esta radiación sufre de nuevo una disminución debido a la capa atmosférica, por lo que finalmente llegan aproximadamente 1000 W/m^2 a la superficie terrestre.

Esta segunda disminución viene dada por las alteraciones producidas al atravesar la capa atmosférica, tales como alteraciones debidas al aire, la suciedad, el vapor de agua, los aerosoles en suspensión, y otros elementos de la atmósfera. Además, estos efectos varían dependiendo de la cantidad de atmósfera que la radiación solar ha de atravesar, por ello los 1000 W/m^2 son aproximados y no exactos [1]. Así, se producen fenómenos de reflexión de las ondas al incidir sobre las nubes, o fenómenos de absorción (en determinadas longitudes de onda) y difusión.

2.1.1 Masa de aire (AM)

Para establecer un criterio que tenga en cuenta el ángulo de incidencia de la radiación solar con la superficie terrestre, utilizamos el término de *Masa de Aire (AM)* [2].

La masa de aire se define como la longitud de la vía tomada por la luz a través de la atmósfera, referido a la ruta más corta posible (es decir, cuando el sol está directamente vertical). Por ello, la masa de aire cuantifica la reducción en la potencia de la luz a medida que pasa a través de la atmósfera (segunda disminución producida en el trayecto núcleo solar – superficie terrestre) afectada por los anteriores fenómenos. La masa de aire se define como:

$$AM = \frac{1}{\text{sen } \gamma_s} = \frac{1}{\text{cos } \theta_{zs}}$$

Masa de aire (AM)

Donde:

- El ángulo gamma representa la elevación solar.
- El ángulo teta o distancia angular cenital (grados).

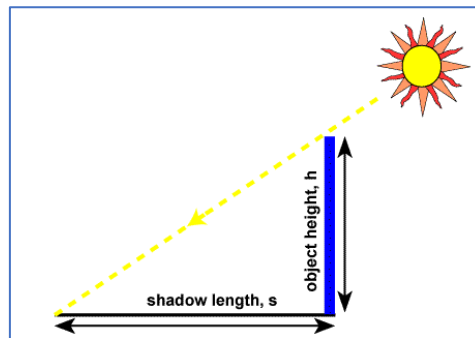


Figura 2. Representación gráfica (AM)

Masa de aire es la longitud de la hipotenusa dividida entre la altura del objeto, h, y por el teorema de Pitágoras obtenemos:

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2}$$

Masa de aire mediante teorema de Pitágoras (AM)

Además, Cuando se especifica la potencia máxima de un módulo fotovoltaico en sus hojas de datos se indica para un valor de AM1,5 que equivale a un ángulo cenital de 48,2 grados.

Así, como se ha nombrado anteriormente, esta transmisión de energía se basa esencialmente en que un cuerpo, el Sol, por medio de ondas electromagnéticas y dependiendo de la frecuencia con la que lleguen a la superficie terrestre, los fotones (elementos ausentes de masa y carga eléctrica encargados de transportar la energía radiante) transferirán dicha energía con una mayor o menor intensidad (teoría sobre el

efecto fotoeléctrico, Max Planck), influyendo así en la cantidad de energía proporcional que es capaz de transformar un panel solar mediante su comportamiento equivalente a un diodo.

2.1.2 Tipos de radiación

Según su comportamiento, diferenciamos tres tipos de radiación que componen la radiación total que llega desde el núcleo solar [3]:

- Radiación directa: es la recibida desde el Sol sin sufrir ninguna desviación tras atravesar la atmósfera.
- Radiación difusa: es la que sufre desviación en su camino a la superficie terrestre a causa de fenómenos de reflexión y difusión de las ondas electromagnéticas.
- Radiación de albedo o reflejada: equivale a la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

Se exponen estos conceptos teóricos para entender que, en las aplicaciones fotovoltaicas, la más importante y que más influye en la generación de energía es la radiación directa. No obstante, según las condiciones meteorológicas, habrá situaciones (días nublados) en las que apenas llegará radiación directa, lo que se tiende a pensar que, por no haber incidencia directa de Sol, los paneles fotovoltaicos apenas producen energía. Sin embargo, en estas condiciones se sigue recibiendo mayoritariamente la radiación difusa, por lo que, aunque se denominen días de poca radiación solar, no significa su ausencia.

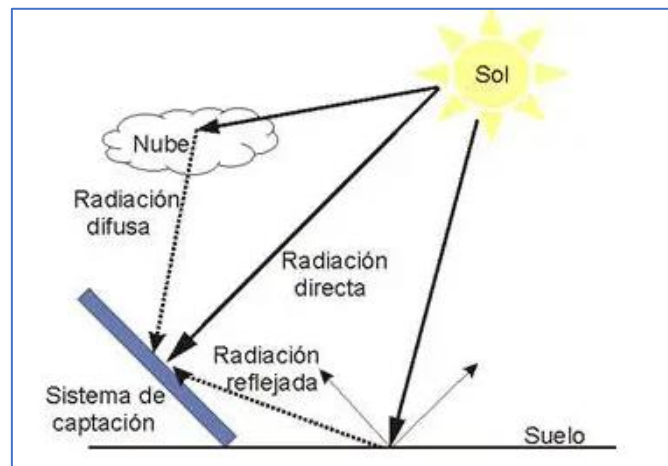


Figura 3. Tipos de radiación

En la figura 3 (Hernández, 2014), se observa la clasificación en la que se divide la radiación solar. No obstante, se observa que tanto la radiación difusa como la reflejada, poseen la misma cantidad de energía que la radiación directa hasta que se encuentran una “barrera” o un medio que se opone a su paso, por lo que dicha interferencia provoca una pérdida de energía para el haz lumínico.

2.1.3 Propiedades

Es necesario conocer las propiedades que influirán en la captación de energía de los paneles fotovoltaicos, las cuales tendrán un papel importante en el objeto de estudio y servirán para entender como influyen ciertas propiedades en la emisión, captación y retención de radiación (importante y a tener en cuenta para el planteamiento de los estudios a realizar).

- Poder absorbente o absorptividad: representa la fracción de energía incidente absorbida por la superficie, lo que se traduce en la cantidad de energía que es capaz de absorber de la energía incidente. Por ese motivo, el vidrio posee un bajo poder absorbente.
- Poder reflexivo o reflectividad: representa la fracción de energía incidente reflejada por la superficie. Además, según la reflectividad hay dos tipos de superficies, especulares y difusas, entre las cuales, la diferencia radica en que las especulares reflejan la luz en una única dirección mientras que las difusas lo hacen en distintas direcciones.
- Poder transmisivo o transmisividad: representa la fracción de la energía incidente transmitida por la superficie, lo que se traduce en la cantidad de energía que permite que atraviese dicho material. Un ejemplo de alta transmisividad sería el vidrio, ya que gran parte de la energía que incide consigue traspasar dicha superficie.
- Irradiación: Cantidad de energía radiante que incide sobre una superficie por unidad de área y tiempo. Podemos definirla para ver la cantidad de energía radiante que recibe a una concreta longitud de onda (irradiación monocromática) o teniendo en cuenta el rango completo de longitudes de onda (irradiación total).
- Emitancia: Cantidad de energía radiante emitida por un cuerpo por unidad de área y tiempo. Si la definimos para una determinada longitud de onda (emitancia monocromática), por el contrario, para el rango completo (potencia emisiva). Cabe destacar que representa únicamente la emisión original que produce la superficie, no la reflejada por una radiación incidente.

La emisividad o emitancia solar [4], por lo tanto, se entiende por la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto a una temperatura determinada. Se expresa mediante el coeficiente de emisividad (ε), número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si éste fuera un cuerpo negro:

$$\varepsilon = \frac{\text{Radiación emitida por una superficie}}{\text{Radiación emitida por la misma superficie como cuerpo negro}}$$

Un cuerpo negro se define como aquel que absorbe toda la radiación incidente, lo que significa que toda la radiación que incide abandona la superficie, por lo que la radiosidad coincide con la emisividad. Por consiguiente, un cuerpo negro tiene un coeficiente $\epsilon = 1$, mientras que, en un objeto real, ϵ siempre se mantiene menor a 1.

Coeficientes de emitividad para diferentes objetos reales		
Metales	T [°C]	ϵ
Aluminio	170	0.05
Acero	-70...700	0.06...0.25
Cobre	300...700	0.015...0.025
Cobre oxidado	130	0.73
No metales	T [°C]	ϵ
Madera	70	0.91
Hielo	-10	0.92
Agua	10...50	0.91
Papel	95	0.90

Figura 4. Tabla de coeficientes (ϵ)

- Índice de reflectividad solar:

El Índice de Reflectividad Solar se consigue bajo la norma ASTM E1980 [5]. Consiste en un indicador que reúne la reflectancia y la emitancia en un único término que representa la temperatura de una superficial horizontal (o aproximadamente si presenta un grado de curvatura), de un material opaco expuesto a la radiación solar. Así, permite la comparación inmediata entre superficies que poseen distintas propiedades ópticas (reflectancia y emitancia). Así, se puede expresar tanto como un valor de 0 a 1, como porcentaje de 0% a 100%.

$$SRI = \frac{T_B - T_S}{T_B - T_W}$$

Índice de Reflectividad Solar

Por lo tanto, cuantifica el calor que acumularía un material en relación con una superficie patrón blanca y una negra, en condiciones ambientales estándar. Así, definimos como patrón negro aquel material con una reflectancia de 0.05 y una emitancia 0.90, con un valor del SRI igual a 0. Por el contrario, el patrón blanco corresponde a un valor de SRI igual a 1, con una reflectancia 0.80 y una emitancia 0.90.

Para cuantificar la radiación solar se utilizan dos magnitudes que corresponden a la potencia y a la energía de la radiación que llegan a una unidad de superficie [6].

- **Irradiancia:** Es la potencia instantánea de la radiación solar recibida por unidad de superficie y se expresa en la unidad correspondiente del Sistema Internacional, el W/m².
- **Insolación o irradiación:** Es la energía que incide por unidad de superficie en un tiempo determinado, puesto que corresponde a la integración de la irradiancia en un período determinado ((la irradiancia multiplicada por el tiempo).[7] Las unidades más utilizadas son el kWh/m² o, en algunos casos, el MJ/m², obteniendo a lo largo de un día tendrá unidades de kWh/m²/día.

La absorción de la atmósfera en condiciones AM1,5 (recorrido atmosférico mínimo) reduce la irradiancia que llega a la superficie terrestre a 1.000 W/m², valor de irradiancia normalizado que se utiliza para definir los parámetros nominales de los módulos fotovoltaico. Por lo tanto, es importante conocer estos conceptos teóricos, puesto que los usaremos posteriormente para definir las propiedades de los materiales utilizados en los paneles fotovoltaicos. Además, para realizar los estudios propuestos, se verá que cada color de pintura tiene asociados unas propiedades distintas (reflectividad, emisividad, SRI...) y que comprobaremos en la manera en la que influye su aplicación sobre los módulos fotovoltaicos y si se producen variaciones significativas en algún parámetro.

2.2 Termocromismo

El concepto de termocromismo, consiste en que, mediante una variación de temperatura, se puede conseguir la variación del color de un elemento. En su aplicación, obtiene una gran importancia el espectro visible, es decir, en el momento que la luz incide sobre la sustancia termocrómica y ocurre un cambio de temperatura, dependiendo de las características de la sustancia, iniciará un cambio de color. Físicamente, este cambio de color ocurre debido a que la sustancia está compuesta por pigmentos que reaccionan ante dicha variación y como consecuencia absorben una cantidad de luz, es decir, según las propiedades de la sustancia iniciará un proceso de absorción de radiación, el cual, tendrá asociado según la radiación que reciba una determinada longitud de onda, que el ser humano traduce a través del espectro visible como una concreta tonalidad de color.

A su vez, dependiendo del tipo de material y de la tonalidad de color (rango de longitud de onda), presentará unas determinadas propiedades termofísicas (índice de refracción solar, reflectividad, emisividad...) que, dependiendo del objeto de estudio, convendrá que dicho material adquiera ciertas propiedades.

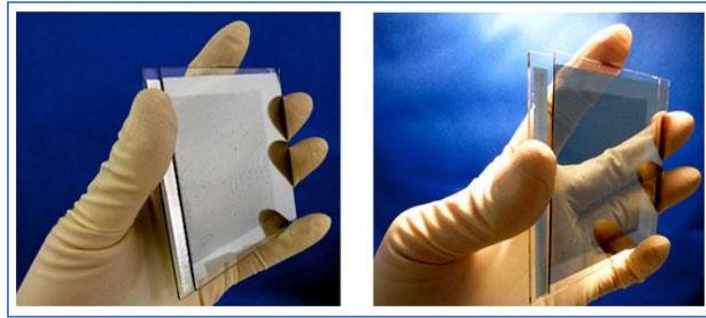


Figura 5. Cristales que varían de color con la temperatura

A modo de ejemplo, si se quisiera determinar un material que actúe como revestimiento en una fachada de un edificio, siendo el objetivo principal reducir la cantidad de energía que incide sobre el edificio para reducir la temperatura del mismo (bajo índice de absorptividad solar), se han realizado diversos estudios en los que se demuestran que un material con un SRI elevado en comparación con otro material de un SRI más bajo (índice de reflectancia solar), ofrece un mejor comportamiento ante esta situación, consiguiéndose así, reducir las temperaturas y el consumo energético del edificio.

Por ello, es necesario tener claro dos conceptos que están directamente relacionados con este estudio, el tipo de material y sus propiedades, puesto que más adelante, se abordará la explicación de la reducción de temperatura en los paneles solares.

2.2.1 Tipos

Cristales líquidos:

Los cristales de colesterol, cuando actúa la temperatura sobre éstos, pasan de estado sólido cristalino a líquido isotrópico, formando fases intermedias. Durante estas fases, sus moléculas adyacentes pasan a formar una disposición molecular helicoidal [8], lo que provoca su influencia en el índice de refracción y por ende en la longitud de onda de la luz incidente.



Figura 6. Imagen de cristal líquido en lámina

En la figura 6, (Adesivisicurezza, s.f.) vemos un ejemplo de cristal líquido, en la cual, una vez producida la variación de temperatura, los cambios de color se producen en determinadas longitudes de onda, concretamente las asociadas a los colores azul, verde y rojo, por lo que, cuanto mayor sea la temperatura de la zona en contacto, resaltará el color rojo (la longitud de onda asociada a una temperatura elevada). Por el contrario, cuanto menor sea la temperatura de la zona afectada, la longitud de onda que destacará haciéndose visible será la asociada al color azul. En la siguiente figura, (Oliveira, 2015) se muestra la disposición molecular en los previos cambios de fase:



Figura 7. Disposición molecular helicoidal

Colorantes leuco:

Los colorantes leuco, consisten en agentes termocrómicos compuestos por tres componentes:

- Formador de color
- Revelador de color
- Disolvente

[9] Un colorante leuco consiste un tipo de tinte que puede variar entre dos formas químicas, de las cuales una resulta incolora. Las transformaciones que son reversibles pueden ser originadas por acción del calor, luz o pH, las que son ejemplos de termocromismo, fotocromismo y halocromismo respectivamente. Las transformaciones irreversibles por lo general involucran procesos de reducción u oxidación. La forma incolora a veces es denominada forma leuco.

2.3 Principios básicos energía fotovoltaica

En este apartado, hablaremos de los principios básicos por los que se rige la generación de energía por medio de células fotovoltaicas. Es necesario analizar estos principios puesto que será el objeto de estudio sobre el que se aplicarán las pinturas termocrómicas. No se aprovecharía la energía solar si no se cumpliera la teoría de los fenómenos llamados, efecto fotoeléctrico y fotovoltaico.

2.3.1 Efecto fotoeléctrico

En primer lugar, el llamado efecto fotoeléctrico, el cual, da explicación a la forma en la que sucede el transporte de energía a través de los fotones. Einstein, demostró que un aumento de la intensidad en la luz incidente, no se traducía en un mayor aporte de energía a los electrones de un material (en este caso semiconductor), sino en un aumento del número de fotones de dicha luz incidente. La energía de un fotón se obtiene multiplicando la constante h de Planck por la frecuencia f de la radiación electromagnética, por lo que la intensidad es proporcional a la frecuencia de la radiación.

$$hv = hv_0 + \frac{1}{2} mv^2 ;$$

$v_0 =$ Frecuencia umbral ; $m =$ Masa del electrón

$h =$ Constante de Planck ; $v =$ Frecuencia del fotón

Ecuación del efecto fotoeléctrico (Einstein)

En la ecuación anterior, se representa como se produce la transferencia de energía de un fotón a un electrón. La parte izquierda de la ecuación representa la energía del fotón, que viene dada por la frecuencia de la onda del fotón multiplicada por la constante de Planck (h). Para que se produzca el efecto fotoeléctrico, la frecuencia de la luz incidente deberá ser mayor, dando lugar a la transmisión de la energía necesaria para la liberación del electrón, sumada a la energía cinética del mismo (lo que produce el movimiento del electrón). De esta manera, mediante el efecto fotoeléctrico, se da la explicación de cómo los electrones de un material absorben la energía de la luz radiante.

2.3.2 Efecto fotovoltaico

En segundo lugar, el llamado efecto fotovoltaico, que da lugar a la transformación de la energía solar a la energía eléctrica, es decir, se procederá a explicar cómo se produce la transformación de esta luz radiante incidente en la propia energía eléctrica a través de las células fotovoltaicas que componen los paneles solares [10]. Esto sucede gracias a unas capas semiconductoras de silicio (4 electrones de valencia) “dopadas” de fósforo y boro, es decir, con la adición de impurezas se consigue que una zona de la célula tenga exceso de electrones (silicio extrínseco tipo N, 5e) y la otra zona con átomos de silicio trivalentes (silicio extrínseco tipo P, 3e) llamados “huecos”. Así, se dice que dicha zona queda cargada “positivamente” por reducir su número de electrones habitual, por lo que, al

incidir la radiación sobre las células fotovoltaicas, dicha radiación le cede energía a los electrones (en exceso), pudiendo éstos desplazarse hacia los “huecos”, produciéndose la diferencial de potencial que mediante un inversor se transformará en corriente alterna utilizable para suministrar a cualquier hora del día.

2.3.3 Modelo célula fotovoltaica

Ya se han expuesto los principios básicos de funcionamiento por los que se rige una placa fotovoltaica, sin embargo, para entender al completo el proceso [11], es preciso mostrarlo a través del panel, como se muestra en la siguiente figura (X., 2020):

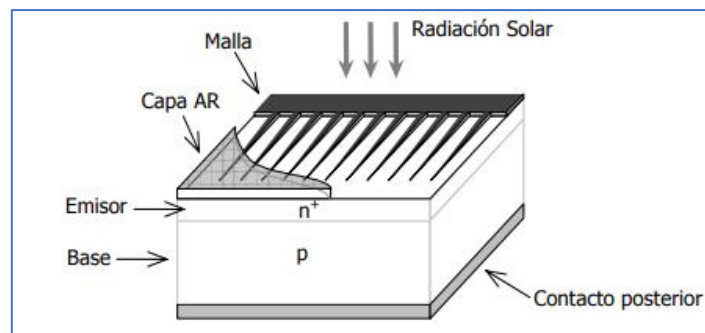


Figura 8. Imagen representativa del proceso de generación eléctrica a nivel estructural

La luz radiante (cargada de fotones), a partir del principio fotoeléctrico, dota a los electrones (emisor N) de energía para producir un diferencial de potencial y generarse el movimiento hacia los “huecos” de la base P [12]. Así, cumpliéndose el llamado efecto fotovoltaico, el panel solar requiere de varios componentes para ser lo más eficiente posible, es decir, aprovechar al máximo la radiación incidente y mediante el menor número de pérdidas hasta llegar a producirse la conversión en energía eléctrica. En orden de penetración de la luz incidente:

- **Capa AR:** consiste en una capa antirreflexiva con el fin de disminuir las pérdidas debidas a la reflexión de parte de la energía incidente. El espesor de esta capa (puede ser compuesta por varias), se basan en el índice de refracción, puesto que se requiere una reflectancia mínima para acumular la mayor radiación posible.
- **Malla de metalización:** consiste en una malla que debe coleccionar toda la radiación posible (a mayor radiación captada, mayor energía eléctrica se podrá conseguir) acosta de no suponer una resistencia eléctrica muy alta. Además, su forma puede ser variable y cabe destacar el factor de sombra, el cual mide la cantidad de superficie ocupada por dicha geometría en comparación con el área total de la malla.

- **Unión P-N:** componen las capas activas de la célula solar (material semiconductor), entre las que se produce el fenómeno fotovoltaico y se genera una diferencial de potencial de los electrones, traduciéndose en energía eléctrica que posteriormente podrá ser utilizada. Habitualmente, estas capas activas se dopan con impurezas para conseguir en una parte un exceso de electrones y en la otra, una escasez o “huecos” que una vez que la célula recibe la radiación, se produzca dicho fenómeno. Además, la composición tanto de la base como del emisor (combinación de materiales...) determinarán notablemente el rendimiento del dispositivo.
- **Contacto metálico posterior:** servirá de elemento conector para realizar la conversión de energía. Cuanto más eficiente sea este elemento, menos pérdidas se tendrán, ya que puede el objetivo es que no suponga una resistencia elevada al paso de la corriente.

2.3.4 Circuito equivalente

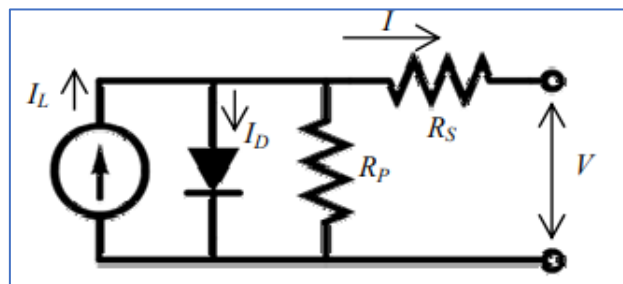


Figura 9. Circuito representativo de una celda solar

En la figura 9, se muestra el circuito equivalente de una celda solar. Describe básicamente el proceso de la generación de energía, basado en el funcionamiento equivalente a un diodo. Cuando inciden los fotones, si consiguen extraer los electrones del material semiconductor (unión P-N) o lo que es lo mismo, superar esa diferencia de potencial (sólo se puede producir en un sentido, diodo unidireccional) necesaria, se dará lugar a la generación de energía. En cambio, si no se supera esa diferencia de potencial necesaria, la intensidad no pasará por el ramal del diodo, por lo que se repartirá entre el resto de los ramales (asociados a resistencias).

Por un lado, la resistencia en serie R_s , representa los obstáculos que se interponen en el paso de la radiación a través del panel, es decir, la capa AR, la malla de metalización, propia unión P-N (que también ofrece una resistencia), el encapsulado del panel o los contactos metálicos. Por otro lado, la resistencia en paralelo R_p , representa las fugas de corriente, por lo que cuando el diodo está activo (modo ON), habrán pequeñas fugas, y cuando el diodo está pasivo (modo off) toda esa intensidad de corriente (radiación) se repartirá entre estas dos resistencias.

A continuación, se muestra la ecuación por la que se rige el modelo equivalente y simplificado de una celda solar:

$$I = I_l - I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{m k T} \right] - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

Ecuación circuito equivalente

Donde:

I_l = corriente fotogenerada ; I_0 = corriente de diodo

q = carga del electrón ; m = factor de idealidad (1 – 2)

k = constante de Boltzmann ; T = temperatura absoluta

R_s = resistencia en serie ; R_p = resistencia en paralelo

Como se puede observar, la intensidad total generada será la transportada por la luz incidente menos la intensidad del diodo y las pérdidas debidas a las resistencias. Como conclusión, una célula será más eficiente, cuanto menor resistencia en serie y mayor resistencia en paralelo tenga.

2.3.5 Componentes

Una vez conocidas las partes que componen una celda, se mostrarán las partes que componen un panel solar en su conjunto, (X., 2020):

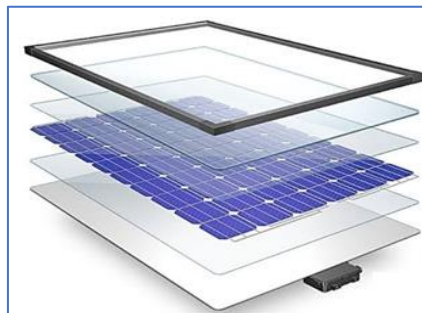


Figura 10. Componentes de un módulo fotovoltaico

- **Marco:** Normalmente fabricado de aluminio, ya que sus propiedades son óptimas en disipación de calor y reflectancia.
- **Capa de vidrio:** Es la primera capa en la que incide la radiación, por lo que debe permitir el máximo paso de ésta. Además, por ser la primera capa, se puede acumular suciedad sobre ella (en contacto directo con el exterior), por lo que entre sus propiedades se encuentra la de un bajo coeficiente de rozamiento (antiadherente).
- **Encapsulantes:** como su propio nombre indica, sirven para encapsular la radiación incidente.
- **Caja de conexiones:** en ella, se encuentran los terminales del cableado que conecta el conjunto de celdas solares.
- **Celdas solares:** zona en la cual se produce la transformación de energía radiante a eléctrica. Además, cabe destacar que las podemos clasificar fundamentalmente en monocristalinas y policristalinas, dependiendo de su composición molecular. Las monocristalinas están compuestas por un solo cristal de silicio, en cambio, las policristalinas, al estar formadas por silicio obtenido a partir de un proceso de fabricación basado en fundición, utilizándose una menor cantidad de silicio. [5] De esta manera, las celdas monocristalinas son capaces de generar mayor energía eléctrica que las policristalinas con misma área efectiva. Así, en casos de tener espacios reducidos para su puesta en funcionamiento o localización con irradiancia insuficiente, se podría decantar por la utilización de celdas monocristalinas.

En la figura 11 y 12 (archiexpo, s.f.) ,se muestra la diferencia visual:

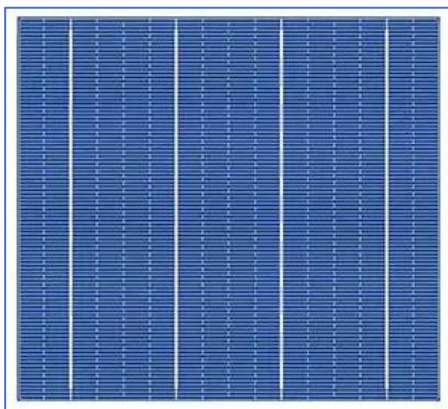


Figura 11. Célula policristalina

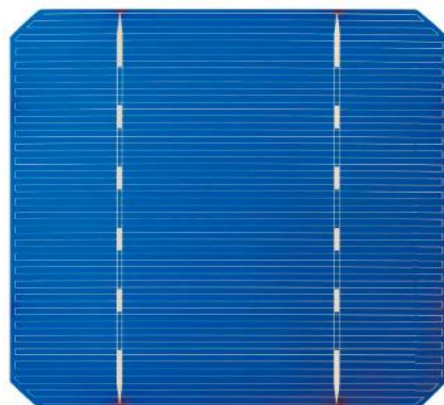


Figura 12. Célula monocristalina

2.4 Factores eficiencia fotovoltaica

En este apartado, se van a detallar los parámetros que influyen en el rendimiento y la eficiencia energética de un panel fotovoltaico, porque, aunque se vayan a aplicar pinturas termocrómicas para intentar incrementar dicho rendimiento, no servirá de mucho si no reunimos las condiciones necesarias para que el panel solar se encuentre en las óptimas condiciones de contorno. Esto es algo muy importante, ya que, si se implementa un método de aplicación para intentar incrementar el rendimiento y, por otro lado, el panel solar no está bien orientado, no se ha tenido en cuenta la ubicación, es definitiva, una serie de factores que al fin y al cabo contrarrestarían el posible efecto positivo de este estudio. Antes de explicar en qué consisten estos parámetros, se definirá el concepto de factor de rendimiento de un panel fotovoltaico.

2.4.1 Factor de rendimiento

El factor de rendimiento de un panel se puede definir como un coeficiente que evalúa la calidad de un panel fotovoltaico. En otras palabras, relaciona la cantidad de energía teórica que debería producir el panel con la cantidad de energía real que produce el panel. De normal, este factor de rendimiento estará en un rango aproximado del 15-23%, dependiendo fundamentalmente de los elementos que componen la célula fotovoltaica y los materiales que forman el encapsulado de las células solares. A partir de este factor, (que podemos denominar el máximo que alcanzará la placa cumpliéndose las condiciones óptimas de contorno), podrá variar por dos tipos de causa principalmente. El primer tipo de causa engloba una diversidad de factores externos (condiciones climáticas adversas, cambios bruscos meteorológicos, horas de luz, etc.) y como segundo tipo de causa, se puede deber a que las condiciones de contorno no son las óptimas (ubicación y orientación del panel, inclinación mal ajustada, el mantenimiento de los paneles, sombras...).

2.4.2 Sobre calentamiento e irradiancia

La temperatura a la que se encuentra un panel solar cuando está en funcionamiento, es un factor clave y determinante que afecta en gran parte al rendimiento.[6] Se considera un estado de funcionamiento “en condiciones normales”, a una temperatura estándar de 25°C, la cual tomamos como referencia para evaluar el comportamiento del panel solar a medida que aumenta la temperatura y se puede llegar a producir un sobre calentamiento de las células. Podríamos además de evaluar el sobre calentamiento, el caso en el que la temperatura esté por debajo de la de referencia, pero en ese caso, lo que sucede normalmente es que la cantidad de radiación está directamente relacionada con la temperatura ambiente [13], esto quiere decir que habrá muy pocos días al año en los que haya altos niveles de irradiancia acompañados de una baja temperatura ambiente, por ello nos centramos en el caso más común y el problema principal.

[12] Además, la temperatura media óptima para un máximo rendimiento (teniéndose en cuenta el resto de los parámetros en estados óptimos, inclinación, irradiancia...) de estos paneles ronda los 25 grados (la temperatura estándar), por lo que paneles expuestos a una mayor temperatura, afectará como se ha mencionado negativamente al rendimiento. Se estima que, por cada grado de temperatura desviado, se pierde un 0,3-0,5% de rendimiento dependiendo de las propiedades del panel.

Para ver de forma teórica una aproximación de cómo afecta el factor temperatura en los paneles fotovoltaicos, se desarrollará mediante la interfaz de Matlab, un modelo matemático que define el comportamiento de un conjunto de células fotovoltaicas, pudiendo efectuar una simulación variando la temperatura que se encuentran dichas células en pleno funcionamiento.

En primer lugar, desarrollamos el modelo fotovoltaico:

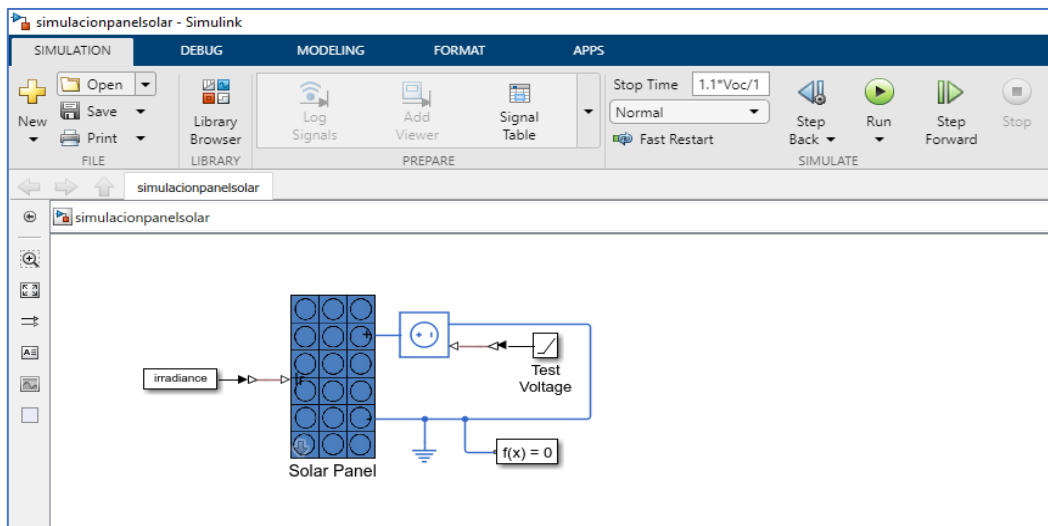


Figura 13. Modelo fotovoltaico (Matlab)

En el modelo fotovoltaico, se puede apreciar que a partir de la entrada de una variable llamada irradiancia (simulando la exposición del panel fotovoltaico al Sol), a partir del modelo matemático que sigue dicho panel, lleva a cabo la simulación y mediante unos medidores de voltaje e intensidad, se podrán obtener las curvas I-V (intensidad – voltaje) dependiendo de la variable de entrada y una serie de parámetros:

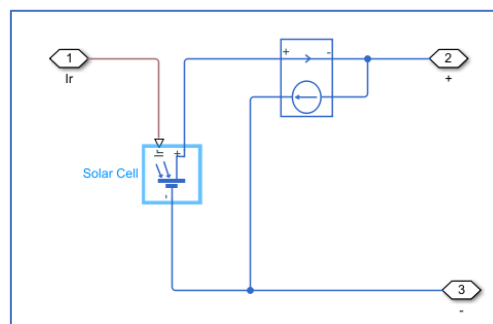


Figura 14. Representación célula

En la siguiente figura, se muestra un modelo simplificado de una célula solar, en la que se observan los bornes de toma de medida (bloque 2 y 3) y la entrada (bloque 1, irradiancia) conectada al bloque que corresponde con el diodo (solar cell). Además, como en cualquier modelo representativo de una célula, se compone de una fuente de intensidad que controla que no supere la intensidad máxima de la célula (intensidad de cortocircuito).

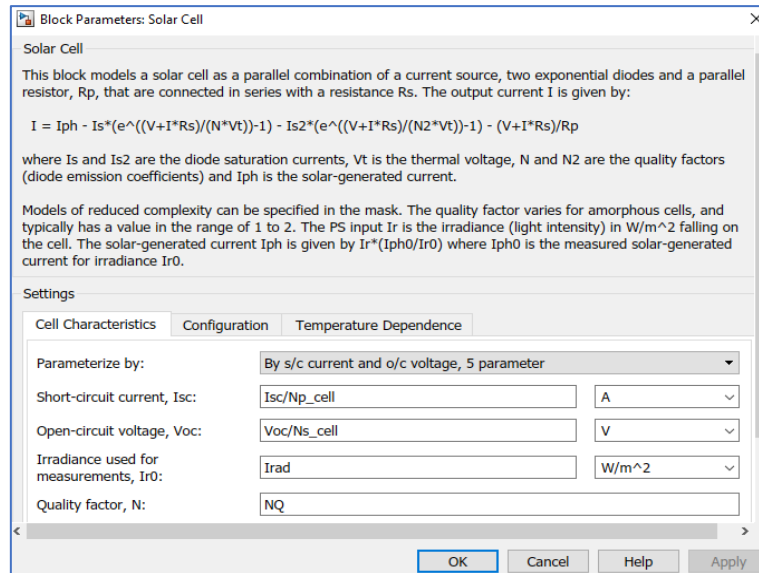


Figura 15. Modelo matemático simplificado de una celda solar

Una vez seleccionado el bloque de “Solar cell”, se muestra la ecuación que describe la curva característica de funcionamiento aproximada de un panel solar, en la cual, se introducirán las variables necesarias a través del editor de códigos de Matlab. Además, se tiene la opción de variar las unidades de las variables de entrada, salida y de cálculo.

Mediante el editor de códigos de Matlab, introduciremos a partir de las especificaciones técnicas de una placa fotovoltaica, las siguientes variables:

- Isc (corriente de cortocircuito): es la corriente que circula cuando ocurre un cortocircuito, es decir, con un voltaje entre bornes de 0 voltios, siendo la máxima intensidad que puede circular por el panel.
- Voc (voltaje de circuito abierto): es el voltaje que se mide cuando entre los bornes no circula intensidad (I=0 ya que tenemos circuito abierto) por lo que será el voltaje máximo que se podrá alcanzar en el panel.
- Ns_cell (número de células que componen el panel solar): se introducirán el número de celdas fotovoltaicas en serie que componen el panel según la ficha técnica.

- *Np_cell (número de paneles solares en paralelo)*: se introducirán el número de paneles que se quieran tener con una disposición en paralelo.
- *Tct (coeficiente de temperatura)*: se obtendrá a partir de la ficha técnica del panel.
- *Tmeas (temperatura STC)*: es la temperatura de medida estándar STC (estándar test condition) a la que se tienen que ensayar los módulos para obtener sus parámetros característicos (25°C).
- *Irad (irradiancia STC)*: la irradiancia según STC de medida a la que se tienen que exponer los módulos para definir sus parámetros básicos (1000 W/m²).
- *NQ (factor ideal)*: hace referencia al factor ideal de un diodo simple.
- *Rs (resistencia en serie)*: valor de la resistencia en serie dispuesta en la celda solar, valor tomado de la ficha técnica.
- *TXIS1*: hace referencia al exponente de temperatura de la intensidad de saturación del diodo (celda). Tomaremos un valor estándar de 3.
- *irradianceVec*: se introducirán los valores de irradiancia a los que se querrá llevar a cabo el estudio.
- *temperatureVec*: se introducirán los valores de temperaturas a los que se querrá llevar a cabo el estudio.

```

%% VARIABLES Y DATOS DEL PANEL SOLAR NECESARIOS PARA LA SIMULACIÓN
Isc=8.18; % (A)
Voc=36.7; % (V)
Ns_cell=60;
Np_cell=3;
Tct=(0.04/100);
Tmeas=25;% (25°C STC)
Irad=1000;% (1000 W/m2 STC)
NQ=1.5;
Rs=0;
TXIS1=3;

%% DATOS PARA SIMULAR A DISTINTA IRRADIANCIA Y TEMPERATURA
irradianceVec = [200 500 1000]; % (W/m^2)
temperatureVec = [25 50]; % (°C)

```

Figura 16. Parámetros en el editor de Matlab

Ejecutamos el programa “RUN” y obtenemos la siguiente gráfica:

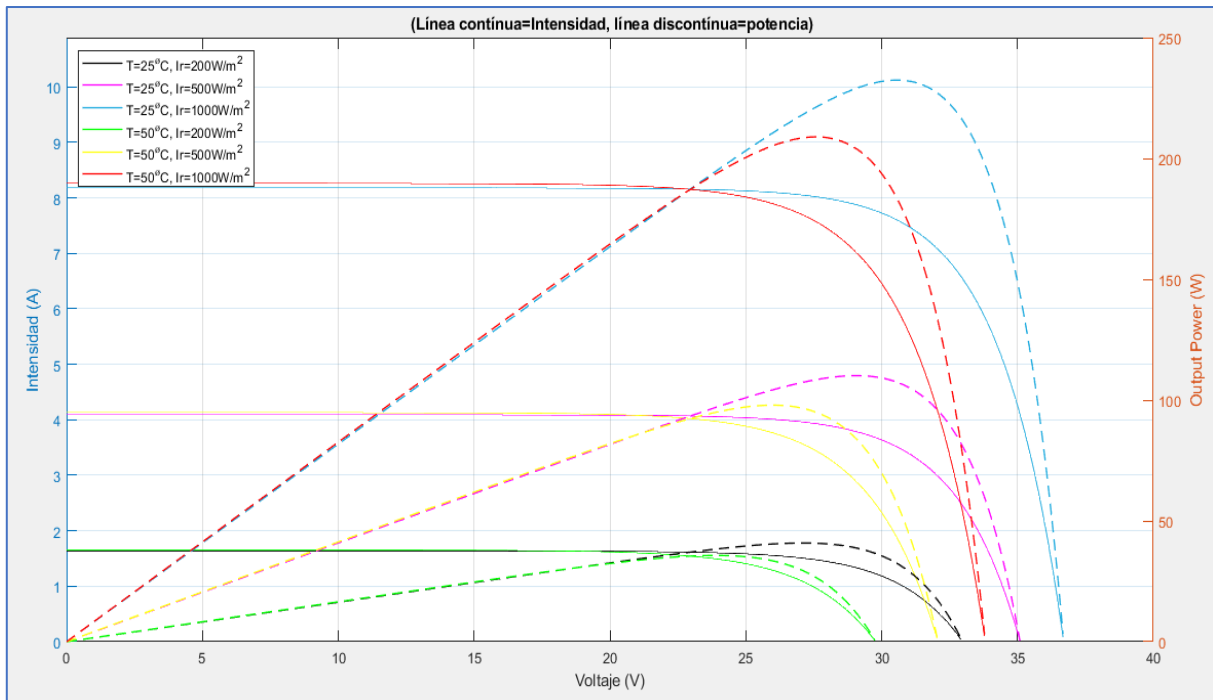


Figura 17. Curvas I-V / V-P (curvas características de un panel solar en condiciones STC)

2.4.3 Conclusión

De la gráfica obtenida, se pueden sacar varias conclusiones:

Como se puede observar, el tipo de línea continua hace referencia a la curva intensidad – voltaje (I-V), mientras que el tipo de línea discontinua corresponde a la curva voltaje – potencia (V-P). En la leyenda, se detalla el color de línea correspondiente a la temperatura e irradiancia simulada.

Si comparamos el caso de misma irradiancia y distinta temperatura (línea **color azul** vs **línea color rojo**), se observa que la tensión de circuito abierto (tensión máxima del circuito) se ve afectada y disminuida de la curva azul ($T=25^{\circ}\text{C}$) a la curva roja ($T=50^{\circ}\text{C}$). Esto se traduce en una disminución de la potencia que se puede generar, que como se aprecia, la curva azul discontinua está por encima de la curva roja. Obtenemos así **la primera conclusión**, el aumento de la temperatura de funcionamiento de un panel solar, se traduce en un pequeño aumento de la intensidad de cortocircuito y una disminución considerable del voltaje de circuito abierto, que viene acompañado de un descenso de la potencia que se puede generar, lo que se traduce en **pérdidas de rendimiento por sobrecalentamiento**.

Ahora, si comparamos el caso de misma temperatura y diferente irradiancia (línea **color negro** vs línea **color azul**), vemos que a diferencia del primer estudio, la intensidad de cortocircuito desciende cinco veces su valor de la curva azul ($I_{sc}=8,2\text{A}$) a la curva negra

($I_{sc}=1,64A$). Además, se produce un descenso notable de la tensión en circuito abierto (la máxima alcanzable) comparando ambas curvas. Por lo que se lleva a la **segunda conclusión**, el descenso de la irradiancia, es decir, de la cantidad de energía que recibe la placa solar por unidad de área, provoca un descenso notorio de la intensidad (I_{sc}) y voltaje (V_{oc}), además de una disminución de la potencia máxima generada. Así, se puede asociar esta pérdida de potencia con el término, **pérdidas de rendimiento asociadas a la irradiancia**.

Además, si comparamos el caso más desfavorable (curva **verde**) con el caso más favorable (curva **azul**), se observa que la acción combinada de la insuficiente irradiancia y el sobrecalentamiento del panel afectan de manera importante al rendimiento del panel, produciéndose un descenso de la potencia máxima generada de la curva más favorable ($P_{max}=235W$) a la curva más desfavorable ($P_{max}=42W$). Por lo tanto, son dos factores a tener en cuenta a la hora de realizar una instalación de paneles solares.

3. Estudio influencia del marco

Una vez explicados una serie de conceptos relacionados con la radiación, el termocromismo y el funcionamiento de un módulo fotovoltaico, ya se puede llevar a cabo la idea principal de este trabajo, aplicar el termocromismo a la eficiencia solar.

Para ello, la idea principal se basará en aplicar una pintura termocrómica en la superficie no efectiva de los módulos, es decir, el marco y soportes si están dotados de éstos, con el objetivo de reducir la temperatura media de la zona de intercambio de calor (placa – marco). Así, se tiene claro que el color que queremos obtener como transición finalmente tras la variación de la temperatura será el blanco, para obtener la máxima reflectancia, intentando conseguir un índice de reflectividad solar de 1. Además, el color inicial de la pintura (antes de producirse el cambio a blanco), se dejará para determinar más adelante, una vez estudiado primero si es posible reducir la temperatura del sistema (mejorando la eficiencia) y si es rentable. Por lo tanto, primero el estudio se centrará en demostrar si al aplicar el color blanco en dichos elementos del módulo solar, afecta de manera positiva.

3.1 Estudio de secciones de aluminio

3.1.1 Contexto

El estudio se realizará teniendo en cuenta que el material utilizado para marcos o soportes es el aluminio, por ser el elemento más común para este tipo de aplicaciones y por sus excelentes propiedades como reflectante y disipación de calor.

En primer lugar, como el objetivo del estudio es reducir la temperatura del sistema, para ver si esta reducción supone un aumento de la eficiencia, como se ha comprobado en el

apartado de “sobrecalentamiento e irradiancia”, se llevará a cabo un estudio basado en las diferentes temperaturas que adopta el marco de aluminio en dos casos distintos:

- Caso 1: comparación sección bruta de aluminio / sección recubierta de pintura blanca.
- Caso 2: comparación sección de aluminio / sección recubierta de pintura blanca con aumento del espesor.

Así, se realizarán una serie de mediciones experimentales durante un tiempo determinado para ver el comportamiento de la temperatura interior de las secciones en ambos casos. De esta manera, se comprobará si hay diferencias entre ambos casos y si resultan ser beneficiosas para el progreso del estudio.

Para realizar la medición se han tenido en cuenta varios factores:

- Las secciones son idénticas, mismo espesor y longitud.
- Los sensores se han ubicado en el interior de las secciones de igual manera, es decir, a la misma distancia desde el comienzo de dicha sección y en contacto con una de las paredes laterales, para que las temperaturas que se obtengan sean las más próximas a la realidad (las secciones tendrán ciertas superficies en contacto con las celdas solares)
- Se ha llevado a cabo en las horas centrales del día, simulando las horas de luz más funcionales (mayor irradiancia recibida).
- Como se ha comentado, para ver el margen de error de la medición, el caso de pintura blanca se ha realizado dos veces en el mismo estudio.

3.1.2 Contexto específico caso 1

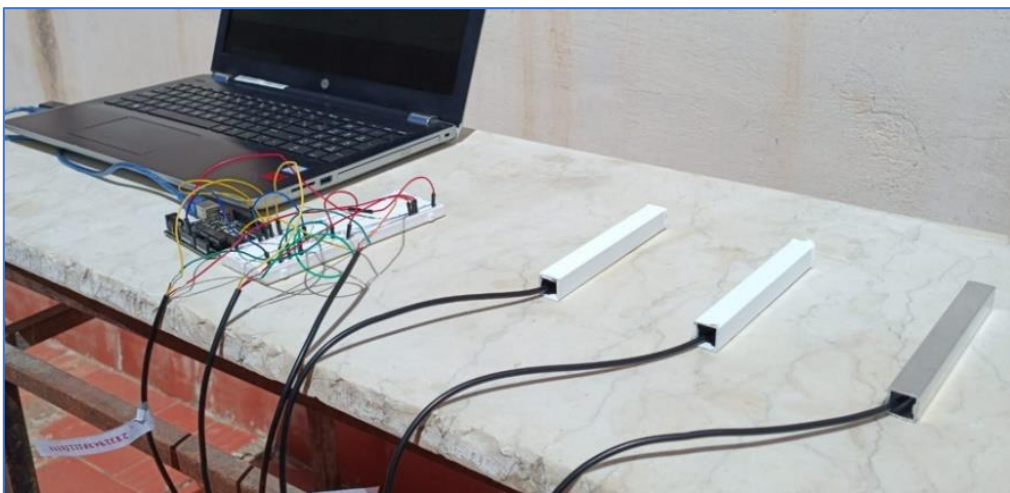


Figura 18. Montaje del equipo medidor



Figura 19. Secciones de aluminio (I)

Una vez montado todo lo necesario para realizar las mediciones, éstas se llevarán a cabo de la siguiente manera:

- Un sensor en el interior de la sección de aluminio sin pintar (aluminio bruto).
- Dos sensores, cada uno en el interior de dos secciones de aluminio recubiertos de pintura blanca.
- Tres mediciones se realizan de forma simultánea, se ha decidido reproducir dos veces el caso de recubrimiento de pintura blanca, para tener dos referencias de los datos obtenidos y asegurarnos de que son válidos.
- Duración de la medición: 3h 20 min.
- Temperatura sensor 1 = temperatura sección de aluminio pintada (I)
- Temperatura sensor 2 = temperatura sección de aluminio bruto
- Temperatura sensor 3 = temperatura sección de aluminio pintada (II)

3.1.3 Contexto específico caso 2



Figura 20. Secciones de aluminio (II)

De la misma manera, se lleva a cabo el estudio de la influencia de la pintura blanca sobre la sección de aluminio para comprobar las variaciones de temperatura, sin embargo, en este estudio se aumentará el espesor de pintura blanca aplicada. Así, se vuelven a realizar los mismos pasos anteriores, montaje del circuito, mismo código de Arduino y mismos factores a tener en cuenta.

- Duración de la medición experimental: 4h 20min.
- Temperatura sensor 1 = temperatura sección de aluminio pintada + espesor (I)
- Temperatura sensor 2 = temperatura sección de aluminio bruto
- Temperatura sensor 3 = temperatura sección de aluminio pintada + espesor (II)

3.1.4 Metodología

Montaje del sistema de medición:

Para llevar a cabo las mediciones experimentales, se ha decidido programar varios sensores de temperatura modelo DS18B20, mediante la interfaz de Arduino, consiguiéndose llevar a cabo tres mediciones (para este estudio, pero se podrían añadir más sensores) al mismo tiempo. Para realizar el montaje del medidor, se necesitarán los siguientes elementos:

- Placa Arduino uno (o similares)
- Resistencia de 5.1 kilo-ohmios
- Cables de varios tipos (macho / hembra)
- Cable USB que conecte el puerto del Arduino con el ordenador
- 3 sensores de temperatura DS18B20
- Placa protoboard

Antes de mostrar el montaje del circuito, es importante conocer las características del sensor. El funcionamiento se basa en la conversión de analógico a digital en el interior del encapsulado (acero inoxidable), cuyo resultado (señales del sensor transmitidas al pin de datos del Arduino) se lleva a cabo a través de la interfaz digital 1-wire.

Así, para el montaje del circuito, se puede realizar de diversas formas, una forma sencilla sería conectar el terminal DQ (datos) de cada uno de los sensores, a diferentes puertos del Arduino. En este caso, se ha decidido por llevar a cabo un montaje basado en que las tres señales se recibirán en un solo puerto del Arduino:

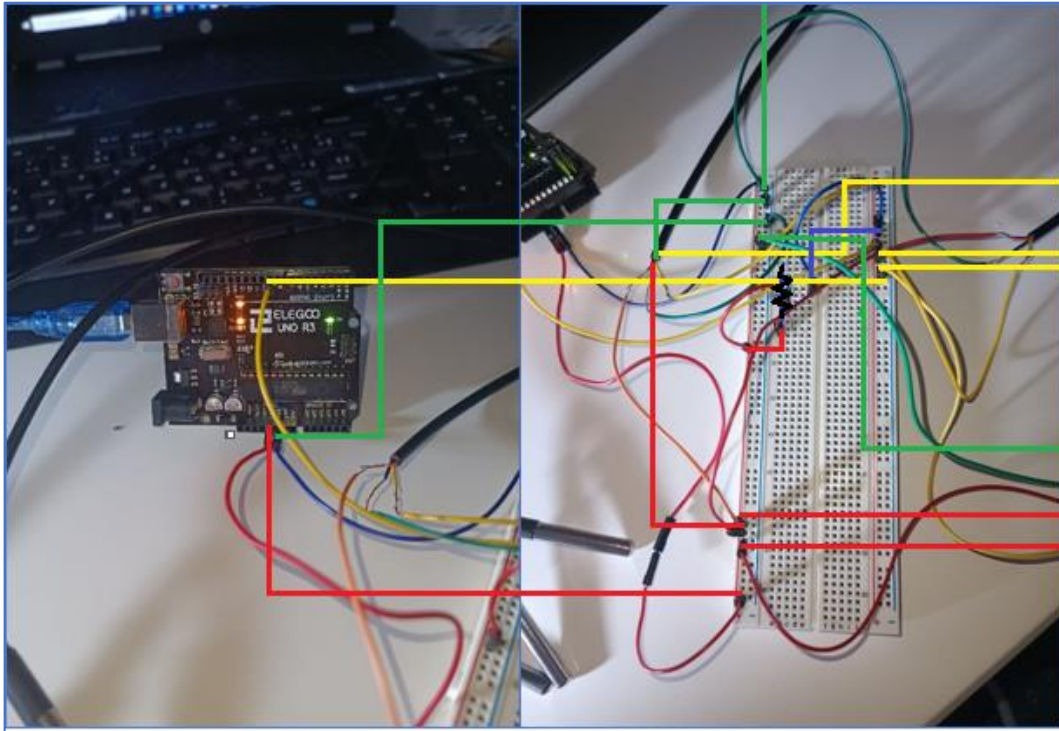


Figura 21. Conexiones del sensor DS18B20

En la figura 24, se muestra de manera clara y sistemática la forma en la que se realizan las conexiones entre la placa Arduino y la protoboard. Como se observa, hay que realizar un puente entre las conexiones que van a voltaje (rojas) y las conexiones que van al pin de datos (amarillas) mediante una resistencia intermedia.

- El terminal rojo representa el conector Vdd (a la fuente de voltaje).
- El terminal negro-verde representa el conector a GND (a tierra).
- El terminal amarillo representa el conector al pin de datos (DQ), en el cual mediante comunicación 1-Wire, permite conectar los tres sensores en el mismo bus, o lo que es lo mismo, a partir de un solo pin de conexión (en la placa Arduino), podremos conocer las señales de los tres sensores de temperatura.

*Así, la distribución del cableado en la placa protoboard se puede realizar de diversas formas, siempre y cuando se respete las conexiones internas de la placa.

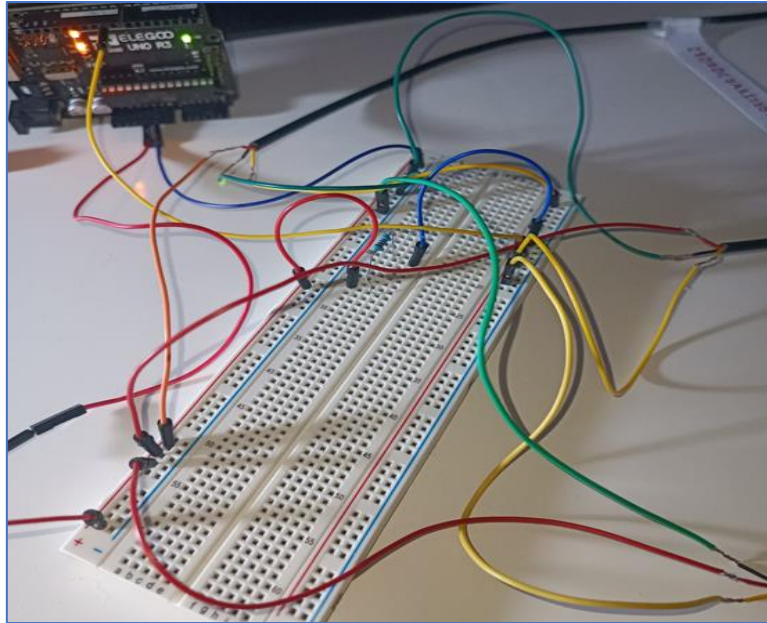


Figura 22. Montaje del circuito basado en 3 sensores DS18B20

Como se puede observar, para llevar un orden y que se viese la ubicación de cada cable más clara, se han agrupado en zonas todos los terminales comunes, es decir, todos los terminales Vdd (cables rojos), los terminales GND (cables verdes) y los terminales DQ (cables amarillos). Así, una vez colocado la resistencia que debe ir entre los terminales Vdd y los terminales DQ (cables amarillos), mediante un cable referente a cada grupo de terminales, conectamos en la placa Arduino en los puertos correspondientes:

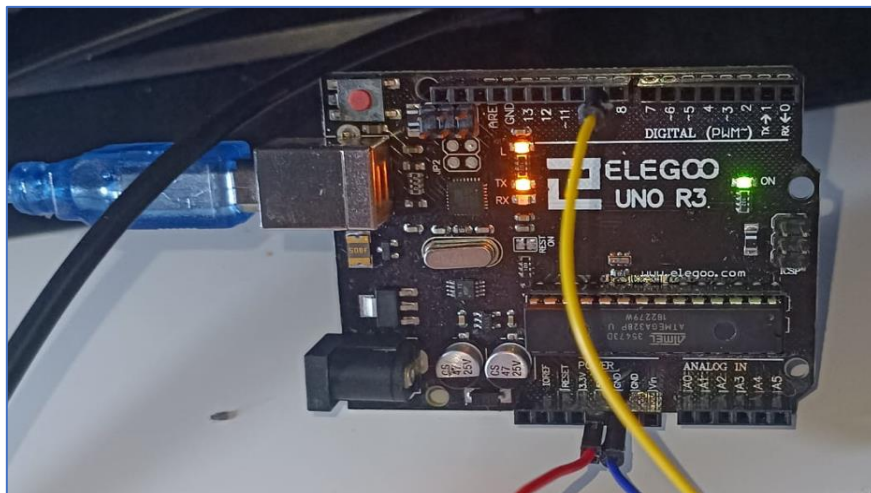


Figura 23. Conexiones a los puertos de la placa Arduino

Una vez que se ha realizado el montaje del circuito, hay que realizar la programación de los sensores mediante el Arduino. Como se ha comentado anteriormente, al mandar al mismo pin de datos las mediciones tomadas por los tres sensores, se deben conocer las rutas o direcciones de cada sensor para posteriormente, codificar la ruta para que cuando

el pin reciba los datos procedentes de los sensores, pueda distinguirlos (ya que cada uno tiene una ruta única). Así, la programación del circuito se llevará a cabo en dos pasos, obtener las rutas que identifican cada sensor y codificar la detección de temperaturas. A continuación, se muestra el código de obtención de las direcciones de cada sensor [13]:

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
const int pinDatosDQ = 9;

// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);

void setup()
{
    // Iniciamos monitor serie y sensor de temperatura DS18B20
    Serial.begin(9600);
    sensorDS18B20.begin();

    // Buscamos los sensores conectados
    Serial.println("Buscando dispositivos...");
    Serial.println("Encontrados: ");
    int numeroSensoresConectados = sensorDS18B20.getDeviceCount();
    Serial.print(numeroSensoresConectados);
    Serial.println(" sensores");

    // Si hemos encontrado uno mostramos su dirección
    if(numeroSensoresConectados==1){

        // Tipo definido como una array de 8 bytes (uint8_t)
        DeviceAddress sensorTemperatura;

        // Obtenemos dirección
        sensorDS18B20.getAddress(sensorTemperatura, 1);

        // Mostramos por el monitor serie
        Serial.print("Sensor encontrado: ");

        // Recorremos los 8 bytes del identificador único
        for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
        {
            // Si solo tiene un dígito rellenamos con un cero a la
            izquierda
            if (sensorTemperatura[i] < 16) Serial.print("0");

            // Mostramos los datos que van en HEXADECIMAL
            Serial.print(sensorTemperatura[i], HEX);
        }
    }
}

void loop() {
```

Así, obtenemos las direcciones de cada sensor DS18B20:

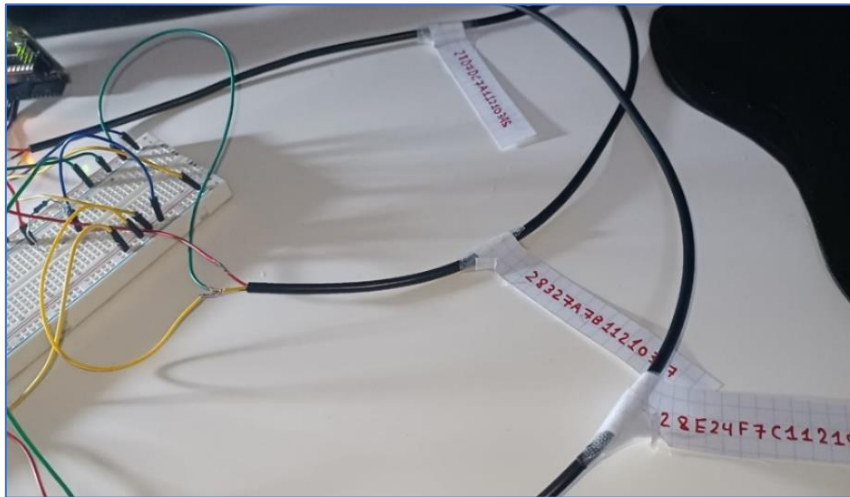


Figura 24. Etiquetado de cada sensor correspondiente a su ruta

Una vez obtenidas las direcciones de los sensores, se ejecuta el código correspondiente a la medición de temperaturas:

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
const int pinDatosDQ = 9;

// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
OneWire oneWireObjeto (pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20 (&oneWireObjeto);

// Variables con las direcciones únicas de los 3 sensores DS18B20
DeviceAddress sensor1 = {0x28, 0xD7, 0xDC, 0x7A, 0x11, 0x21, 0x03, 0x95};
DeviceAddress sensor2 = {0x28, 0xE2, 0x4F, 0x7C, 0x11, 0x21, 0x03, 0x63};
DeviceAddress sensor3 = {0x28, 0x32, 0x7A, 0x7B, 0x11, 0x21, 0x03, 0x77};

void setup ()
{
    // Iniciamos la comunicación serie
    Serial.begin (9600);

    // Iniciamos el bus 1-Wire
    sensorDS18B20.begin ();

    // Buscamos los sensores conectados
    Serial.println ("Buscando dispositivos...");
    Serial.println ("Encontrados: ");
    Serial.print (sensorDS18B20.getDeviceCount ());
    Serial.println (" sensores");
}
```

```

}

void loop()
{
    // Mandamos comandos para toma de temperatura a los sensores
    Serial.println("Mandando comandos a los sensores");
    sensorDS18B20.requestTemperatures();

    // Leemos y mostramos los datos de los sensores DS18B20 por
    // dirección única
    Serial.print("Temperatura sensor 1: ");
    Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor1));
    Serial.println(" C");
    Serial.print("Temperatura sensor 2: ");
    Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor2));
    Serial.println(" C");
    Serial.print("Temperatura sensor 3: ");
    Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor3));
    Serial.println(" C");
    delay(1000);
}

```

Almacenamiento de datos:

Con ayuda del programa “CoolTerm”, se consiguen almacenar las mediciones obtenidas durante el estudio:

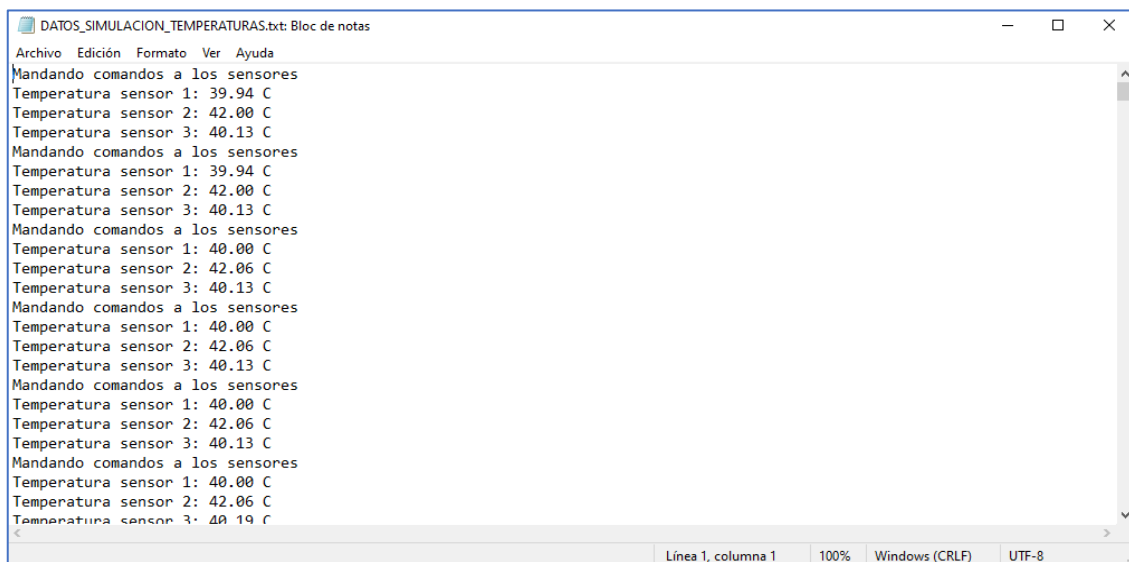


Figura 25. Almacenamiento de las mediciones

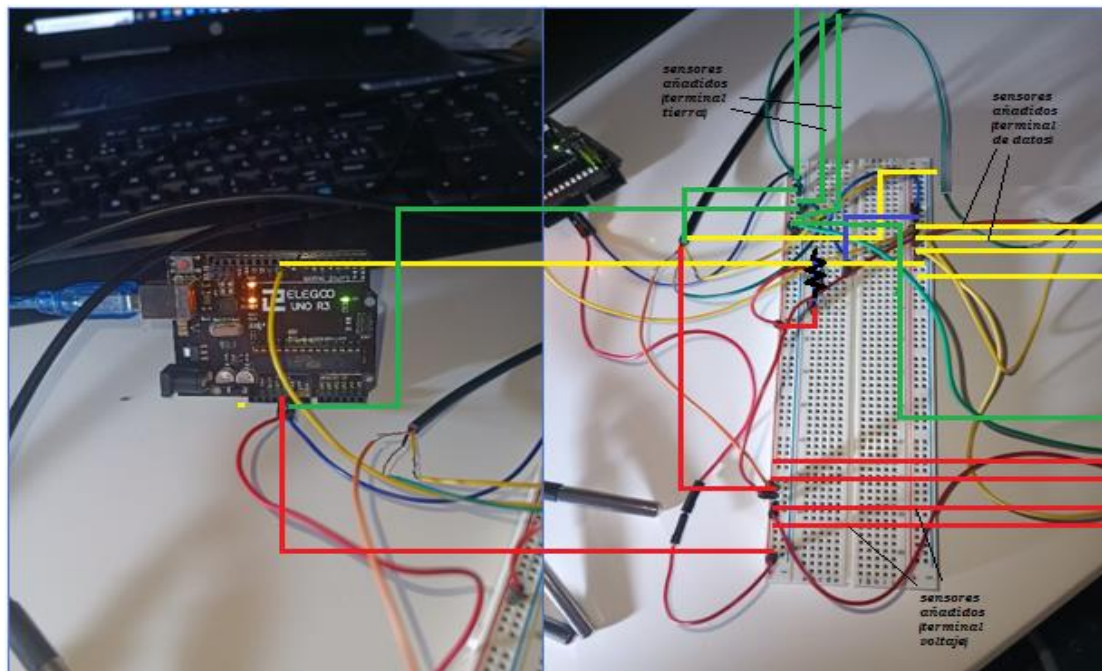


Figura 26. Variaciones en las conexiones del sensor DS18B20

De esta forma, se ha realizado el montaje del circuito de sensores, se ha explicado como ejecutar dicho montaje mediante una imagen esquemática, además de mostrar las líneas de código para el funcionamiento del equipo de medida. En próximos apartados, se requerirá un equipo de medida de 5 sensores, en el que el procedimiento de montaje será similar.

Se vuelven a aplicar el mismo código para obtener las direcciones de los dos sensores nuevos (se debe hacer dejando en el circuito montado únicamente el sensor del que quieres obtener su dirección) y seguidamente se aplica el código referente a la obtención de las temperaturas adaptado al caso de 5 sensores:

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
const int pinDatosDQ = 9;

// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);

// Variables con las direcciones únicas de los 5 sensores DS18B20
DeviceAddress sensor1 = {0x28, 0xD7, 0xDC, 0x7A, 0x11, 0x21, 0x03, 0x95};
DeviceAddress sensor2 = {0x28, 0xE2, 0x4F, 0x7C, 0x11, 0x21, 0x03, 0x63};
DeviceAddress sensor3 = {0x28, 0x32, 0x7A, 0x7B, 0x11, 0x21, 0x03, 0x77};
DeviceAddress sensor4 = {0x28, 0x3A, 0x4E, 0x7B, 0x11, 0x21, 0x03, 0x4D};
```

```

DeviceAddress sensor5 = {0x28, 0xE3, 0xCD, 0xD0, 0x12, 0x21, 0x01, 0xFF};

void setup()
{
    // Iniciamos la comunicación serie
    Serial.begin(9600);

    // Iniciamos el bus 1-Wire
    sensorDS18B20.begin();

    // Buscamos los sensores conectados
    Serial.println("Buscando dispositivos...");
    Serial.println("Encontrados: ");
    Serial.print(sensorDS18B20.getDeviceCount());
    Serial.println(" sensores");
}

void loop()
{
    // Mandamos comandos para toma de temperatura a los sensores
    Serial.println("Mandando comandos a los sensores");
    sensorDS18B20.requestTemperatures();

    // Leemos y mostramos los datos de los sensores DS18B20 por
    // dirección única
    Serial.print("Temperatura sensor 1: ");
    Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor1));
    Serial.println(" C");
    Serial.print("Temperatura sensor 2: ");
    Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor2));
    Serial.println(" C");
    Serial.print("Temperatura sensor 3: ");
    Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor3));
    Serial.println(" C");
    Serial.print("Temperatura sensor 4: ");
    Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor4));
    Serial.println(" C");
    Serial.print("Temperatura sensor 5: ");
    Serial.print(sensorDS18B20.getTempC(sensor5));
    Serial.println(" C");

    delay(1000);
}

```

3.1.5 Resultados

CASO 1:

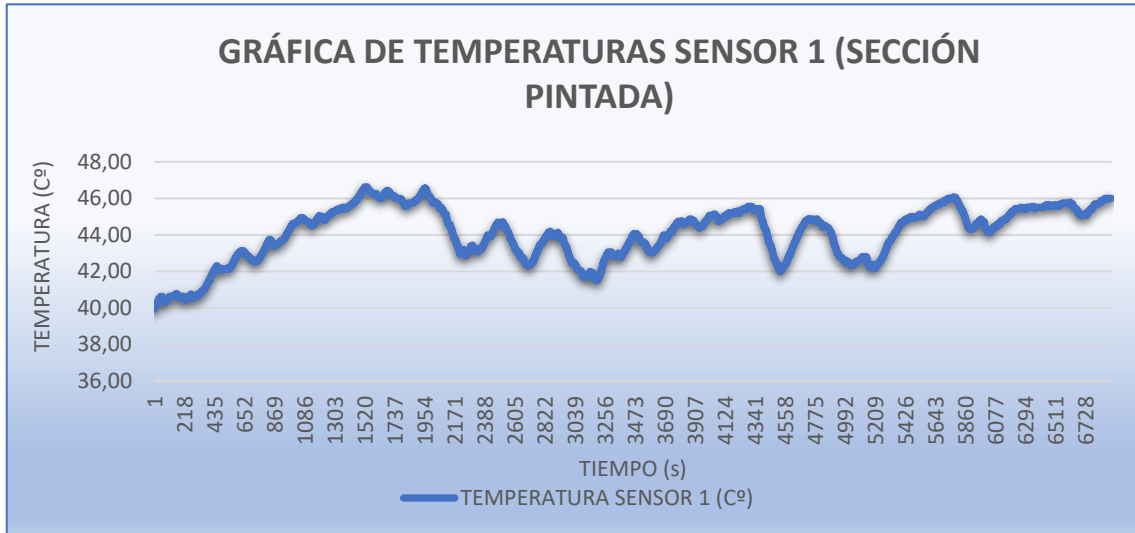


Figura 27. Resultado distribución de temperaturas sensor 1

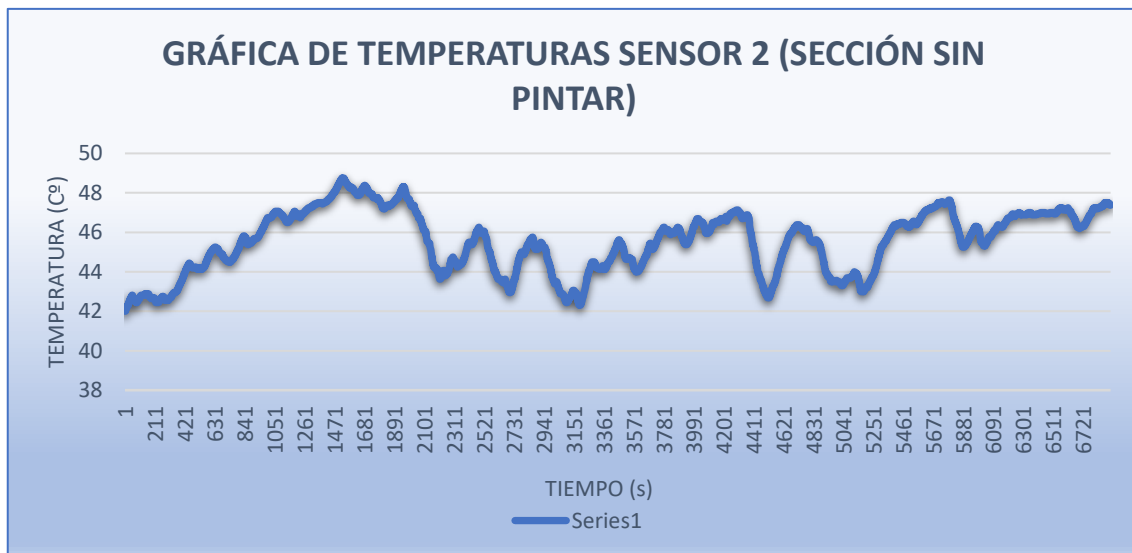


Figura 28. Resultado distribución de temperaturas sensor 2

En este caso, la distribución de temperaturas del sensor 3 se utiliza exclusivamente para verificar que la medición se ha realizado con éxito.

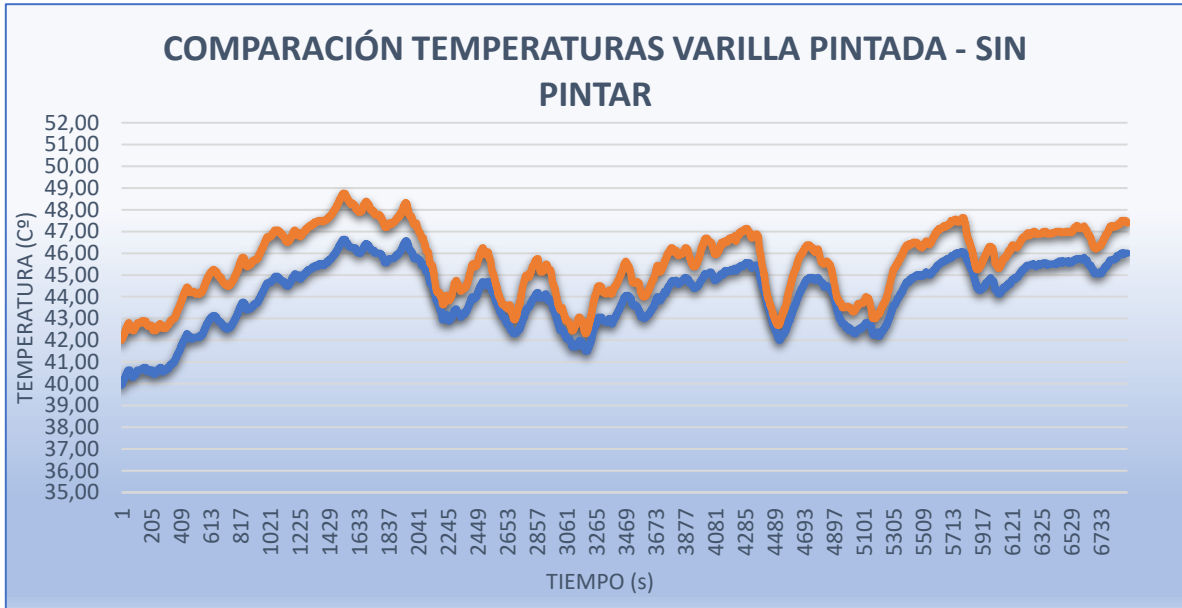


Figura 29. Resultado distribución de temperaturas comparativa (I)

Mediante las funciones de las que dispone Excel (=PROMEDIO), calculamos la temperatura promedio de la medición realizada (duración = 4h 20 min):

- T_{prom} (sensor 1): 44,089 C°
- T_{prom} (sensor 2): 45,552 C°

CASO 2:

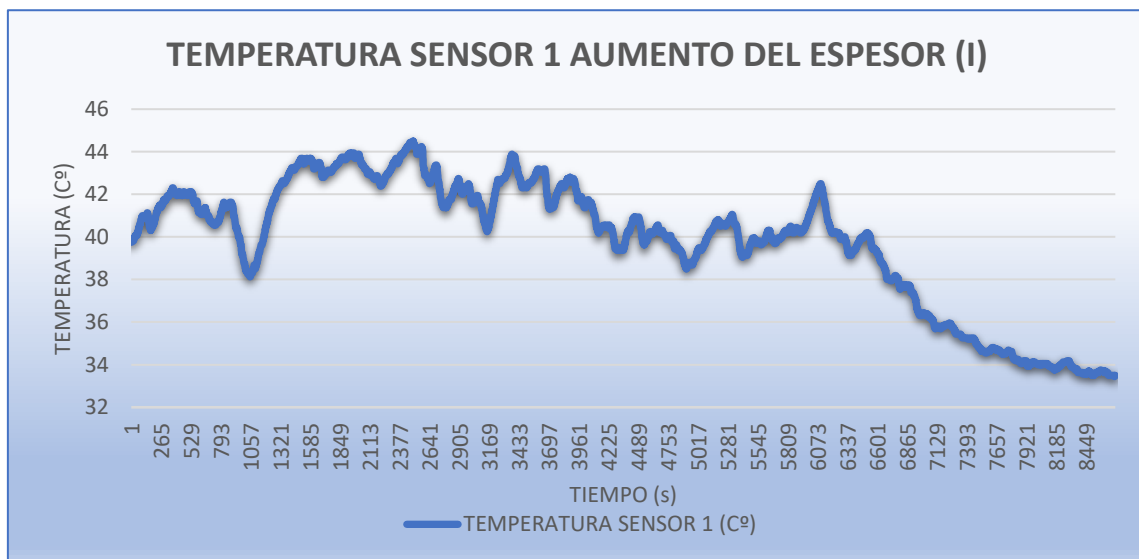


Figura 30. Resultado distribución de temperaturas (+ espesor)(I)

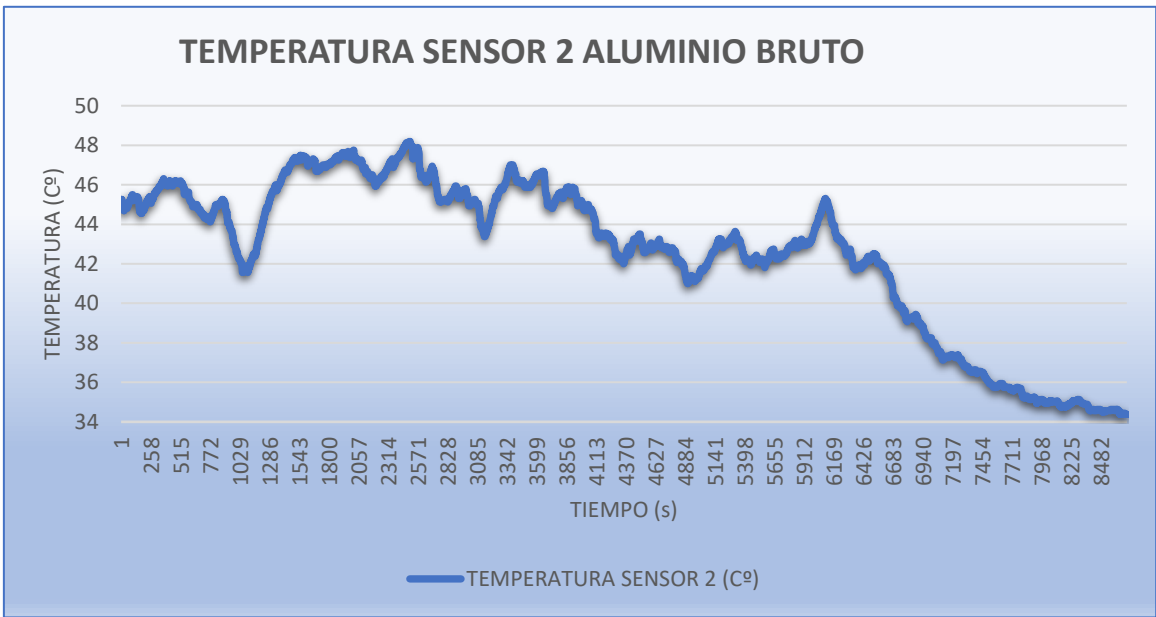


Figura 31. Resultado distribución de temperaturas aluminio bruto

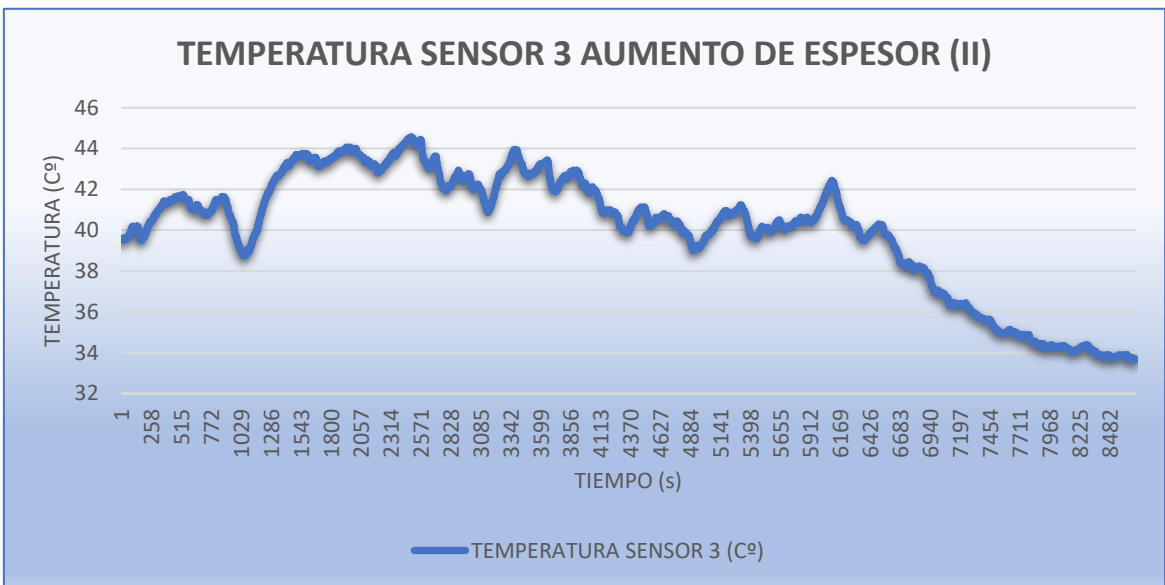


Figura 32. Resultado distribución de temperaturas (+ espesor)(II)

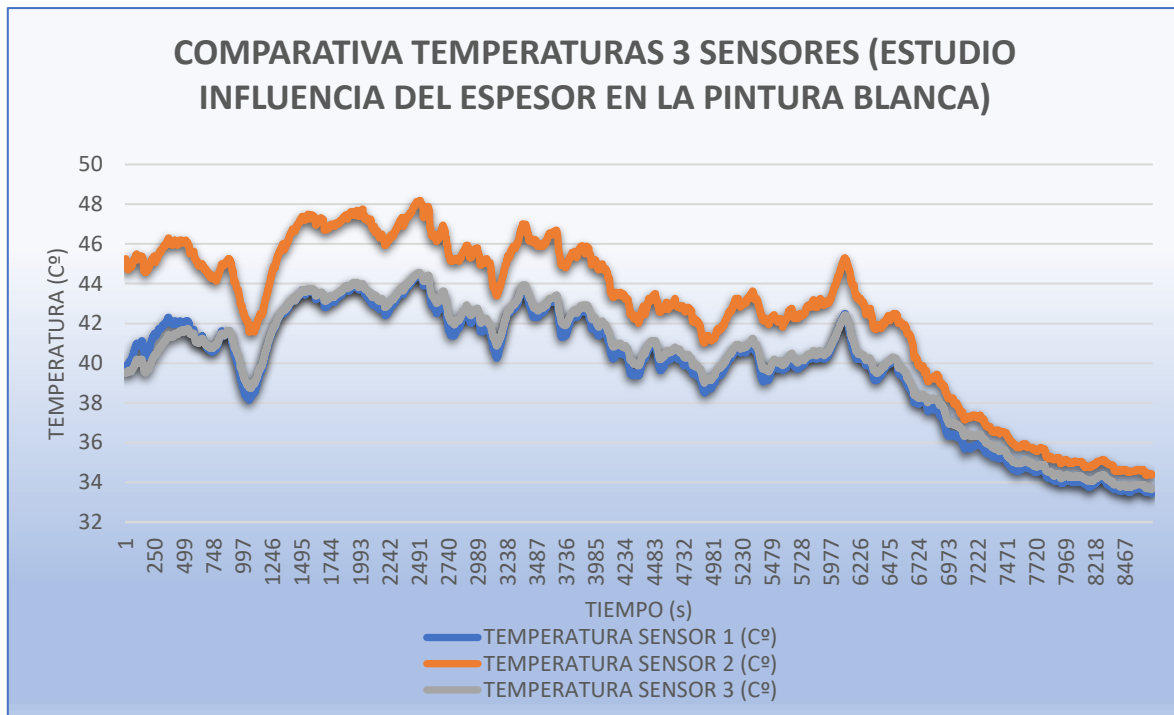


Figura 33. Resultado distribución de temperaturas comparativa (II)

- T_{prom} (sensor 1): 39,86 C°
- T_{prom} (sensor 2): 42,61 C°
- T_{prom} (sensor 3): 40,09 C°

3.1.6. Conclusión

CASO 1:

Se observa que, durante toda la medición, la gráfica correspondiente a la sección de aluminio pintada se mantiene por debajo de la gráfica de sección sin pintar, lo que se traduce en una **reducción de la temperatura** significativa con el simple hecho de variar la reflectividad y emisividad de las superficies de estudio.

Se consigue una diferencia promedio de aproximadamente 1,5 C°, y en numerosos instantes de tiempo diferencias de temperatura de 2 C°, un valor objetivamente significativo, ya que el aluminio de por sí, presenta excelentes características en referencia a la reflectancia, a la refracción y emisividad de la luz incidente. Por lo tanto, con este primer estudio, se demuestra la reducción de la temperatura aplicando el caso óptimo basado en el uso de pintura blanca (100% reflectancia).

CASO 2:

Por un lado, se obtiene una diferencia de temperatura entre los sensores 1 - 3 (entre las dos mediciones de recubrimiento similares) de $0,23^{\circ}\text{C}$. Esta variación tiene su justificación, ya que, aunque las dos secciones en las que se han aplicado varias capas de pintura para aumentar el espesor, hay que tener en cuenta que pueden no tener exactamente el mismo espesor, además de que, en el proceso de secado, la pintura se ha distribuido de manera similar pero no exacta. De ahí esa diferencia de temperatura, contando el resto de los factores influyentes como la precisión del sensor, la posición precisa del sensor en ambas secciones, la incidencia de la luz incidente...

Por otro lado, si comparamos la sección de aluminio bruto con la sección blanca con aumento de espesor, se aprecia que la diferencia de temperatura se hace notable, llegando a alcanzar 4 grados aproximadamente de diferencia en numerosos instantes de tiempo. Comparando temperaturas promedio, se obtiene una diferencia promedio de temperatura $[T_{\text{prom}}(\text{sensor2}) - T_{\text{prom}}(\text{sensor1})]$ de $2,75^{\circ}\text{C}$. Esto se traduce en aproximadamente 3 grados de diferencia durante la duración total (En el óptimo caso comparando con sensor 1) de la medición.

Además, conforme la temperatura de la sección aumenta, el efecto de la pintura blanca se incrementa, por el contrario, acorde al descenso de la temperatura de la sección, el efecto de la pintura disminuye, en función de la velocidad de enfriamiento y de la temperatura a la que comience el descenso, ya que no es lo mismo un descenso de 49 a 47 grados, que de 48 a 43 grados.

El aumento del espesor actúa como aislante, esto se traduce con un comportamiento más controlado al conservar mejor el calor. A la izquierda se muestra el comportamiento de las curvas (sección pintura blanca con espesor / sección bruta) y a la derecha (pintura blanca sin aumento de espesor / sección bruta).

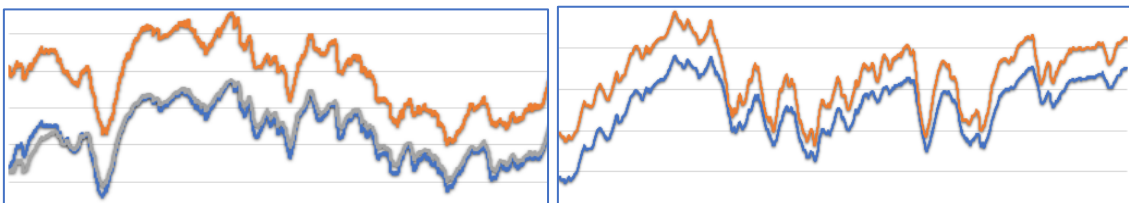


Figura 34. Influencia del espesor de la capa de pintura en el comportamiento de las curvas

Como conclusión, se vuelve a demostrar la hipótesis principal de forma potenciada, con la doble función de **reflectante y aislante**, ya que se ha comprobado que, la combinación de pintura blanca sumada al aumento del espesor ofrece como resultado un descenso notable de la temperatura de la sección.

4. Simulación térmica placa fotovoltaica

Para estudiar la transmisión de calor en un módulo fotovoltaico, se llevará a cabo una serie de simulaciones mediante el programa Ansys, obteniendo así una visión clara y simplificada de la ocurrencia de este fenómeno. Además, se simularán dos casos (con y sin aplicación de pintura) para observar el efecto producido.

4.1 Procedimiento

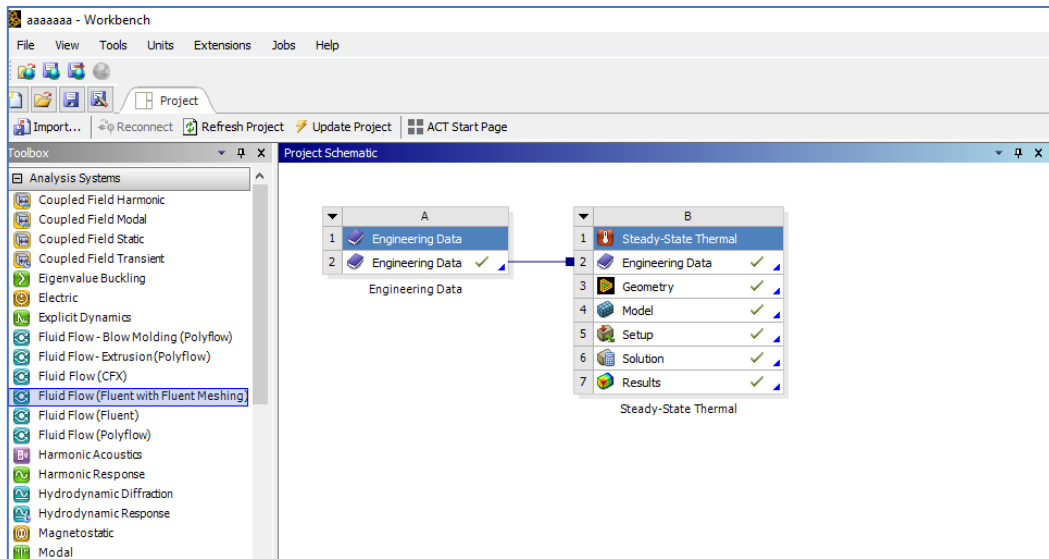


Figura 35. Interfaz Workbench

Dentro de todas las interfaces que engloba Ansys, se encuentra Workbench, en la cual, se trabajará como punto de partida para desarrollar las simulaciones. Dicho lo cual, en primer lugar, mediante “Engineering Data”, se seleccionan y crean, los materiales necesarios que más adelante se asociarán a una parte sólida del módulo.

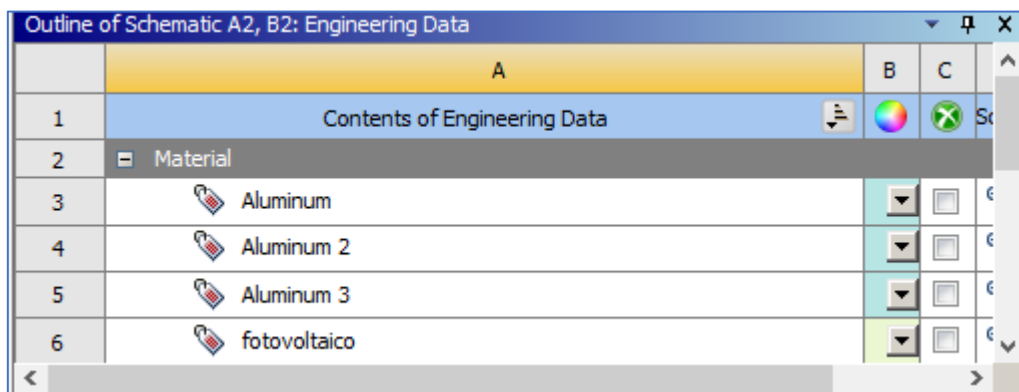


Figura 36. Engineering data

Para simplificar la simulación, el módulo fotovoltaico se dividirá en dos partes, celdas solares y marco. De esta manera, se crea un material “fotovoltaico” con las propiedades de dichas celdas, además de seleccionar el material del marco “aluminum” con variantes en las que se retocarán las características del aluminio simulando los casos planteados (con y sin pintura).

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2689	kg m ⁻³		
4	Isotropic Thermal Conductivity	237,5	W m ⁻¹ K ⁻¹		
5	Specific Heat Constant Pressure, C _p	951	J kg ⁻¹ K ⁻¹		

Figura 37. Aluminio material (bruto)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2689	kg m ⁻³		
4	Isotropic Thermal Conductivity	235	W m ⁻¹ K ⁻¹		
5	Specific Heat Constant Pressure, C _p	949	J kg ⁻¹ K ⁻¹		

Figura 38. Aluminio material (con pintura)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2330	kg m ⁻³		
4	Isotropic Thermal Conductivity	148	W m ⁻¹ K ⁻¹		
5	Specific Heat Constant Pressure, C _p	677	J kg ⁻¹ K ⁻¹		

Figura 39. Material celda solar

A continuación, se introduce el estudio basado en “Steady–State Thermal”, en el cual, se conectarán los datos procedentes de “Engineering Data” y posteriormente el resto de los parámetros.

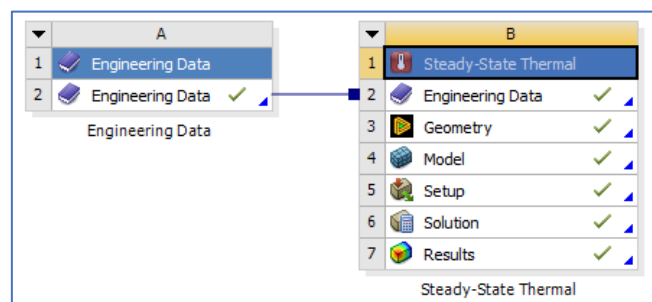


Figura 40. Steady-State Thermal

Seguidamente, en el apartado referente a “Geometry”, se modelará el módulo fotovoltaico. Mediante “DesignModeler” (se accede tras pinchar en Geometry), diseñamos el siguiente modelo:

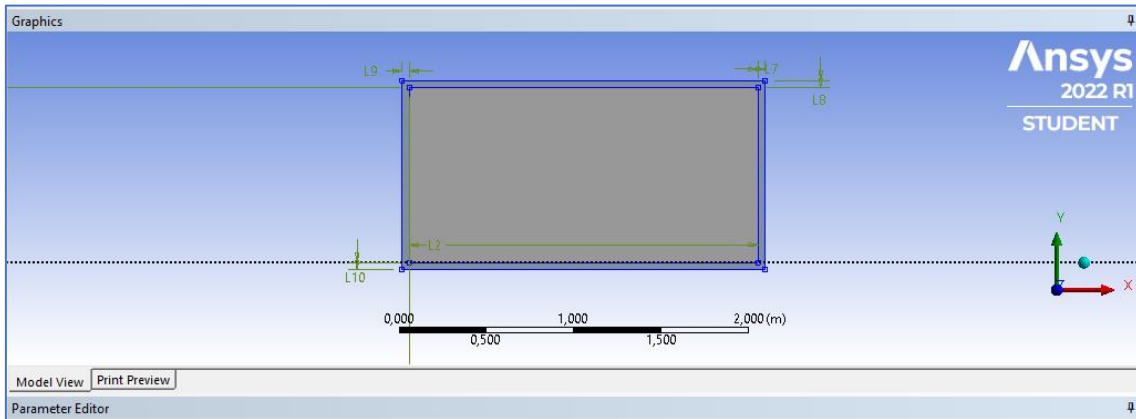


Figura 41. Sketching/DesignModeler (I)

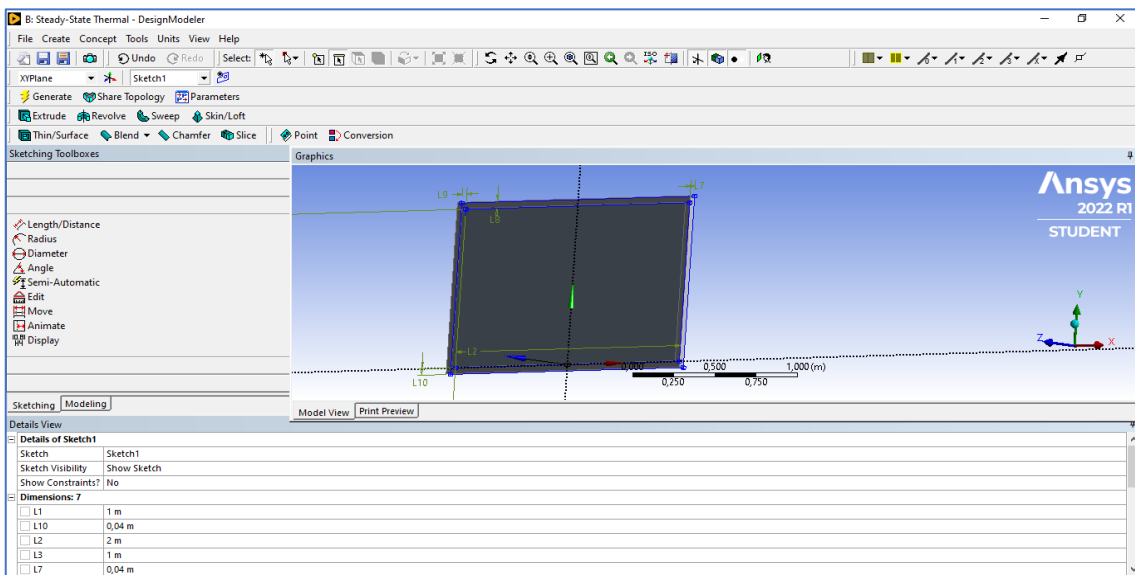


Figura 42. Sketching/DesignModeler (I)

Para el modelado, se han tenido en cuenta las dimensiones de la placa solar en la cual, se desarrollará un estudio posterior. Una vez diseñada la geometría, se accede al modelo, el cual nos reconduce a la interfaz Mechanical [Ansys Mechanical Enterprise], en la cual se determinarán las condiciones de contorno.



Figura 43. Condiciones de contorno

A continuación, una vez asociados los materiales a los sólidos (placa y marco), se crea la malla, la cual, se intenta afinar lo máximo posible para obtener resultados más precisos:

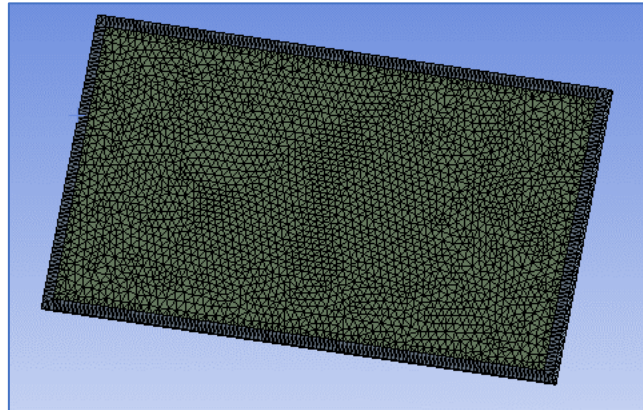


Figura 44. Condiciones de contorno

Una vez realizado el mallado, quedaría definir los tipos de transmisión de calor. Además, se definirán unas condiciones estándar para la convección y la radiación, ya que lo importante de este estudio, es observar el comportamiento y compararlo en ambos casos.

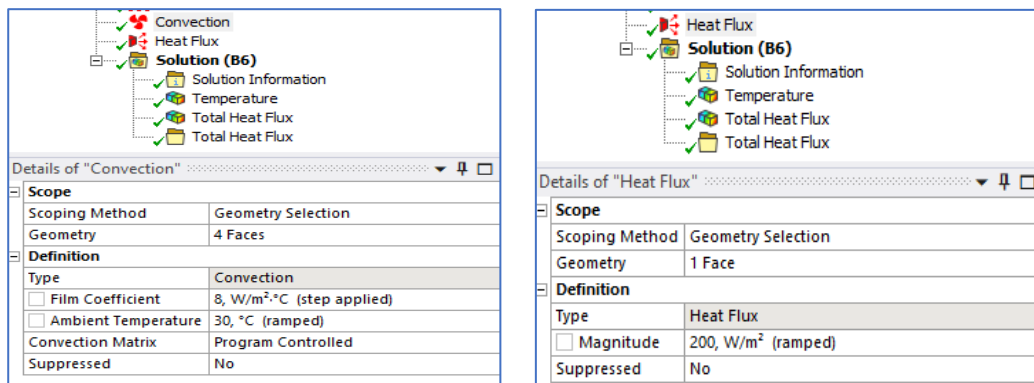


Figura 45. Condiciones de contorno

4.2 Resultados

4.2.1 Caso 1 (sin pintura)

TRANSICIÓN DE TEMPERATURAS

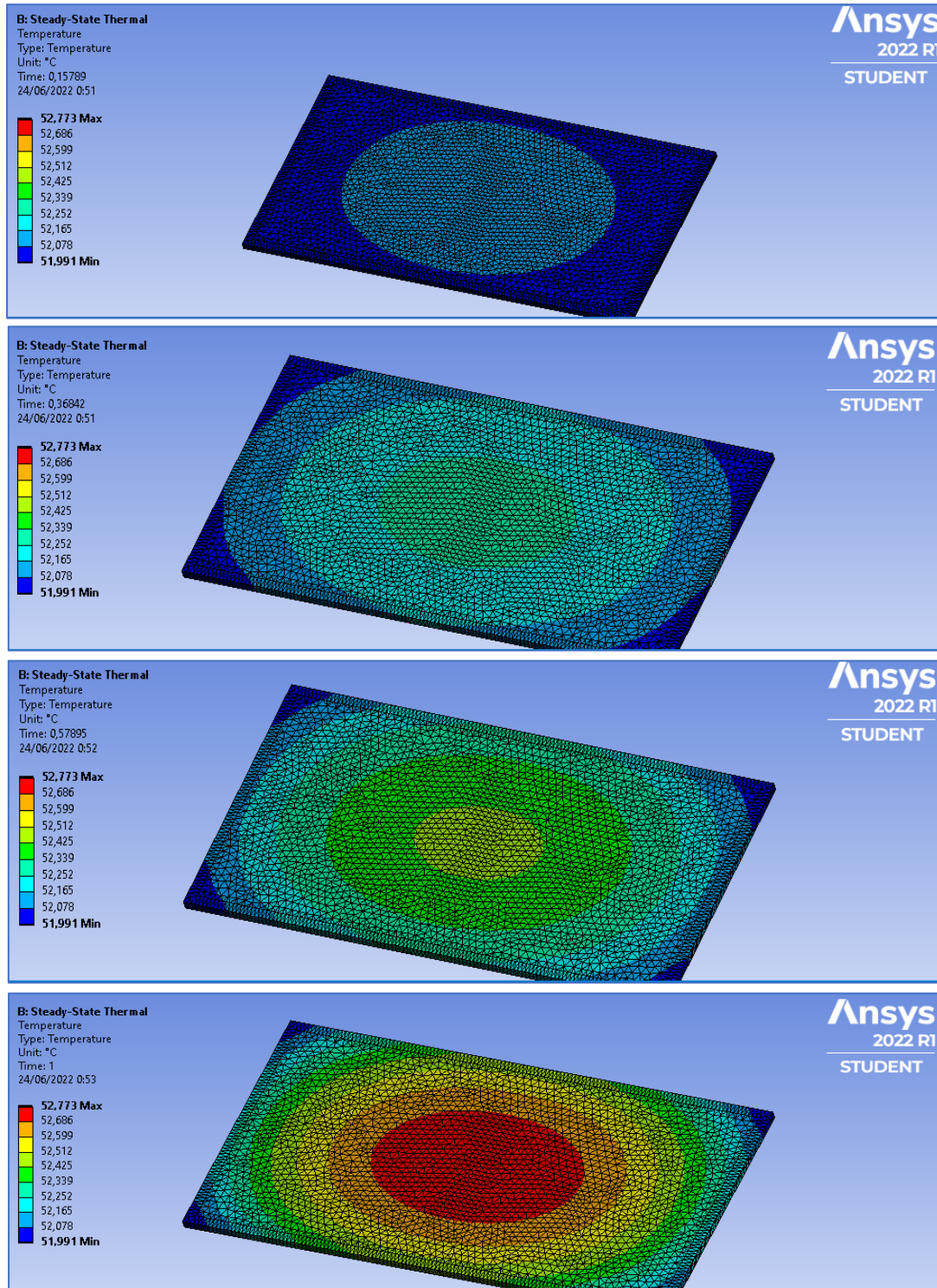


Figura 46. Transición de temperaturas caso 1

TRANSICIÓN FLUJO DE CALOR

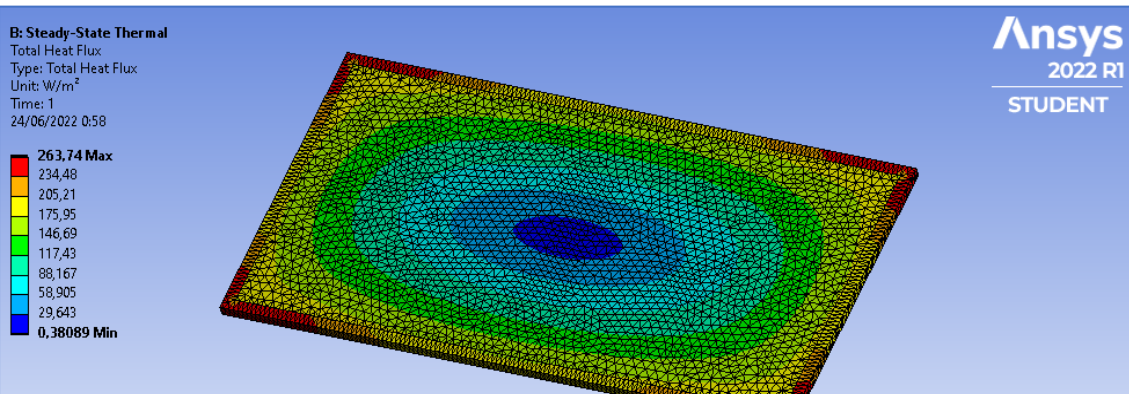
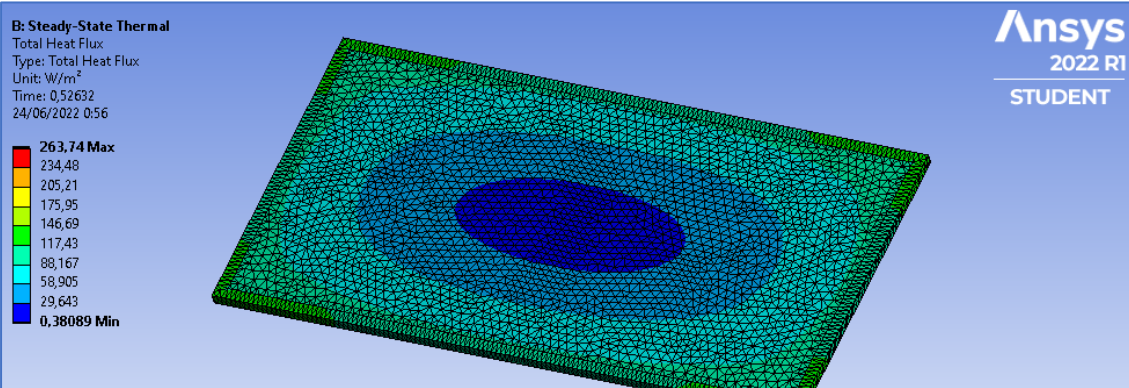
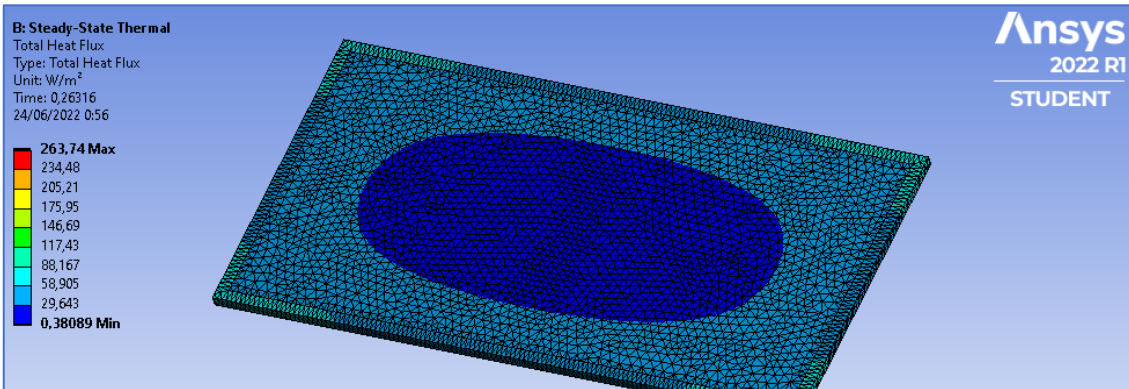
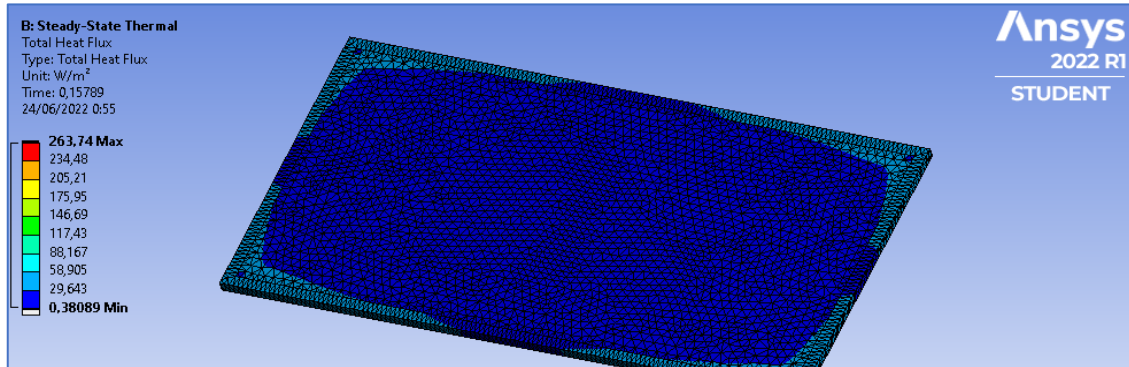


Figura 47. Transición de flujo de calor caso 1

VARIACIÓN DE FLUJO DE CALOR EN EL MARCO

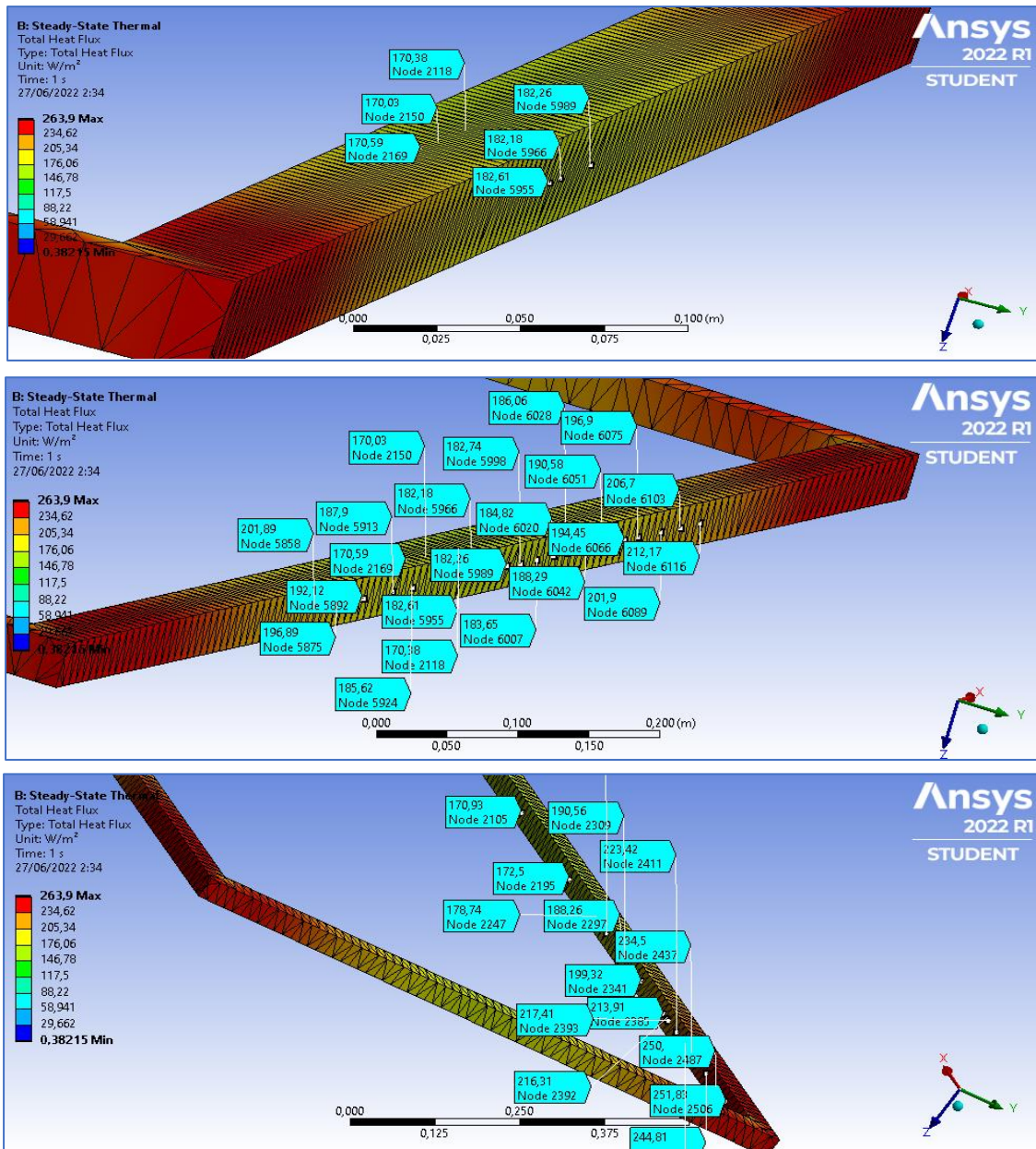


Figura 48. Variación del flujo de calor en el marco (2m) caso

Se han tomado los valores del flujo de calor de los nodos situados (en la misma línea) en ambos extremos del marco, para estudiar la diferencia de flujo existente. Se estima una diferencia de flujo en torno a 12 W/m² en los laterales de 2m de longitud.

$$Q_{\text{marco lat.1}} = A_{\text{efectiva1}} \times Q_{\text{nodos}} ; A_{\text{efectiva1}} = e \times l_{\text{efectiva1}} = 0,035\text{m} \times 2\text{m}$$

$$A_{\text{efectiva}} = 0,07 \text{ m}^2 ; Q_{\text{nodos}} = 12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ (valor aproximado)}$$

$$Q_{\text{marco lat.1}} = 0,07 \text{ m}^2 \times 12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 0,84 \text{ W}$$

Así, obtenemos la cantidad de calor que atraviesa una parte lateral del marco (son 4 partes laterales), se le llamará con subíndice “*marco lat.1*” a los dos laterales de 2m de longitud y “*marco lat.2*” a los dos laterales de 1m de longitud.

$$Q_{\text{marco lat.1 (total)}} = 2 \times Q_{\text{marco lat.1}} = 2 \times 0,84 \text{ W} = 1,68 \text{ W}$$

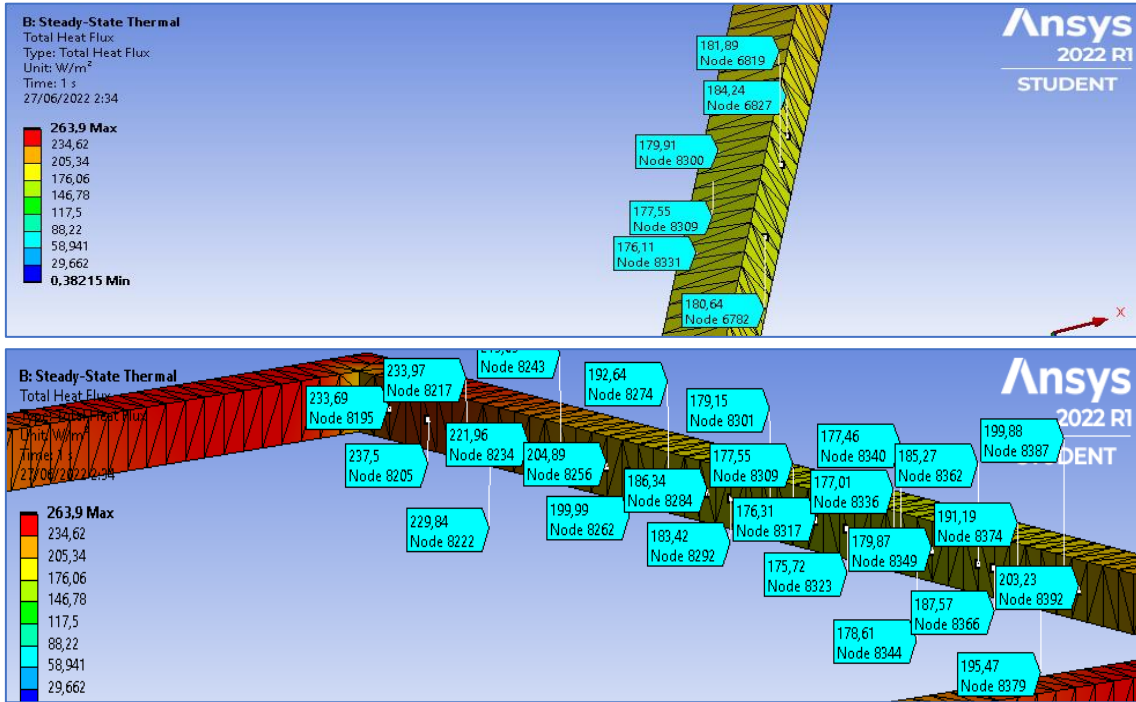


Figura 49. Variación del flujo de calor en el marco (1m) caso

Se estima una diferencia de flujo de calor entre los laterales de 1m de longitud de 5 W/m^2 (se tienen en cuenta en la estimación los valores de los nodos de ambos laterales).

$$Q_{\text{marco lat.2}} = A_{\text{efectiva2}} \times Q_{\text{nodos}} ; A_{\text{efectiva2}} = e \times l_{\text{efectiva2}} = 0,035 \text{ m} \times 1 \text{ m}$$

$$A_{\text{efectiva2}} = 0,035 \text{ m}^2 ; Q_{\text{nodos}} = 5,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ (valor aproximado)}$$

$$Q_{\text{marco lat.1}} = 0,035 \text{ m}^2 \times 5,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 0,193 \text{ W}$$

$$Q_{\text{marco lat.1 (total)}} = 2 \times Q_{\text{marco lat.1}} = 2 \times 0,193 \text{ W} = 0,385 \text{ W}$$

Así, sumando los valores de los flujos de calor de las 4 paredes laterales, obtiene:

$$Q_{\text{marco}} = Q_{\text{marco lat.1}} + Q_{\text{marco lat.2}} = 0,385 + 1,68 = 2,07 \text{ W}$$

DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN

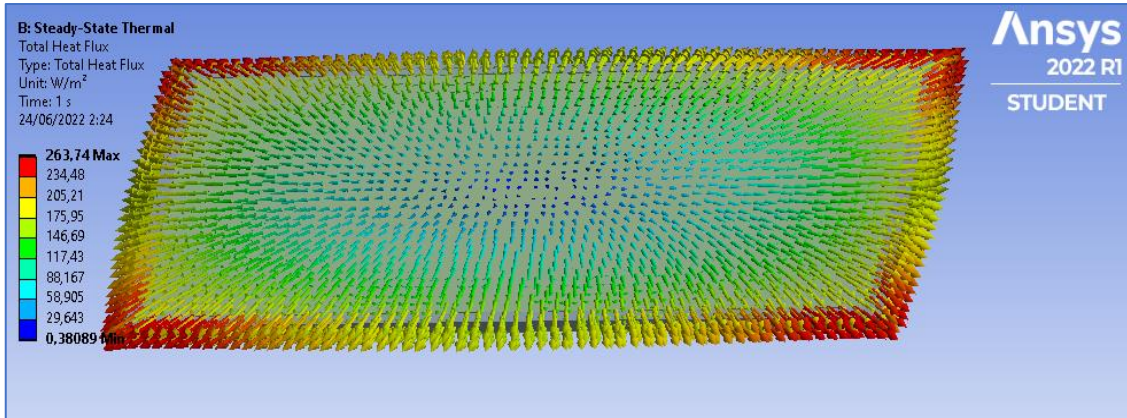
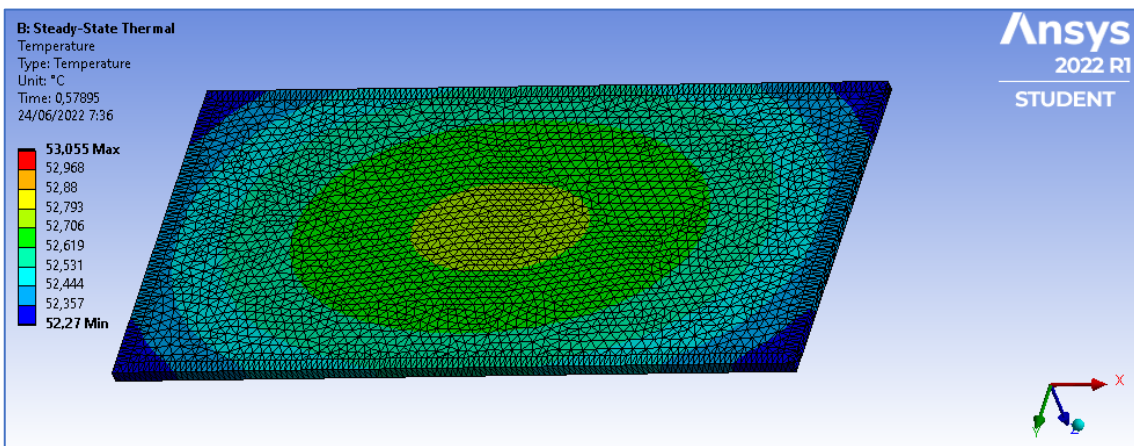
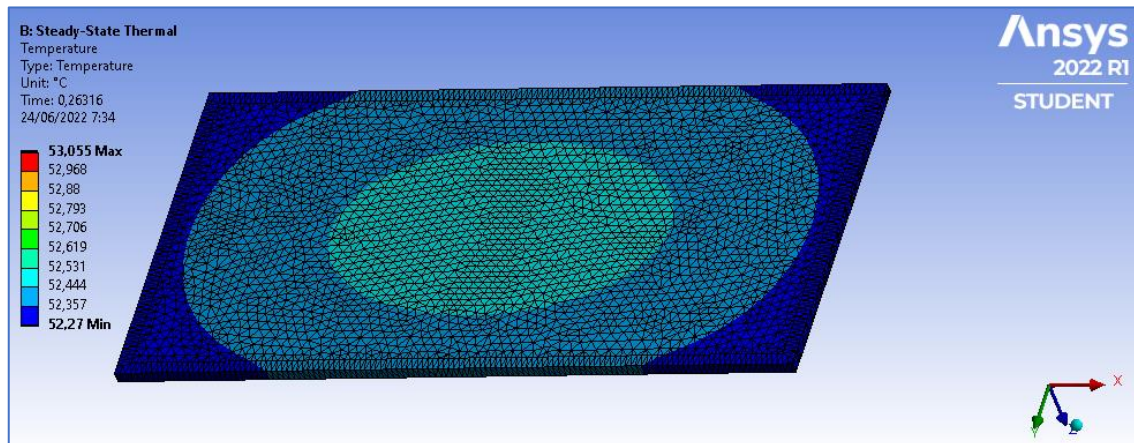


Figura 50. Dirección de propagación del calor caso 1

4.2.2 Caso 2 (con pintura)

TRANSICIÓN DE TEMPERATURAS



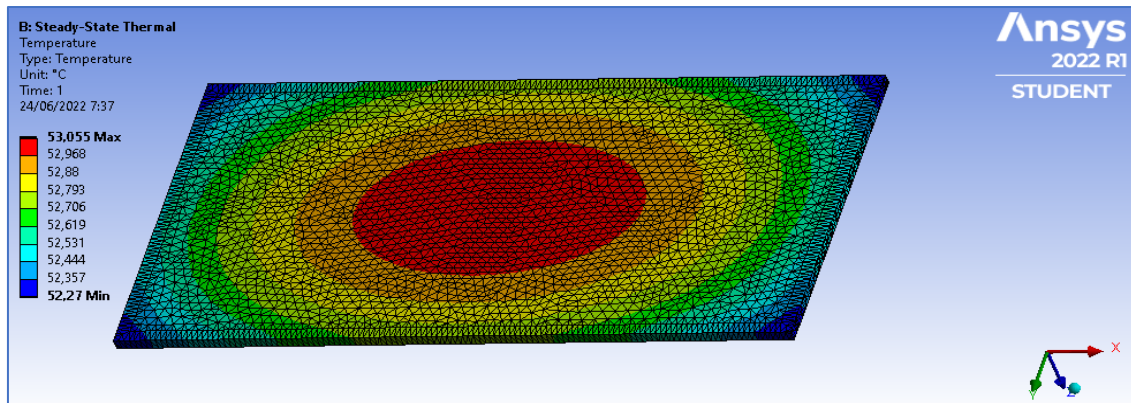


Figura 51. Transición de temperaturas caso 2

TRANSICIÓN FLUJO DE CALOR

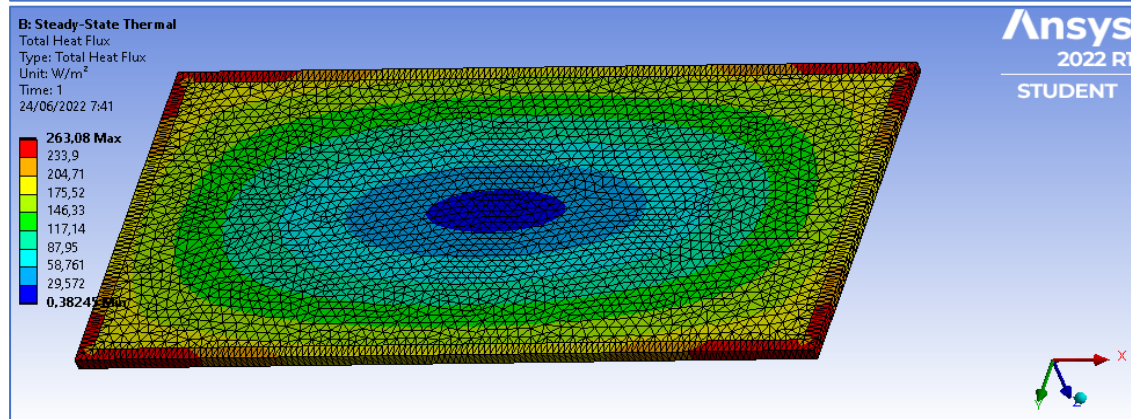
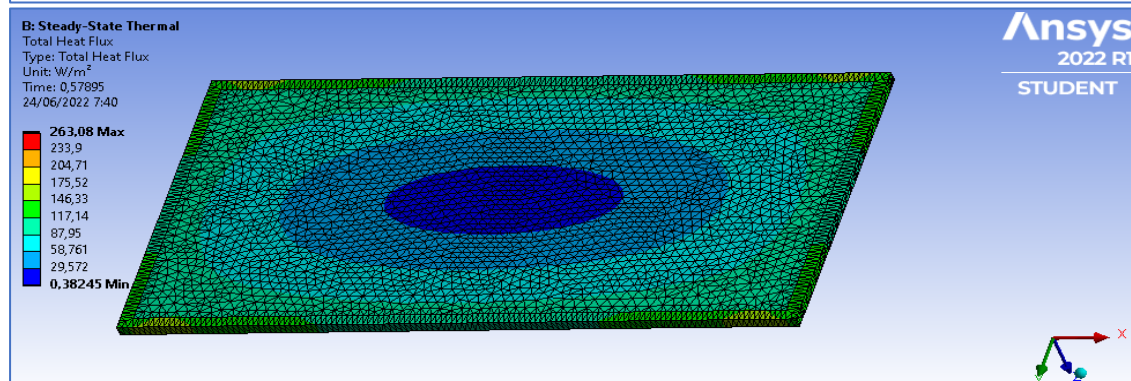
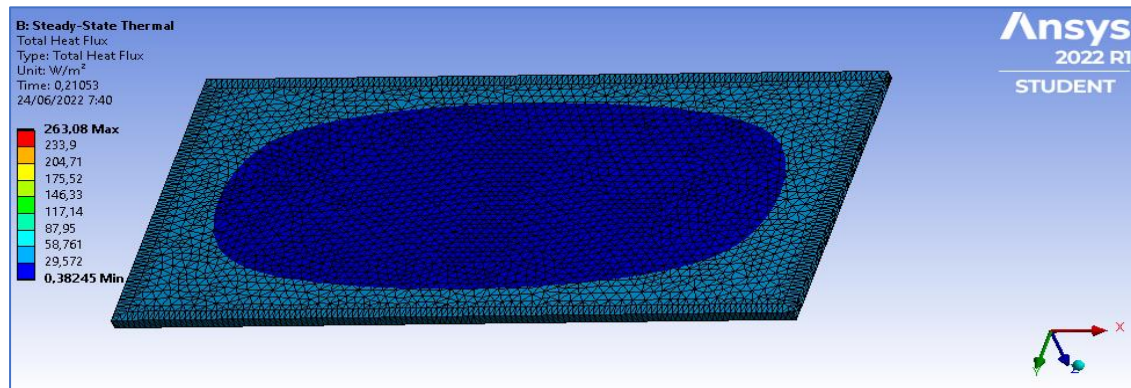


Figura 52. Transición de flujo de calor caso 2

VARIACIÓN DE FLUJO DE CALOR EN EL MARCO

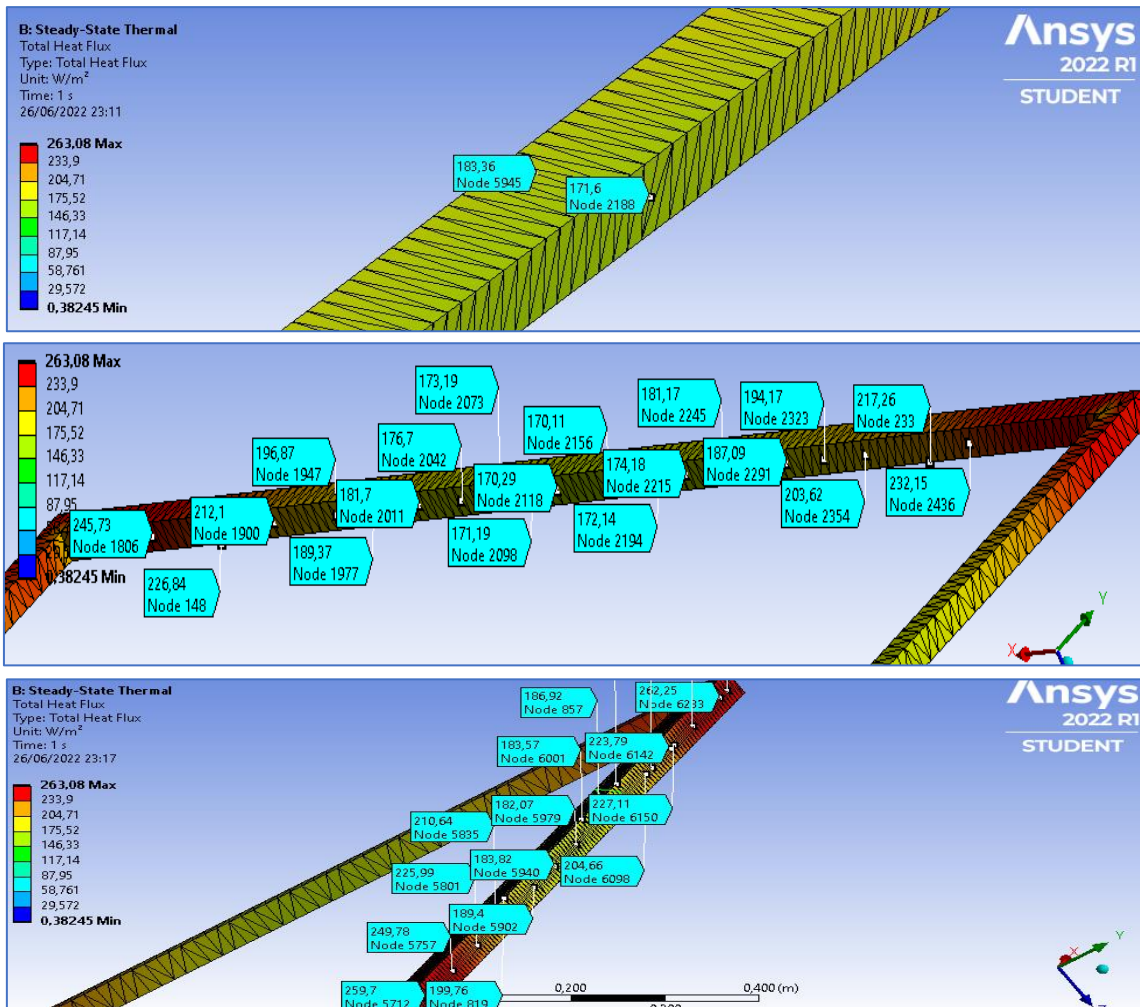


Figura 53. Variación del flujo de calor en el marco (2m) caso 2

Se han tomado los valores del flujo de calor de los nodos situados (en la misma línea) en ambos extremos del marco, para estudiar la diferencia de flujo existente. Se estima una diferencia de flujo en torno a 10 W/m² en los laterales de 2m de longitud.

$$Q_{\text{marco lat.1}} = A_{\text{efectiva1}} \times Q_{\text{nodos}} ; A_{\text{efectiva1}} = e \times l_{\text{efectiva1}} = 0,035\text{m} \times 2\text{m}$$

$$A_{\text{efectiva}} = 0,07 \text{ m}^2 ; Q_{\text{nodos}} = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ (valor aproximado)}$$

$$Q_{\text{marco lat.1}} = 0,07 \text{ m}^2 \times 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 0,7 \text{ W}$$

Así, obtenemos la cantidad de calor que atraviesa una parte lateral del marco (son 4 partes laterales), se le llamará con subíndice “marco lat.1” a los dos laterales de 2m de longitud y “marco lat.2” a los dos laterales de 1m de longitud.

$$Q_{\text{marco lat.1 (total)}} = 2 \times Q_{\text{marco lat.1}} = 2 \times 0,7 W = 1,4 W$$

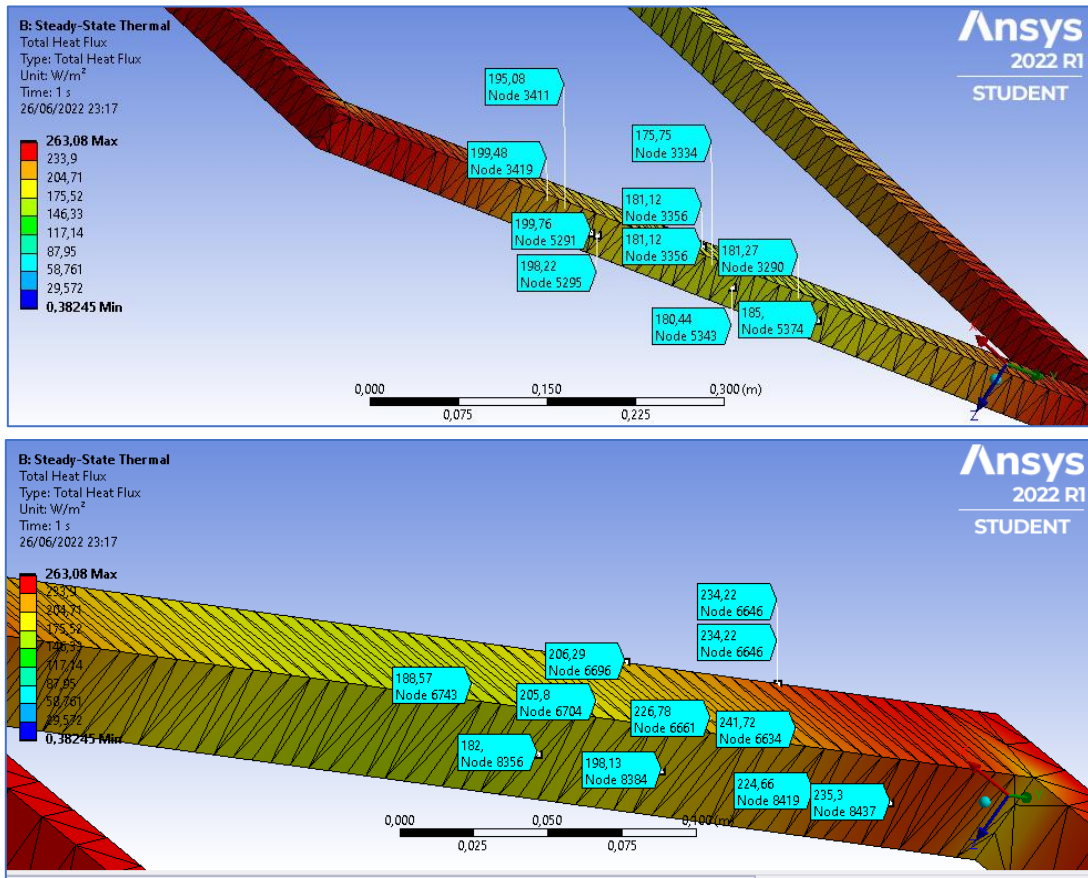


Figura 54. Variación del flujo de calor en el marco (1m) caso 2

Se estima una diferencia de flujo de calor entre los laterales de 1m de longitud de 5 W/m² (se tienen en cuenta en la estimación los valores de los nodos de ambos laterales).

$$Q_{\text{marco lat.2}} = A_{\text{efectiva2}} \times Q_{\text{nodos}} ; A_{\text{efectiva2}} = e \times l_{\text{efectiva2}} = 0,035m \times 1m$$

$$A_{\text{efectiva2}} = 0,035 m^2 ; Q_{\text{nodos}} = 5 \frac{W}{m^2} \text{ (valor aproximado)}$$

$$Q_{\text{marco lat.1}} = 0,035 m^2 \times 5 \frac{W}{m^2} = 0,175 W$$

$$Q_{\text{marco lat.1 (total)}} = 2 \times Q_{\text{marco lat.1}} = 2 \times 0,175 W = 0,35 W$$

Así, sumando los valores de los flujos de calor de las 4 paredes laterales, obtiene:

$$Q_{\text{marco}} = Q_{\text{marco lat.1}} + Q_{\text{marco lat.2}} = 0,35 + 1,4 = 1,75 W$$

DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN

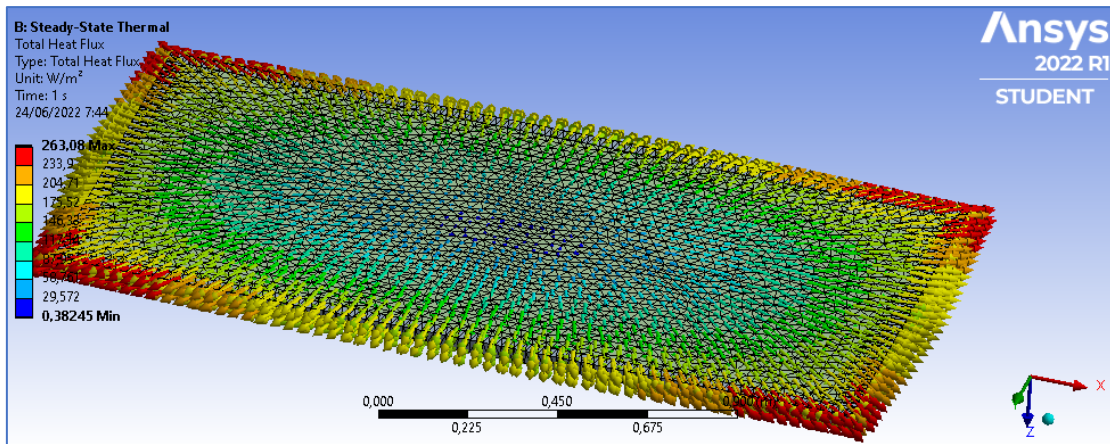


Figura 55. Dirección de propagación del calor caso 2

4.3 Conclusiones

- Al igual que en el informe de “Modelo matemático para investigar la distribución de temperatura para paneles solares” [14], se observa que la superficie del módulo tiene una temperatura máxima en el centro y una temperatura mínima en los bordes.

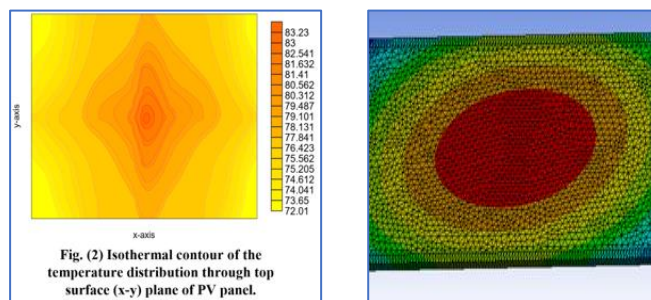


Figura 56. Condiciones de contorno

- Se demuestra que la dirección de propagación del calor se puede aproximar a una propagación radial.
- El calor se propaga en las tres direcciones del eje de coordenada, por lo que a la hora de llevar a cabo cálculos teóricos se deberá proceder con algún método aproximativo.
- En la comparación del flujo de calor en ambos casos, en el caso de con pintura, disminuye el calor intercambiado, por lo que en general habrá un menor sobrecalentamiento en las zonas cercanas al marco.
- En la comparación de temperaturas, en el caso con pintura, la distribución de temperaturas cercanas al marco disminuye.

- Las simulaciones anteriores están realizadas a condiciones estándar, sin embargo, un factor a tener en cuenta es la velocidad del viento, ya que, según en la “*Investigación del rendimiento del panel solar basado en la diferente velocidad del viento utilizando ANSYS*” (Vol. 1, No. 3, marzo 2016), se demuestra que a medida que aumente la velocidad del flujo de viento incidente en el módulo, decrece la distribución de temperaturas:

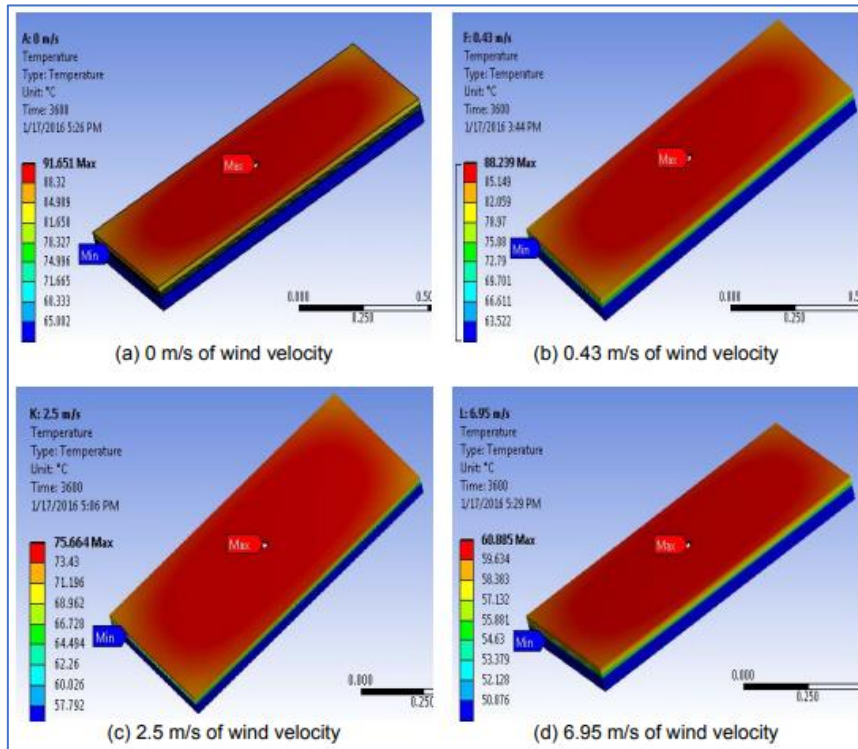


Figura 57. Influencia de la velocidad del viento

- En la comparación de flujo de calor que atraviesa el marco, en el caso 1 se obtiene un calor total de 2,07 W, mientras que en el caso 2 (con pintura) se obtiene un flujo de 1,75 W.
- Se demuestra que el salto de calor entre los nodos que componen la distribución del flujo del marco es mayor en paredes verticales (2m de longitud) en comparación con las paredes laterales (1m de longitud). Este punto, junto en el que se detalla la dirección de propagación del calor, servirán como punto de apoyo para el uso de un modelo bidimensional aproximado para realizar los cálculos teóricos.

5. Influencia del marco en la potencia

Se ha demostrado anteriormente que, aplicando una pintura blanca en los marcos de aluminio, se obtiene un descenso de la temperatura que dependerá principalmente del espesor de la capa aplicada y de la temperatura ambiente. A continuación, se llevará a cabo un estudio teórico basado en el proceso de calentamiento de la placa solar y como debería teóricamente influir el descenso de temperatura del marco.

5.1 Contexto

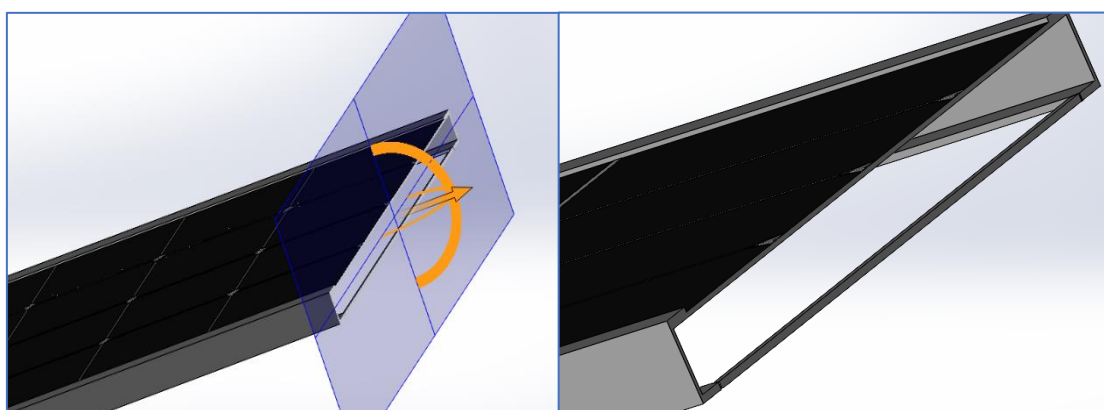


Figura 58. Representación de la superficie del marco en contacto directo con la superficie lateral de las celdas solares

En primer lugar, hay que tener en cuenta que en régimen estacionario, es decir, cuando la temperatura de la superficie de estudio se estabiliza hasta ser prácticamente constante, la temperatura final (en el instante en el que se estabilice) será fruto de la combinación de la temperatura a la que se encuentren los nodos de los extremos de las celdas solares más la temperatura a la que se encuentre el material de aluminio (que tiene propiedades físicas distintas a la célula solar), tras ser expuesto el conjunto a la radiación incidente. Así, se explicará a continuación como se desarrolla cada proceso en función del tiempo para entender la complejidad de su cálculo teórico.

Los tipos de transferencia de calor que ocurren en el proceso fotovoltaico son los siguientes:

- **Radiación:** Ocurre en toda la placa solar, por la parte delantera se tendrá radiación directa y difusa, mientras que por la parte trasera sólo habrá difusa.
- **Conducción:** A lo largo del interior de la sección de la placa solar (superficie-superficie).
- **Convección:** Entre el aire (fluido) y las superficies externas que componen la placa

5.1.1 Planteamiento

El primer paso se ha llevado a cabo, comprobándose que la pintura blanca sobre el marco produce un descenso de la temperatura en dicha zona, por lo tanto, el siguiente paso será el estudio del intercambio de calor que ocurre en la zona de unión entre la placa solar y el marco. Para ello, se van a plantear los siguientes casos:

- Caso 1: mediante Arduino, se medirán 5 puntos distribuidos de la mitad de la placa solar hasta el extremo del marco (sin pintar), hasta conseguir temperaturas aproximadamente estacionarias en dichos nodos, para proceder a su posterior cálculo teórico consiguiendo la cantidad de calor aproximada que se intercambia en la zona de unión.
- Caso 2: Se llevará a cabo el mismo procedimiento que el caso 1 pero con el marco pintado, para de nuevo, obtener teóricamente un valor aproximado del calor intercambiado en la unión.

Así, una vez completados los cálculos de los dos casos, se procederá a una comparación de ambos casos para acabar en una conclusión, estudiando la eficiencia y rentabilidad de la hipótesis desarrollada.

5.1.2 Suposiciones de cálculo

Para llevar a cabo el cálculo teórico, se tendrán en cuenta las siguientes suposiciones:

1. Al medir las temperaturas estacionarias con los tipos de sensores de los que se dispone para las mediciones experimentales, hay que tener en cuenta que una parte de la superficie del sensor está en contacto directo con la superficie del material y la otra queda al descubierto, lo óptimo hubiese sido poder medir exactamente la temperatura a la que se encuentra cada celda solar (en ausencia de variaciones meteorológicas). Por lo tanto, para el cálculo teórico, **las pérdidas por convección** quedan incluidas en la temperatura promedio obtenida de la medición de cada nodo, ya que las temperaturas variarían un poco si se tomaran en el interior (celda solar).
2. Las temperaturas promedio obtenidas de cada nodo, son mucho más elevadas en comparación con la temperatura ambiente, algo lógico debido a la actuación de la irradiación durante un periodo de tiempo provocando un proceso de calentamiento de las áreas irradiadas. Por lo tanto, para el cálculo teórico, la temperatura promedio obtenida de cada nodo, incluye **los efectos de transmisión por radiación**. No se tendrían en cuenta de esta forma si las temperaturas medidas fuesen antes del comienzo del efecto de la irradiación sobre la placa solar, en ese caso sí que habría que tenerlo en cuenta.
3. Para el cálculo teórico, se hará una simplificación bidimensional en la que se llevará a cabo el cálculo de la **conducción de calor** a lo largo de los nodos (método de diferencias finitas) mediante un **modelo simétrico**.

5.2 Metodología

5.2.1 Caso 1 (marco sin pintar)

Se llevan a cabo las mediciones experimentales, para ello se vuelve a programar la placa Arduino, pero esta vez para 5 sensores: (Duración de medición de 10 min)



Figura 59. Medición de temperaturas para el modelado del cálculo basado en nodos

5.2.2 Caso 2 (marco pintado)

Se desarrolla de la misma forma que el caso 1, 5 sensores distribuidos de la misma forma desde la mitad de la placa solar hasta el extremo del marco: (duración total de 10 min)



Figura 60. Medición de temperaturas caso 2

5.3 Condiciones de contorno

5.3.1 Caso 1 (sin pintar)

Fue realizado en el siguiente rango horario (19:32 – 19:42), con una irradiancia de aproximadamente 200 W/m².

DATOS PARA SU RESOLUCIÓN:

$$T_3 = T_{prom (sensor 3)} = 44,78 \text{ C}^\circ \quad X_{32} = 147,52 \text{ mm}$$

$$T_2 = T_{prom (sensor 2)} = 41,08 \text{ C}^\circ \quad X_{21} = 138,3 \text{ mm}$$

$$T_1 = T_{prom (sensor 1)} = 48,39 \text{ C}^\circ \quad X_{14} = 92,2 \text{ mm}$$

$$T_4 = T_{prom (sensor 4)} = 45,63 \text{ C}^\circ \quad X_{45} = 11,98 \text{ mm}$$

$$T_5 = T_{prom (sensor 5)} = 44,40 \text{ C}^\circ \quad K_{placa} = 148 \frac{w}{m \text{ k}}$$

$$E = 8 \text{ mm} \quad K_{placa} = 200,9 \frac{w}{m \text{ k}}$$

$$y = 85 \text{ mm} \quad A_{transf} = E y = 0,00068 \text{ m}^2$$

5.3.2 caso 2 (pintado)

Se llevó a cabo en el siguiente rango horario (17:32 – 17:42), con una irradiancia de aproximadamente 700 W/m².

DATOS PARA SU RESOLUCIÓN

$$T_3 = T_{prom (sensor 3)} = 55,487 \text{ C}^\circ \quad X_{32} = 193,62 \text{ mm}$$

$$T_2 = T_{prom (sensor 2)} = 54,579 \text{ C}^\circ \quad X_{21} = 147,52 \text{ mm}$$

$$T_1 = T_{prom (sensor 1)} = 53,578 \text{ C}^\circ \quad X_{14} = 73,76 \text{ mm}$$

$$T_4 = T_{prom (sensor 4)} = 49,793 \text{ C}^\circ \quad X_{14} = 11,98 \text{ mm}$$

$$T_5 = T_{prom (sensor 5)} = 49,454 \text{ C}^\circ \quad K_{placa} = 148 \frac{w}{m \text{ k}}$$

$$E = 8 \text{ mm} \quad K_{marco} = 200,9 \frac{w}{m \text{ k}}$$

$$y = 85 \text{ mm} \quad A_{transf} = E y = 0,00068 \text{ m}^2$$

5.4 Procedimiento

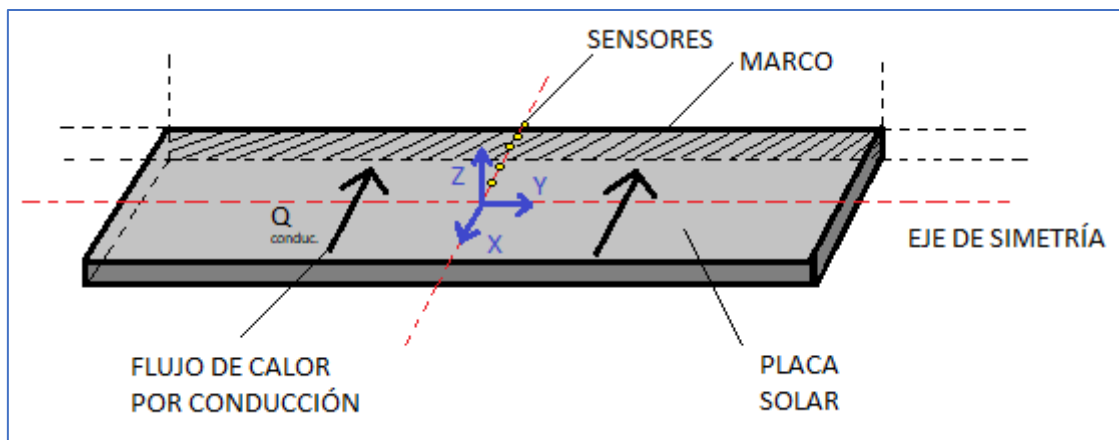


Figura 61. Representación gráfica caso bidimensional

Como bien se muestra en la figura anterior, se determinará el flujo de calor ($Q_{conduc.}$) teóricamente mediante un modelo bidimensional aproximado, teniendo en cuenta a la misma vez las suposiciones y condiciones de contorno comentadas. A continuación, se detallará la explicación.

En la realidad, la placa fotovoltaica estará sometida a un determinado campo de temperaturas, que, físicamente hablando, vendrá determinado por la vibración de las partículas que componen el objeto, puesto que la temperatura se define como la magnitud escalar que depende directamente de la energía cinética de la partícula. Así, un aumento de la energía cinética de las partículas que componen un conjunto se traduce en el aumento de la vibración de éstas, provocando así una variación positiva del campo de temperaturas de dicho conjunto.

Por ello, para realizar los cálculos, se han tomado valores promedio durante un tiempo prolongado, pudiendo establecer régimen estacionario (**campo estacionario**).

$$\begin{array}{l} T = f(x, y, z, t) \Rightarrow \frac{dT}{dt} = 0 \\ T = f(x, y, z) \end{array}$$

Figura 62. Campo de temperaturas

Además, el campo de temperaturas sigue aproximadamente una distribución radial, por lo que se supondrá que la temperatura medida en uno de los nodos, será la misma que las situadas a sus extremos (nodos en línea), lo que se traduce como superficies isotermas (compuestas por líneas de nodos a la misma temperatura). Por lo que se realizará un cálculo unidimensional:

$$\frac{dT}{dy} = \frac{dT}{dz} = 0 \Rightarrow T = f(x)$$

Figura 63. Campo de temperaturas (aproximación unidimensional)

Por lo tanto, aplicando la *ley de Fourier* para medios isotrópicos (el vector que define la dirección y sentido del gradiente de temperaturas tiene que ser perpendicular a los diferenciales de superficie isotermas, a temperatura constante), se define la siguiente ecuación:

$$Q = -k A \frac{dT}{dx}$$

Figura 64. Ley de Fourier

En la siguiente figura, se muestra el planteamiento ideado para el cálculo. Como los sensores se han medido a partir de la mitad de la placa, se aplicará la ley de Fourier a un pequeño diferencial de volumen (Df1) cuyo espesor equivale al ancho de una celda fotovoltaica de la placa. Así, una vez conozcamos el intercambio de calor por conducción en dicho diferencial, el valor obtenido se multiplicará por 24 (la longitud de la placa se divide en la suma del ancho de 24 celdas solares), así obtendremos el flujo de conducción en la mitad de la placa, para la otra mitad, será multiplicar el calor obtenido por dos (Df1 simétrico).

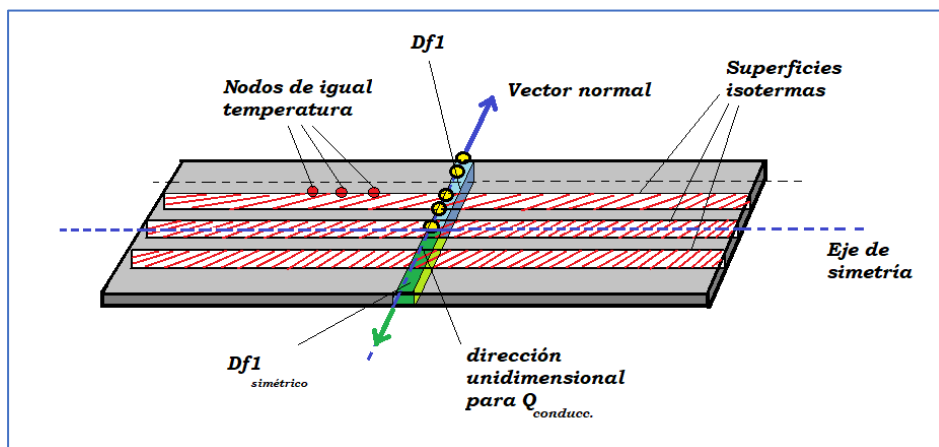


Figura 65. Representación gráfica planteamiento de cálculo

Así, mediante la aplicación de la ley de Fourier, se precisa el siguiente modelado:

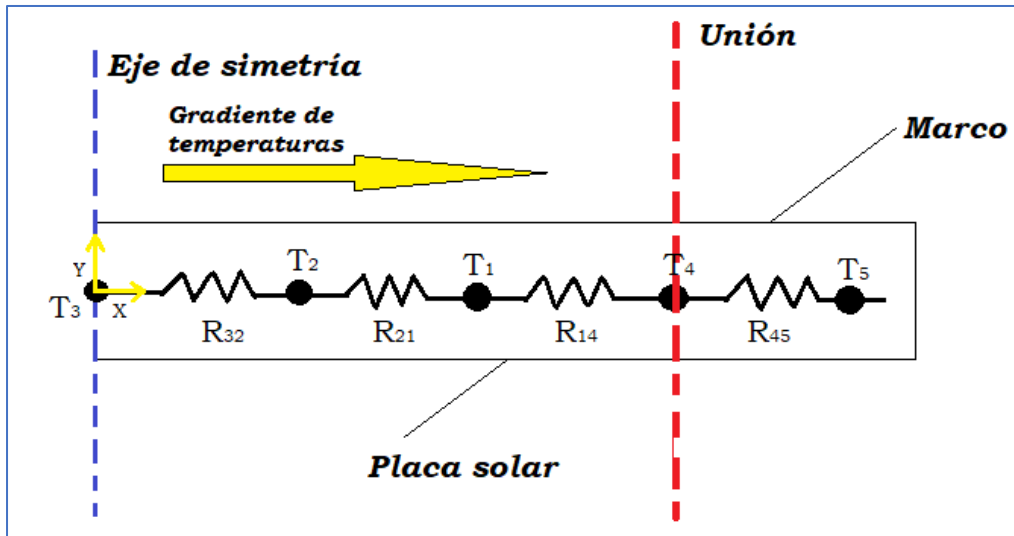


Figura 66. Analogía eléctrica para el cálculo

Así, aplicando las ecuaciones de conducción del calor, teniendo en cuenta que \$R_{32}\$, \$R_{21}\$, \$R_{14}\$ y \$R_{45}\$ equivalen a las resistencias conductivas a la transferencia de calor entre superficies, en ambos casos, tendremos tres resistencias desde el nodo 3 hasta el nodo 4 en la unión, y habría una resistencia convectiva entre el nodo 5 y el aire (en dirección unidimensional), pero en dicha dirección como se ha comentado, se desprecian las pérdidas convectivas. Así, se representan los dos tipos de resistencias, que estarán en función del material, de la distancia entre nodos y el área de transferencia (y el fluido en el caso de la convección):

$$\sum_j \frac{T_j - T_i}{R_{ij}} = 0; \text{ con } R_{ij} \begin{cases} \frac{\Delta X_{ij}}{k A_{k_y}} & \text{CONDUCCIÓN} \\ \frac{\Delta X_{ij}}{k A_{c_y}} & \text{CONVECCIÓN} \end{cases}$$

Figura 67. Modelado de resistencias para el cálculo

5.5 Resultados

5.5.1 Caso 1 (sin pintar)

Como se puede apreciar en la siguiente figura, debido a las sombras, las temperaturas de los sensores situados en la mitad de la placa solar (sensores 3 y 2) se verán afectadas. En cambio, en ausencia de sombras se produciría un gradiente de temperaturas positivo durante todo el tramo medido (mitad placa – extremo marco).

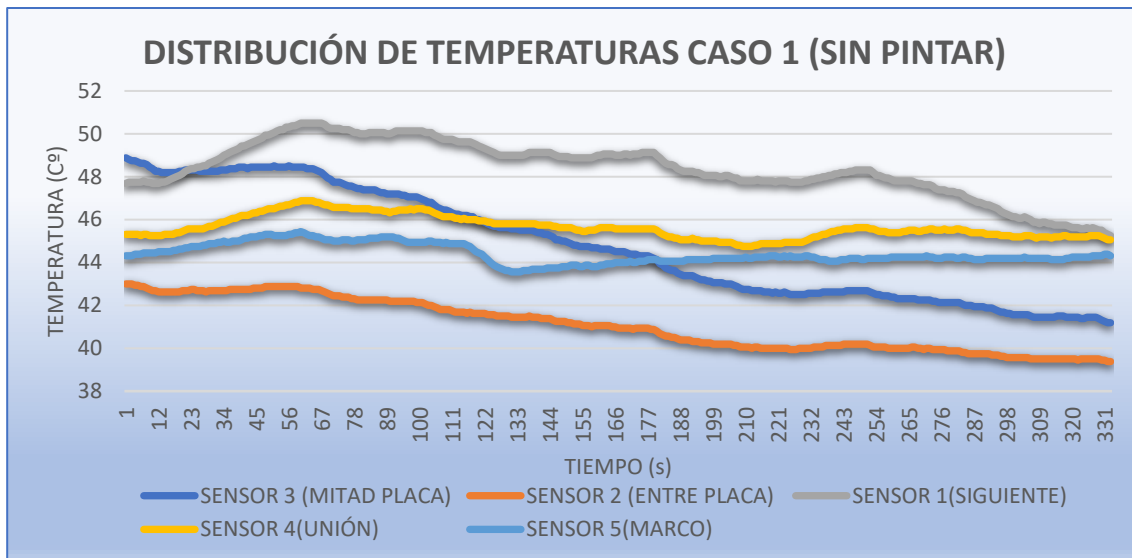


Figura 68. Distribución de temperaturas (marco sin pintar)

Aplicando la Ley de Fourier, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_{df1} = \frac{T_3 - T_2}{R_{32}} + \frac{T_2 - T_1}{R_{21}} + \frac{T_1 - T_4}{R_{14}} + \frac{T_4 - T_5}{R_{45}}$$

$$Q_{df1} = \frac{T_3 - T_2}{\frac{X_{32}}{K_{placa} A_{transf}}} + \frac{T_2 - T_1}{\frac{X_{21}}{K_{placa} A_{transf}}} + \frac{T_1 - T_4}{\frac{X_{14}}{K_{placa} A_{transf}}} + \frac{T_4 - T_5}{\frac{X_{45}}{K_{marco} A_{transf}}} = 0,098 \text{ W}$$

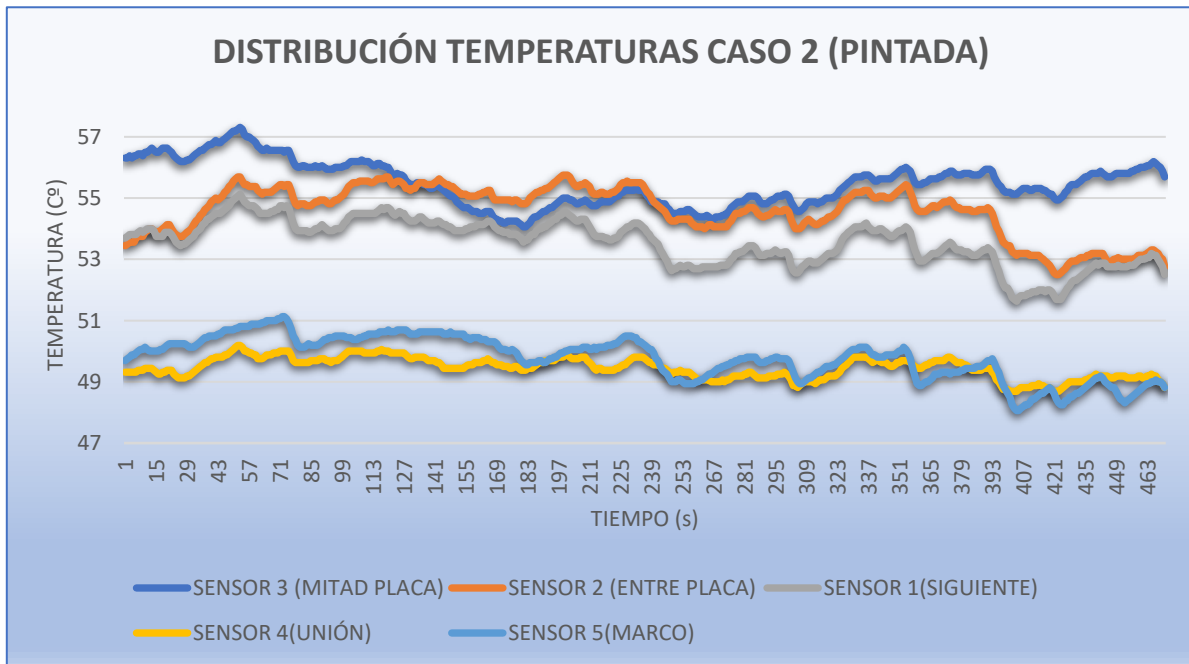
$$Q_{placa} = Q_{mitad\ placa} \times 2 = (Q_{df1} \times 24) \times 2 = 4,7 \text{ W}$$

Mediante un multímetro, se midió la diferencia de potencial que se producía entre los terminales del módulo fotovoltaico, obteniendo lo siguiente:



*Figura 69. Medición de voltaje (marco sin pintar)
hora de medición 14:37*

5.5.2 Caso 2 (pintado)



*Figura 70. Distribución de temperaturas
caso 2 (marco pintado)*

Así, aplicando la Ley de Fourier, se obtienen los siguientes resultados:

$$Q_{df1} = \frac{T_3 - T_2}{R_{32}} + \frac{T_2 - T_1}{R_{21}} + \frac{T_1 - T_4}{R_{14}} + \frac{T_4 - T_5}{R_{45}}$$

$$Q_{df1} = \frac{T_3 - T_2}{\frac{X_{32}}{K_{placa} A_{transf}}} + \frac{T_2 - T_1}{\frac{X_{21}}{K_{placa} A_{transf}}} + \frac{T_1 - T_4}{\frac{X_{14}}{K_{placa} A_{transf}}} + \frac{T_4 - T_5}{\frac{X_{45}}{K_{placa} A_{transf}}} = 1,433 \text{ W}$$

$$Q_{placa} = Q_{mitad\ placa} \times 2 = (Q_{df1} \times 24) \times 2 = 68,78 \text{ W}$$

Mediante un multímetro, se midió la diferencia de potencial que se producía entre los terminales del módulo fotovoltaico, obteniendo lo siguiente:



Figura 71. Medición de voltaje (marco sin pintar)
hora de medición 17:40

5.6 Conclusión

- **Caso 1 (sin pintar):** fue realizado en el siguiente rango horario (19:32 – 19:42), con una irradiancia de aproximadamente 200 W/m². Así, mediante cálculo teórico, se estima un calor intercambiado por conducción de 4,7W en toda la placa solar.
- **Caso 2 (pintado):** se llevó a cabo en el siguiente rango horario (17:32 – 17:42), con una irradiancia de aproximadamente 700 W/m². Mediante cálculo teórico, se determina un flujo de calor de 68,78W en toda la placa solar.
- Debido a las condiciones de contorno de cada caso, se produce un menor intercambio de calor en el caso 1, sin embargo, hay que tener en cuenta que en el caso 1 (sin pintar), con una diferencia de temperaturas (mitad placa – extremo marco) de 0,38 C° se consigue un intercambio de 4,7 W, mientras que en el caso 2 (pintada), con una diferencia de 6,03 C° se consigue un intercambio de 68,78 W.

- El caso 2, con una diferencia de temperaturas aproximadamente 16 veces mayor y una irradiancia 3 veces mayor respecto al caso 1, tan sólo hay una variación de 64 W de un caso respecto al otro.
- Con relación al recubrimiento aplicando pintura blanca al marco, se demuestra que optimiza el gradiente de temperaturas entre la unión (placa-marco) y el extremo del marco, puesto que en el caso 1 (sin pintar) hay una variación 1,23 C°, mientras que en el caso 2 (marco pintado), se obtiene una diferencia de 0,339 C°.
- En referencia a las medidas de voltaje tomadas, se observa entorno a 1V de diferencia, siendo el mayor el tomado en el caso 2 (pintado) a pesar de las condiciones de contorno (hora de medición, irradiancia del momento...). Se puede estimar mediante las curvas voltaje – potencia del fabricante la cantidad de vatios que está generando el módulo en cada caso:

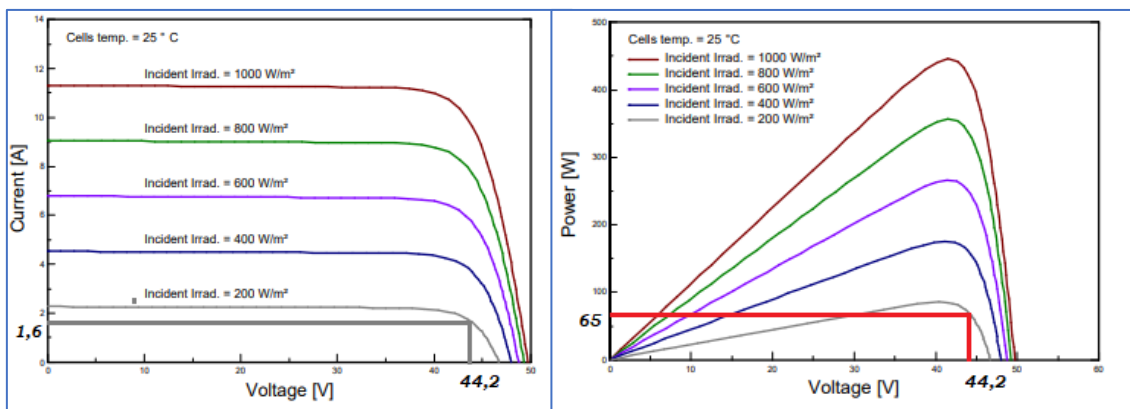


Figura 72. Curvas del fabricante (caso 1)

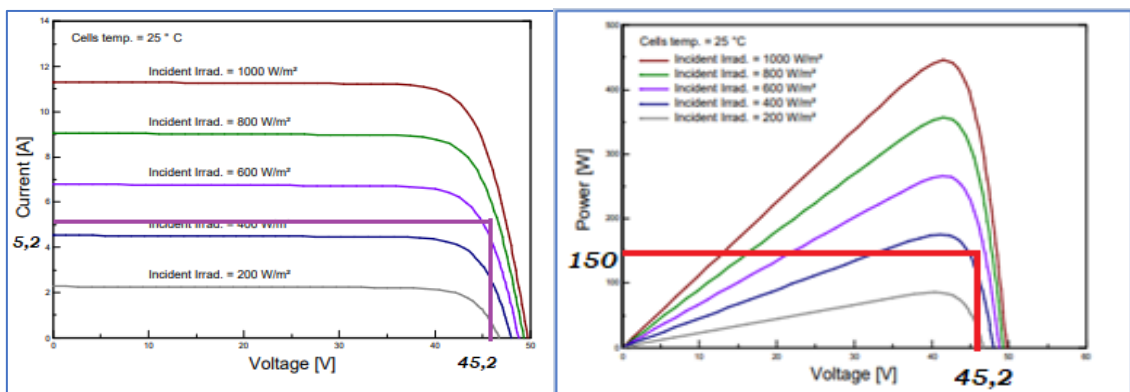


Figura 73. Curvas del fabricante (caso 2)

- Como se observa gráficamente, a partir de un cierto valor de voltaje, tras alcanzar el máximo dicha función, comienza a decrecer el valor de la potencia, a medida que aumenta el voltaje. Ocurre de forma similar con la intensidad en la curva I-V, a partir de un cierto valor del voltaje, la intensidad comienza a decrecer.

- Ocurre de forma similar con la intensidad en la curva I-V, a partir de un cierto valor del voltaje, la intensidad comienza a decrecer.
- El motivo por el cual el voltaje del caso 2 es mayor que el del caso 1, se basa en la radiación recibida en el horario de la medición, puesto que la irradiancia en el caso 2 es más de tres veces mayor que en el caso 1 (eso no quita que haya una mayor producción de potencia)
- Así, en referencia a la medición de los voltajes, no se puede apreciar cuanto de beneficioso ha resultado la aplicación de las pinturas.
- Si existe un caso beneficioso para la eficiencia fotovoltaico, sería la aplicación de pintura blanca, por lo que se concluye que no es necesario ni sería rentable aplicar una pintura termocrómica.
- Si se produce un efecto beneficioso tras su aplicación, podría considerarse como efecto significativo a gran escala, es decir, en instalaciones con un gran número de paneles fotovoltaicos como podría ser el caso de un campo solar.

6. Posibilidad de aplicación de las pinturas termocrómicas

A partir de las conclusiones obtenidas tras las mediciones experimentales, se hace obvio que el uso de pinturas termocrómicas no es el más indicado para causar una mejora en la eficiencia solar. Sin embargo, el objetivo planteado para su aplicación es proporcionar al ser humano algún tipo de beneficio, ya sea en eficiencia, económico, etc. Por ello, se plantea la posibilidad de su uso destinado a fines estéticos.

La idea de potenciar la estética de las placas solares se basa en recubrir los marcos de pinturas termocrómicas, de tal manera que, en un determinado escenario, tenga un color en concreto y en otro escenario (mediante variación de temperatura) el marco tome otro color distinto, siendo ambos colores elección propia, pudiéndose conseguir una adaptación de las tonalidades que tome el marco en función del escenario.

6.1 Estudio de secciones con diferentes colores

Planteada la idea anterior, a continuación, se ha realizado una medición de 5 secciones de aluminio, de las cuales, 4 se han recubierto de diferentes tonalidades para estudiar su comportamiento en comparación con la sección sin pintar.

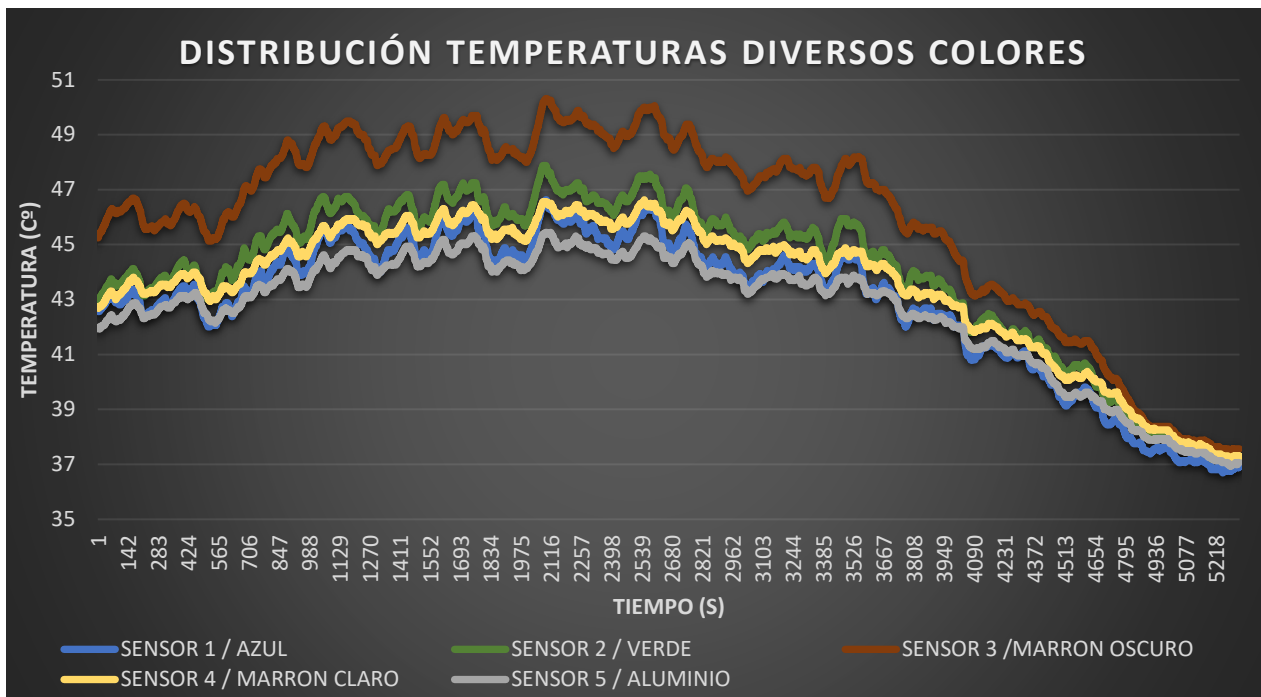


Figura 74. Gráfica comparativa diversos colores

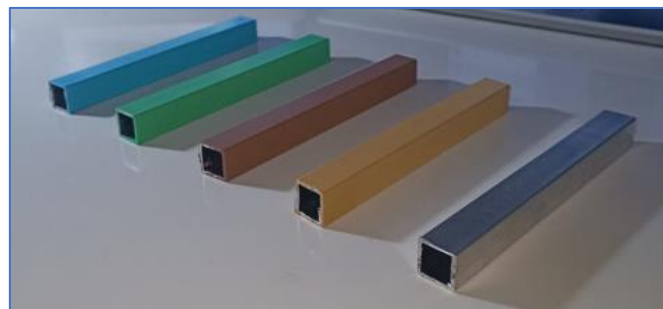


Figura 75. Secciones de ensayo (diferentes colores)

$T_{prom (AZUL)} = 42,965 \text{ C}^\circ$
$T_{prom (VERDE)} = 44,044 \text{ C}^\circ$
$T_{prom (MARRÓN OSCURO)} = 46,028 \text{ C}^\circ$
$T_{prom (MARRÓN CLARO)} = 43,59 \text{ C}^\circ$
$T_{prom (ALUMINIO)} = 42,688 \text{ C}^\circ$

De la gráfica, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Cuanto más oscura es la tonalidad del color, mayor temperatura adquiere el perfil, por ello, la sección de aluminio de mayor temperatura promedio es la recubierta de marrón oscuro.
- Salvo el marrón oscuro, el resto de las tonalidades están por debajo de los 2 C° de diferencia con respecto la sección de aluminio bruto.

- Al igual que en el caso de la aplicación de pintura blanca, en el cual los beneficios se podrían hacer significantes a gran escala, ese pequeño aumento de la temperatura resultará en apenas una pérdida insignificante de eficiencia.

6.2 Ejemplo de aplicación

Un ejemplo en el que se podría potenciar la estética sería en cualquier vivienda rodeada de naturaleza, (casas de campo, urbanizaciones o viviendas con jardines, árboles...) adaptando así las tonalidades del entorno y proporcionándole al hogar un toque en la estética exterior.

Por lo tanto, se pueden aprovechar las tonalidades que adopta el paisaje durante largos periodos del año. Durante la estación de otoño, el entorno adopta tonalidades como el ocre, marrón, incluso cálidas como rojos anaranjados. Sin embargo, cuando se acerca la primavera, los árboles florecen y comienzan a mostrarse tonalidades verdes, colores vivos rosados, azulados...

Por lo tanto, según las tonalidades que tome el entorno, las pinturas termocrómicas aportan una gran variedad de opciones y combinaciones para elegir al gusto, la mejor combinación de colores que se adapten al paisaje.

7. Conclusiones

Una de las limitaciones que se han dado en este trabajo ha sido la escasez de bibliografía relacionada con los estudios llevados a cabo. No disponer de una investigación o estudio realizado para poder comparar resultados o saber si se va por buen camino se traduce en un obstáculo. Por lo que todos los casos estudiados en este proyecto se han ejecutado desde 0, siendo puramente experimental (a pesar de que se encuentre teoría relacionada).

Sin embargo, con la obtención de las simulaciones desarrolladas en el programa ANSYS, se ha conseguido un contraste entre lo teórico y lo experimental. Considero que ha sido una gran ventaja contar con los recursos que ofrece esta interfaz.

Pese a las limitaciones que se han producido a lo largo del trabajo, se ha conseguido hacer una serie de mediciones experimentales que han permitido hacer una aproximación a la realidad y dar una serie de conclusiones. Al fin y al cabo, se ha demostrado que la aplicación de las pinturas termocrómicas no es lo más idóneo para mejorar la eficiencia solar, por el contrario, el uso de la pintura blanca, aunque sus efectos sean poco notorios, siguen siendo beneficiosos para los módulos.

Dicho lo cual, sería interesante realizar este estudio a nivel de campos solares o conjuntos de módulos que abarquen una gran área, ya que, en esos casos, quizás sea interesante estudiar el efecto producido por la aplicación de la pintura. Así, una futura continuación de este estudio se podría basar en hacer una comparación de la potencia que producen los

módulos sin el uso de la pintura con los módulos pintados y así llevar a cabo un seguimiento a tiempo real de las diferencias entre ambas mediciones, sumado a un posible estudio económico para estudiar la rentabilidad y sostenibilidad de su aplicación.

Además, en esta propuesta de continuación, sería muy interesante que la comparación de las mediciones se realizase en tiempo real, es decir, dos conjuntos de módulos (uno con pintura y el otro sin su aplicación) con las mismas condiciones de contorno y al mismo tiempo, pudiendo así comparar directamente la producción de potencia.

En relación con el estudio secundario basado en la estética, una propuesta similar se basaría en medir la generación de potencia en diferentes módulos con la aplicación de diferentes colores en tiempo real, viendo realmente cuanta eficiencia merece la pena sacrificar por una mejora en la estética.

Para concluir, el objetivo del proyecto se ha cumplido con creces, se ha conseguido realizar un estudio de una temática muy específica, mediante contrastes teóricos y experimentales, ofreciendo una visión objetiva y aportando una serie de conclusiones que dan pie a un conocimiento más amplio del área en cuestión.

8. Bibliografía

- [1] Castellanos Gutiérrez, V. (2016). *Módulos fotovoltaicos*. DOCPLAYER.
<http://docplayer.es/3420432-Modulos-fotovoltaicos.html>
- [2] (UPCT) Honsberg, C., & Bowden, S. (s. f.). *Masa de aire*. PVEducation.
<https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/masa-de-aire>
- [3] Fundamentos energía solar fotovoltaica, Universidad Politécnica de Cartagena
- [4] Morales, V., Rosas, L., Gutiérrez, J., & Moromi, T. (2017). *Plan de mejora del proceso de producción de bolas de zinc de 50 milímetros de diámetro en la empresa zinc industrias nacionales s.a.*
https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/1588/Juan%20Gutierrez_Jorge%20Moromi_Lurdes%20Rosas_Victor%20Morales_Trabajo%20de%20Investigacion_Maestria_2017.pdf
- [5] *Potencial de enfriamiento pasivo de los materiales de la envolvente urbana. índice de reflectancia solar de pavimentos peatonales y tejas*. (2011). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15, 2011. Impreso en la Argentina. ISSN 0329–

5184. <https://www.mendozaconicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2011/2011-t005-a006.pdf?cv=1>

[6] *Comportamiento térmico de revestimientos verticales, en la mitigación de la isla de calor urbana. índice de reflectancia solar.* (2011). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15, 2011. Impreso en la Argentina. ISSN 0329–5184.

<https://core.ac.uk/download/pdf/328878168.pdf>

[7] Castellanos Gutiérrez, V. (2016). *Módulos fotovoltaicos*. DOCPLAYER.

<http://docplayer.es/3420432-Modulos-fotovoltaicos.html>

[8] Freedman, Y. (s. f.). *Física Universitaria con Física Moderna Vol 2* (12.^a ed., Vol. 2). Física Universitaria con Física Moderna.

[9] *Colorantes leuco*. (s. f.). Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Colorante_leuco

[10] [Araújo, 1995] G.L.Araújo, “*La célula Solar*”, en E.Lorenzo, “*Electricidad Solar*”. Progenisa (1994)

[11] [Martí, 2000] A. Martí, “*Fundamentos de la Conversión Fotovoltaica: La Célula Solar*”, en “*Fundamentos, Dimensionado Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica*”. CIEMAT, Madrid (2004).

[12] Weast, Robert (1984). CRC, Manual de Química y Física. Boca Raton, Florida: Chemical Rubber Company Publishing. págs. E110. ISBN 0-8493-0464-4.

[13] Del Valle Hernández, L. (s. f.). *DS18B20 sensor de temperatura para líquidos con Arduino*. programarfacil.com. <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/ds18b20-sensor-temperatura-arduino/>

[14] Wai Zhe, Leow & Yusoff, Mohd & Irwanto, Muhammad & Razak, Amelia & Ibrahim, Safwati & Zhubir, Nur. (2016). Investigation of Solar Panel Performance Based on Different Wind Velocity Using ANSYS Software. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 1. 456. 10.11591/ijeecs.v1.i3.pp456-463.