



**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA**

**ESTUDIO PARAMÉTRICO DE LA EMITANCIA  
TÉRMICA DE MICRO/NANOESTRUCTURAS CON  
APLICACIONES EN ENFRIAMIENTO RADIATIVO**

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

**PROF. GUÍA: JORGE MORALES**

**GERARDO SILVA**

**JAVIER IGNACIO ITURRA MORAGA**

**CURICÓ - CHILE  
2021**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco al profesor Jorge Morales por incentivar el estudio de nuevos temas que de otra forma no sabría que existían, permitiéndome abrir mi mente a distintos alcances de la ingeniería mecánica.

También quiero agradecer al profesor Gerardo Silva de la Universidad Tecnológica Metropolitana por ayudarme a lo largo del tiempo con la investigación, resolviendo dudas, inquietudes e incentivándome a ser más metódico

Además, quiero destacar al profesor Diego Gormaz por guiarme a lo largo del módulo de memoria I y II.

A los profesores de las distintas asignaturas ya que de una u otra forma me entregaron conocimientos nuevos.

Finalmente, a la señorita Alejandra Cabrera, asistente de la escuela, por su constante ayuda y buena disposición durante mis años de estudio.

## **DEDICATORIA**

A mi familia, pareja, amigos  
y todos lo que de alguna forma  
han sido parte de mi formación.

## RESUMEN

En este documento, se presenta el estudio de la emitancia térmica de nanoestructuras y como estas se pueden aplicar para enfriar radiativamente una superficie.

La refrigeración implica un uso importante de la energía que se produce actualmente, principalmente se ve reflejada en el alza en el consumo de energía eléctrica.

En la actualidad se buscan formas alternativas para subsanar esta problemática. Una de estas, llamada enfriamiento radiativo, consiste en emitir radiación directamente al espacio aprovechando que en un rango de longitudes de onda (8 a  $13\mu\text{m}$ ), la atmosfera no retiene la radiación emitida.

Para lograr este efecto se estudian varios enfriadores radiativos, estas son micro/nanoestructuras compuestas por distintos materiales cuya combinación de dimensiones provocan que el espectro de emisión de radiación de la estructura en general permita liberar una gran cantidad de energía y a la vez absorber poca energía proveniente del sol.

En la presente investigación se estudian siete nanoestructuras, en la que varían los materiales utilizados y las dimensiones de cada estructura para poder obtener una visión general de la potencia de enfriamiento que puede producir un enfriador radiativo nanoestructurado en comparación a una superficie sin un enfriador.

Una de las aplicaciones más interesantes es la de usar enfriadores radiativos en celdas fotovoltaicas, aunque queda fuera del alcance de esta investigación es una posible hoja de ruta para posteriores propuestas de estudio.

## ÍNDICE GENERAL

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| AGRADECIMIENTOS.....                 | ii  |
| DEDICATORIA.....                     | iii |
| RESUMEN.....                         | iv  |
| ÍNDICE GENERAL.....                  | v   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....               | ix  |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                | xii |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....        | 1   |
| 1.1. ANTECEDENTES.....               | 2   |
| 1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....   | 2   |
| 1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....         | 3   |
| 1.4. OBJETIVOS.....                  | 5   |
| 1.4.1. Objetivo general.....         | 5   |
| 1.4.2. Objetivos específicos.....    | 5   |
| 1.5. ALCANCES.....                   | 5   |
| 1.6. METODOLOGÍA.....                | 6   |
| 1.6.1. Primera etapa.....            | 6   |
| 1.6.2. Segunda etapa.....            | 7   |
| 1.6.3. Tercera etapa.....            | 8   |
| 1.6.4. Cuarta etapa.....             | 8   |
| 1.6.5. Quinta etapa.....             | 9   |
| 1.7. RESULTADOS ESPERADOS.....       | 9   |
| 1.8. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO..... | 10  |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....       | 12  |
| 2.1. RADIACIÓN TÉRMICA.....          | 13  |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 2.1.1.  | DEFINICIÓN .....  | 13 |
| 2.1.2.  | ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....                         | 14 |
| 2.1.3.  | RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO .....                         | 15 |
| 2.1.4.  | INTENSIDAD DE RADIACIÓN .....                           | 18 |
| 2.1.5.  | PROPIEDADES RADIATIVAS.....                             | 19 |
| 2.1.6.  | LEY DE KIRCHHOFF .....                                  | 21 |
| 2.1.7.  | RADIACIÓN SOLAR.....                                    | 21 |
| 2.1.8.  | BALANCE ENERGÉTICO .....                                | 23 |
| 2.2.  | ECUACIONES DE MAXWELL .....                             | 24 |
| 2.2.1.  | RCWA .....  | 26 |
| 2.3.  | ENFRIAMIENTO RADIATIVO .....                            | 26 |
| 2.3.1.  | DEFINICIÓN .....  | 26 |
| 2.3.2.  | ORÍGENES DEL ENFRIAMIENTO RADIATIVO .....               | 27 |
| 2.3.3.  | VENTANA ATMOSFÉRICA.....                                | 27 |
| 2.3.4.  | ENFRIAMIENTO RADIATIVO EN LA ACTUALIDAD .....           | 28 |
| 2.3.5.  | APLICACIONES .....                                      | 29 |
| 2.3.6.  | ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....                               | 29 |
| 2.4.  | POLARITONES MAGNÉTICOS.....                             | 32 |
| 2.4.1.  | ABSORBEDORES PERFECTOS Y METAMATERIALES .....           | 32 |
| 2.4.2.  | MODELO CIRCUITO LC .....                                | 34 |
| CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA ..... |   | 38 |
| 3.1.  | DEFINICIÓN .....  | 39 |
| 3.2.  | OBTENCIÓN DE PROPIEDADES ÓPTICAS.....                   | 39 |
| 3.2.1.  | Book of optical constants of solid (Palik, 1998). ..... | 39 |
| 3.2.2.  | Refractive index.....                                   | 41 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 3.2.3.                                   | Artículos científicos.....                           | 41 |
| 3.3.                                     | CALCULO DE constante dielectrica .....               | 41 |
| 3.3.1.                                   | CALCULO REFLEXIÓN, TRANSMISIÓN Y ABSORCIÓN: S4 ..... | 43 |
| 3.3.2.                                   | BENCHMARK 1 (Z. Zhang et al., 2018) .....            | 45 |
| 3.3.3.                                   | BENCHMARK 2 (Wang & Zhang, 2012) .....               | 48 |
| 3.4.                                     | CIRCUITO LC – CÓDIGO MATLAB .....                    | 51 |
| 3.5.                                     | POTENCIA ENFRIAMIENTO – MATLAB .....                 | 53 |
| 3.6.                                     | ESQUEMA RESUMEN PROCEDIMIENTO .....                  | 54 |
| CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... |  | 56 |
| 4.1.                                     | DEFINICIÓN .....                                     | 57 |
| 4.2.                                     | ESTUDIOS DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS .....              | 58 |
| 4.2.1.                                   | PRIMER ESTUDIO .....                                 | 58 |
| 4.2.2.                                   | SEGUNDO ESTUDIO .....                                | 60 |
| 4.2.3.                                   | TERCER ESTUDIO.....                                  | 63 |
| 4.3.4.                                   | CUARTO ESTUDIO.....                                  | 66 |
| 4.3.5.                                   | QUINTO ESTUDIO.....                                  | 67 |
| 4.3.6.                                   | SEXTO ESTUDIO .....                                  | 69 |
| 4.2.7.                                   | SÉPTIMO ESTUDIO.....                                 | 71 |
| 4.3.                                     | TABLA RESUMEN.....                                   | 73 |
| 4.4.                                     | DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....                         | 73 |
| 4.4.1.                                   | ESPECTRO DE EMISIÓN .....                            | 74 |
| 4.4.2.                                   | CIRCUITO LC .....                                    | 77 |
| 4.4.3.                                   | POTENCIA DE ENFRIAMIENTO .....                       | 77 |
| 4.4.4.                                   | RESUMEN HALLAZGOS .....                              | 78 |
| CONCLUSIONES.....                        |  | 80 |



|   |    |
|---|----|
| REFERENCIAS .....                             | 84 |
| ANEXO 1: INTERPOLACIÓN MATERIALES USADOS..... | 87 |
| ANEXO 2: Paneles fotovoltaicos.....           | 90 |
| ESTRUCTURA CELDA FOTOVOLTAICA.....            | 90 |
| COMPORTAMIENTO DE LA LUZ EN UNA CELDA.....    | 93 |
| ESTRUCTURA PANEL FOTOVOLTAICO .....           | 94 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2-1: Espectro electromagnético. FUENTE: (Kreith et al., 2012).....   | 15 |
| Figura 2-2: Potencia de radiación temperaturas. FUENTE:(Kreith et al., 2012).....   | 17 |
| Figura 2-3: Emisividad de distintos materiales según su longitud de onda. FUENTE:(Cengel, 2011).....  | 19 |
| Figura 2-4: Diagrama esquemático reflexión, transmisión y absorción. FUENTE:(Kreith et al., 2012).....  | 20 |
| Figura 2-5: Espectro solar y absorción de distintas moléculas en la atmosfera. FUENTE: (Modest, 2003) .....   | 23 |
| Figura 2-6: Esquema de los flujos de calor que ocurren en las superficies terrestres. B. Espectro solar (rojo) y espectro de radiación terrestre (azul). FUENTE:(Yin et al., 2020) .....  | 28 |
| Figura 2-7: Eficiencia vs temperatura en un panel de perovskita CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> . FUENTE:(Mesquita et al., 2019) .....   | 30 |
| Figura 2-8: Procesos de absorción, emisión y reflexión que ocurren al recibir energía del sol. FUENTE:(D. Zhao et al., 2019) .....  | 31 |
| Figura 2-9:Celda experimental propuesta: A la derecha (línea negra), el espectro de emisión de la celda experimental, superpuesta con el espectro solar y la ventana atmosférica. A la derecha la composición de la estructura estudiada. FUENTE:(D. Zhao et al., 2019) ..... | 32 |
| Figura 2-10: Panel fotovoltaico sin SiC (Izquierda) y con SiC (derecha). FUENTE:(Cai et al., 2019).....   | 33 |
| Figura 2-11: Absorción obtenida a partir de las celdas de la figura 2-15. La línea roja corresponde a la celda con SiC y la línea puntuada a la celda sin SiC. FUENTE:(Cai et al., 2019).....   | 34 |
| Figura 2-12: Celda fotovoltaica y su circuito LC asociado. FUENTE:(Z. M. Zhang, 2020)....   | 35 |
| Figura 3-1: Tabla con propiedades ópticas del telurio de cadmio. FUENTE:(Palik, 1998).....  | 40 |
| Figura 3-2: Gráfica de propiedades ópticas del telurio de cadmio. FUENTE: (Palik, 1998)....   | 40 |
| Figura 3-3: Interpolación realizada en Matlab para las constantes dieléctricas real e imaginaria del carburo de Silicio. FUENTE: Elaboración propia.....  | 43 |
| Figura 3-4: Interfaz código programa S4. FUENTE: Elaboración propia. ....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3-5: Validación código realizado en software S4 a partir de una celda de perovskita.<br>FUENTE: Elaboración propia. ....  | 45 |
| Figura 3-6: Estructura celda para realizar el benchmark 1. FUENTE:(Z. Zhang et al., 2018) .  | 46 |
| Figura 3-7: Reflexión (línea azul) y absorción (línea roja) versus longitud de onda producida<br>por la estructura propuesta. FUENTE: (Z. Zhang et al., 2018) .....  | 47 |
| Figura 3-8: Resultados obtenidos de la simulación usando el programa S4 (línea negra), datos<br>obtenidos de la figura 3-7 (línea azul). FUENTE: Elaboración propia. ....  | 48 |
| Figura 3-9: Estructura propuesta en el artículo. FUENTE: (Wang & Zhang, 2012) .....  | 49 |
| Figura 3-10: Gráfica de longitud de onda versus emitancia de la estructura propuesta (línea<br>roja). FUENTE: (Wang & Zhang, 2012).....  | 50 |
| Figura 3-11 Resultados obtenidos de la simulación usando el programa S4 (línea negra), datos<br>obtenidos de la figura 3-10 (línea azul). FUENTE: Elaboración propia. ....   | 51 |
| Figura 3-12: Gráfica de ancho de tira de metal versus longitud de onda y versus emitancia.<br>Mientras más claro es el sector, la emitancia es mayor. En los triángulos verdes se marca el<br>sector donde ocurre la resonancia por polaritones magnéticos. FUENTE: (Wang & Zhang,<br>2012)..... | 52 |
| Figura 3-13: Gráfica de ancho de tira de metal versus longitud de onda. La línea azul<br>representa la referencia y los puntos magenta los resultados obtenidos con el código.<br>FUENTE: Elaboración propia. ....   | 53 |
| Figura 3-14: Diagrama de flujo simplificado del procedimiento para diseñar una estructura.<br>FUENTE: Elaboración propia. ....   | 55 |
| Figura 4-1: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la primera<br>nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.....   | 59 |
| Figura 4-2: Gráfico de factor de llenado versus peak de absorción en la nanoestructura a partir<br>del modelo del circuito LC. FUENTE: Elaboración propia. ....  | 61 |
| Figura 4-3: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la segunda<br>nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.....   | 62 |
| Figura 4-4: Gráfico espesor de la capa del material dieléctrico (SiO <sub>2</sub> ) versus peak de absorción<br>en la nanoestructura a partir del modelo del circuito LC. FUENTE: Elaboración propia. ....   | 64 |
| Figura 4-5: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la tercera<br>nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.....   | 65 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4-6: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la cuarta nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.....   | 67 |
| Figura 4-7: Estructura usada en el caso de estudio. FUENTE:(Cai et al., 2019) .....  | 68 |
| Figura 4-8: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la quinta nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.....   | 69 |
| Figura 4-9: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la sexta nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.....  | 71 |
| Figura 4-10: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para una capa de tungsteno, usada como séptimo caso de estudio. FUENTE: Elaboración propia.....                                 | 72 |
| Figura 4-11: Espectro solar (amarillo), ventana atmosférica (azul), espectro emisión cuerpo negro a 300K (línea puntuada), emisión ideal de un enfriador radiativo (línea roja). FUENTE:(Li & Fan, 2019) ..... | 74 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 4.1 Medidas estructura usada como primer estudio. FUENTE: Elaboración propia. ....  | 58 |
| Tabla 4.2 Medidas iniciales de nanoestructura usada para estudio a partir del espesor factor de llenado. FUENTE: Elaboración propia. ....             | 60 |
| Tabla 4.3 Medidas finales de la estructura usada como segundo diseño. FUENTE: Elaboración propia. ....  | 62 |
| Tabla 4.4 Medidas iniciales de la nanoestructura usada para estudio a partir del espesor de la tira del dieléctrico. FUENTE: Elaboración propia. .... | 63 |
| Tabla 4.5 Medidas finales de la estructura usada como tercer diseño. FUENTE: Elaboración propia. ....   | 65 |
| Tabla 4.6 Medidas nanoestructura articulo Cai, 2009 usada como cuarto estudio. FUENTE: Elaboración propia. ....                                       | 66 |
| Tabla 4.7 Medidas estructura articulo Cai, 2009 usado como quinto estudio. FUENTE: Elaboración propia. ....   | 68 |
| Tabla 4.8 Medidas finales de la estructura usada como sexto diseño. FUENTE: Elaboración propia. ....  | 70 |
| Tabla 4.9 Tabla resumen de los resultados obtenidos en todas las pruebas. FUENTE: Elaboración propia. ....  | 73 |
| Tabla 4.10 Resumen con los resultados y análisis obtenidos. FUENTE. Elaboración propia. .   | 79 |

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. ANTECEDENTES**

El proyecto de tesis surge por la propuesta de los profesores Jorge Morales, de la Universidad de Talca y Gerardo Silva-Oelker de la Universidad Técnica Metropolitana, cuyo propósito es investigar y buscar soluciones a problemas relacionados con la eficiencia energética mediante el uso de simulaciones computacionales, en el área de la óptica y la radiación térmica.

La búsqueda de un diseño que produzca enfriamiento radiativo mediante la excitación de distintos tipos de resonancia. En primera instancia busca validar y estudiar modelos que permitan aportar a los diseños propuestos por otros autores. Además, el estudio sirve como propuesta de diseño para otros investigadores, la comunidad científica en general o alguna corporación interesada en replicar el modelo que se construirá. Es un desafío interesante ya que propone refrigerar sin gastar energía lo que supone una gran ventaja con los métodos usados habitualmente.

Cabe destacar que la energía extraída del sistema al enfriarlo será enviada al espacio por lo que no aporta al calentamiento global. Todo lo anterior requiere el conocimiento sobre la interacción de la luz en los materiales micro y nano estructurados, lo que supone un reto importante.

## **1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En la actualidad el uso de energías renovables es un tema de interés mundial. La dependencia en el uso de combustibles fósiles ha causado daños irreparables en el planeta. Actualmente, se busca utilizar de mejor forma los recursos existentes, aprovechando los recursos disponibles e interviniendo lo menos posible el medioambiente.

En la actualidad el uso de energías renovables alcanza el 19,8% al 2016. (Robles & Rodriguez, 2018). Por otro lado, el uso de aire acondicionado utiliza cerca del 15% de la energía eléctrica utilizada en edificios en Estados Unidos (Raman et al., 2014), por lo que lograr, enfriar superficies sin gastar energía es un reto en la búsqueda de la optimización del gasto de energía global.

En el uso de energías fotovoltaica también es un problema el aumento de temperatura. Un problema derivado del uso de paneles fotovoltaicos es su eficiencia. Muchos estudios se han dedicado a buscar y definir los límites de conversión energética de cada panel y en las últimas décadas el salto ha sido considerable, por ejemplo las celdas de perovskita han aumentado su eficiencia desde el 3,8% al 23,7% (Mesquita et al., 2019), pero también hay factores que influyen negativamente en la eficiencia, uno de estos es la temperatura (Jošt et al., 2020).

La celda necesita operar en el día y bajo la radiación solar, el problema surge cuando la celda se calienta por sobre su temperatura optima de trabajo. Para la celda de Silicio se obtuvo que por cada grado Kelvin por sobre la temperatura optima la eficiencia relativa baja 0,45% (Zhu et al., 2014).

Por los motivos expuestos, en la actualidad se ha abierto un campo para la búsqueda de mecanismos que permitan regular la temperatura de las superficies y que consuman la menor cantidad de energía posible. El enfriamiento radiativo es un mecanismo que permite disipar energía al espacio aprovechando las propiedades y la estructura de los materiales que componen la celda. Por lo que resulta atractivo diseñar una estructura que permita aprovechar de mejor forma el recurso solar.

### **1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA**

Para enfriar una estructura, por ejemplo, paneles fotovoltaicos se han propuesto varios métodos: Ventiladores, rociadores, disipadores, pero también se puede aprovechar la misma radiación solar para enfriarlos.

El enfriamiento radiativo consiste en devolver parte de la radiación obtenida del sol al espacio. La atmósfera se forma de una mezcla de varios gases que normalmente impiden que la radiación solar escape de la Tierra, este proceso se conoce normalmente como “efecto invernadero”, pero



## Capítulo 1. Introducción

en el rango de longitudes entre 8 y  $13\mu\text{m}$ , la radiación puede escapar libremente al espacio, a este rango se le denomina ventana atmosférica. (Bin Zhao et al., 2019)

En enfriamiento radiativo busca, por un lado, solucionar el problema del sobrecalentamiento de las celdas que afecta negativamente en su eficiencia y además lo logra sin consumir energía, ya que al ser una capa que va sobre la superficie del panel solo es necesario realizar un diseño con los materiales y distribuciones correctas para lograr el efecto. (D. Zhao et al., 2019)

El método usado para lograr el enfriamiento radiativo es el de resonancia por polaritones magnéticos, que consiste en diseñar una configuración de distintos espesores y materiales en las capas para provocar interacciones en las superficies de la estructura, modificando los campos eléctricos y magnéticos (Z. M. Zhang, 2020). De esta forma se pueden obtener valores cercanos a la unidad en la absorción y que además son independientes de la orientación de la radiación incidente, esto es de vital importancia considerando que el ángulo de incidencia de la radiación solar varía a lo largo de día.

El comportamiento de la estructura al usar el método de polaritones magnéticos se puede simular a través de un circuito LC en el que los materiales dieléctricos se comportan como capacitancias y los metales como inductancias, al resolver este circuito se pueden encontrar las longitudes de onda en las que la absorción es mayor, haciendo menos exhaustivo el proceso de diseño. De igual forma, posterior al diseño de la estructura acorde a los parámetros requeridos, se debe calcular la potencia que es capaz de disipar.

El diseño de una capa que permita enfriar una estructura, más el cálculo de la potencia de enfriamiento lograda, es lo que se busca en este proyecto de investigación, contribuyendo con una propuesta a la comunidad científica y a equipos que tengan los medios para fabricarla.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Estudiar nanoestructuras que permita el enfriamiento radiativo mediante emitancia en una superficie.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

1. Estudiar los principios del enfriamiento radiativo.
2. Estudiar y comprender el uso de programas computacionales que permitan el diseño de micro/nanoestructuras.
3. Calcular propiedades ópticas de micro/nanoestructuras en enfriamiento radiativo.
4. Validar modelos utilizados comparándolos con la literatura especializada.
5. Estudiar micro/nanoestructuras que permitan el enfriamiento radiativo.

## **1.5. ALCANCES**

El alcance de la investigación es el estudio nanoestructuras capaces de enfriar una superficie. Primero y a partir de las propiedades ópticas de los materiales usados en la estructura, se simula su comportamiento en una superficie micro o nanoestructurada, usando el software S4 (Liu & Fan, 2012), con estos resultados se analiza su potencia de enfriamiento con un código realizado en Matlab.

Las propiedades se obtienen a partir de la literatura especializada (Cai et al., 2019; Wang & Zhang, 2012) y las dimensiones de la estructura final corresponden a parámetros originales que permitan enfriar la superficie.

Todos los códigos se validan a partir de documentos publicados en revistas de investigación reconocidas, para asegurar la validez y la replicabilidad de la investigación.

## Capítulo 1. Introducción

El diseño solo alcanza el nivel conceptual, no su construcción, ya que este proceso requiere instalaciones con equipamiento muy específico.

### **1.6. METODOLOGÍA**

El objetivo final de la investigación es el estudio de diferentes micro/nanoestructuras, por lo tanto, son necesarios varios pasos metodológicos para llevarlo a cabo. Después de la identificación de la problemática y objetivos, se debe recopilar, clasificar y sintetizar toda la información encontrada acorde al tema a tratar, ya que se deben adquirir conocimientos específicos que permitan manejar las herramientas para el diseño y además poder analizar resultados. Posterior a la recopilación de datos, se deben usar programas específicos que ayuden a la simulación, por lo tanto, es necesario comprender su funcionamiento. Luego, se deben calcular propiedades ópticas a partir de la literatura disponible, este paso es importante ya que se probarán diversos materiales en cada simulación y usar propiedades validadas proporciona el sustento a las simulaciones que se realizarán. Posterior a esto se deben realizar pequeñas simulaciones para validar los resultados que se irán obteniendo, de esta forma se validan los códigos. Finalmente se procede al diseño de una estructura que permita enfriar una superficie.

El desglose de cada objetivo para lograr su ejecución se muestra a continuación.

#### **1.6.1. Primera etapa**

##### **Objetivo:**

Estudiar los principios del enfriamiento radiativo y formas de potenciar dicho enfriamiento.

##### **Actividades que se realizarán:**

- Recopilación de información de fuentes confiables, especialmente artículos científicos de revistas relevantes.

## Capítulo 1. Introducción

- Clasificar la información en distintos subtemas, por ejemplo, enfriamiento radiativo, propiedades ópticas de materiales, documentación de los programas que se utilizarán, etc.
- Sintetizar la información recopilada para tener un mejor acceso a ella, remarcando lo principal de cada fuente encontrada

### **Resultados:**

- Para este objetivo, como resultado se obtiene el marco teórico del presente informe.

### **Tiempo requerido para lograr el objetivo:**

- Corresponde a cuatro meses de investigación.

### **1.6.2. Segunda etapa**

#### **Objetivo:**

- Estudiar y comprender el uso de programas computacionales que permitan el diseño de nanoestructuras.

#### **Actividades que se realizarán:**

- Investigar e identificar programas que permitan simular y diseñar nanoestructuras o en su defecto que permitan aportar al desarrollo del objetivo general.
- Comprender el uso de cada programa seleccionado.
- Confeccionar pequeños códigos para identificar que se está usando de forma correcta cada programa.

#### **Resultados:**

- Códigos de pequeñas simulaciones, principalmente con estructuras de una sola capa. Esto servirá para comprender el uso del programa S4.
- Interpolaciones de propiedades ópticas. Esto servirá para comprender el uso del programa Matlab.
- Generación de gráficas con todos los resultados obtenidos. Esto servirá para comprender el uso de Gnuplot.

#### **Tiempo requerido para lograr el objetivo:**

- Corresponde a cuatro meses de investigación.

### 1.6.3. Tercera etapa

**Objetivo:**

- Calcular propiedades ópticas de materiales utilizados en superficies nano/micro estructuradas y enfriamiento radiativo.

**Actividades que se realizarán:**

- Búsqueda de información en fuentes confiables que proporcionen propiedades ópticas de materiales usados en enfriamiento radiativo.
- Calcular de permitividad a partir de las propiedades ópticas encontradas.
- Simular en monocapas a partir de las propiedades encontradas.

**Resultados:**

- Anexo con las propiedades de los materiales utilizados.

**Tiempo requerido para lograr el objetivo:**

- Corresponde a dos meses de cálculo.

### 1.6.4. Cuarta etapa

**Objetivo:**

Validar modelos utilizados comparándolos con la literatura especializada.

**Actividades que se realizarán:**

- Recopilar a partir de las fuentes seleccionadas en el objetivo específico 1 resultados que se puedan replicar.
- Replicar y simular los documentos científicos seleccionados
- Comparar resultados entre ambas simulaciones.

**Resultados:**

- Gráficas con simulaciones, tanto la original como la creada.
- Códigos que permiten la simulación.

**Tiempo requerido para lograr el objetivo:**

- Corresponde a tres meses de validación.

### 1.6.5. Quinta etapa

**Objetivo:**

- Estudiar nanoestructuras que permitan el enfriamiento radiativo.

**Actividades que se realizarán:**

- Estudio de estructuras, en un principio simples y luego más complejas que permitan disminuir la temperatura de una superficie.
- Calcular la potencia de enfriamiento y la temperatura de equilibrio a la que opera la nanoestructura

**Resultados:**

- Análisis potencia de enfriamiento y temperatura de equilibrio que proporciona cada nanoestructura.

**Tiempo requerido para lograr el objetivo:**

- Corresponde a cinco meses de diseño y discusión de resultados.

## 1.7. RESULTADOS ESPERADOS

Al término del presente trabajo de investigación se espera obtener las directrices de diseño que permita enfriar una superficie, para lograr este resultado, se abarca una serie de logros intermedios.

- Obtención de propiedades ópticas de distintos materiales a utilizar.
- Cálculo de reflexión, transmisión y absorción de una superficie tipo usada para validar y el cálculo de estos mismos valores en el diseño final, obtenidos en S4 (Liu & Fan, 2012).
- Cálculo de circuito LC de la nano/microestructura estudiada para encontrar puntos donde la absorción es cercana o igual a la unidad y conocer, en parte, el fenómeno físico que permite la ingeniería de la emitancia.
- Cálculo de potencia de enfriamiento del diseño propuesto.

## Capítulo 1. Introducción

- Comparación de potencia de enfriamiento entre las distintas nanoestructuras estudiadas.

### **1.8. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO**

En el primer capítulo se muestra un resumen del proyecto propuesto. Se bordan los antecedentes que inspiraron la investigación, la problemática asociada y la solución propuesta. Luego se detallan los objetivos y alcances que limitan el trabajo y, finalmente, la metodología que se seguirá y los resultados que se esperan obtener.

En el segundo capítulo se detalla toda la información necesaria para comprender el tema a tratar. En la primera parte se aborda la radiación y específicamente la radiación térmica ya que es la que nos entrega el sol que es perjudicial para el enfriamiento radiativo durante el día, luego se mencionan las leyes de Maxwell ya que la radiación es una onda electromagnética y en los programas de simulación se aborda como este tipo de onda, aquí radica su importancia.

Posteriormente, se describe el fenómeno de enfriamiento radiativo que es la forma de entregar radiación al espacio directamente sin gastar energía y finalmente se menciona la resonancia por polaritones magnéticos, que es el método por el que se obtendrá el enfriamiento en una celda

El tercer capítulo corresponde a la descripción de los pasos realizados para lograr el diseño de la estructura, desde la obtención de propiedades hasta la utilización de programas para simular el comportamiento de un enfriador con una estructura original. También incluye la descripción de los códigos usados y la función que cumplen además de los estudios que se utilizaron para validar estos códigos.

En el cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos, las gráficas con la absorción de cada nanoestructura, la potencia de enfriamiento obtenida, las dimensiones y características de las

## Capítulo 1. Introducción

estructuras propuestas. Además, se realizan las discusiones de resultados obtenidos y las mejoras futuras que pueden surgir de la investigación realizada.

Finalmente, el capítulo cinco explica las conclusiones a las que se llegaron a lo largo de toda la investigación, así como propuestas para seguir con la línea de investigación presentada en el presente informe.



## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

## 2.1. RADIACIÓN TÉRMICA

### 2.1.1. DEFINICIÓN

Para definir la radiación térmica primero se debe conocer qué es la radiación, la radiación es un mecanismo de transferencia de calor, como la conducción y la convección, pero difiere notoriamente de estas, ya que, posee características particulares mencionadas a continuación (Kreith et al., 2012; Z. M. Zhang, 2020):

1. Puede transferir energía con o sin un medio material de por medio.
2. Es más rápida (velocidad de la luz en el vacío).
3. Se presenta en sólidos, líquidos y gases.
4. Cualquier cuerpo con una temperatura sobre el cero absoluto, emite radiación.
5. La transferencia de calor por radiación puede realizarse entre dos cuerpos separados por uno más frío.
6. La emisión de radiación depende de la longitud de onda. Por otra parte, propiedades radiativas de un material dependen de la orientación de la incidencia de la luz y la temperatura.

La radiación térmica hace referencia al intercambio de calor producido por ondas electromagnéticas (Modest, 2003). Algunos de estos efectos ocurren cotidianamente, por ejemplo: sentir calor al estar bajo el sol, ver el cielo azul en el día o rojo en los atardeceres, sentir calor al estar parado frente al fuego, etc.

El fundamento para explicar el comportamiento de las ondas electromagnéticas lo estableció James Maxwell en 1864, él propuso que “las cargas aceleradas o las corrientes eléctricas cambiantes dan origen a campos eléctricos y magnéticos” (Cengel, 2011)

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por la longitud de onda y la frecuencia mediante la relación:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (1)$$

donde  $\lambda$  corresponde a la longitud de onda en micrómetros,  $\nu$  es la frecuencia y  $c$  la velocidad de la luz, que depende del medio en el que se propaga la onda por la siguiente formula:

$$c = \frac{c_0}{n}, \quad (2)$$

donde  $n$  corresponde al índice de refracción del material y  $c_0$  la velocidad de la luz en el vacío. Además, se encontró que la transmisión de energía no se realiza de forma continua, sino discreta, mediante paquetes llamados fotones o cuantos, propuestos por Max Planck (Planck, 1901).

La energía ( $e$ ) de un fotón con una frecuencia determinada es:

$$e = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (3)$$

donde  $h$  corresponde a la constante de Planck. ( $h$ = colocar el valor)

### 2.1.2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Existe un gran rango de longitudes de onda. Las más pequeñas y, por lo tanto, de mayor energía corresponden a los rayos cósmicos y a los rayos gamma que rondan los  $10^7 \mu\text{m}$ . Por otro lado, las longitudes de onda más grandes corresponden a las ondas de radio que llegan a  $10^{10} \mu\text{m}$ . Todo el rango de longitudes de onda se divide de acuerdo con la naturaleza de estas en el llamado espectro electromagnético, cuya imagen se muestra en la figura 2-1.

## Capítulo 2. Marco teórico

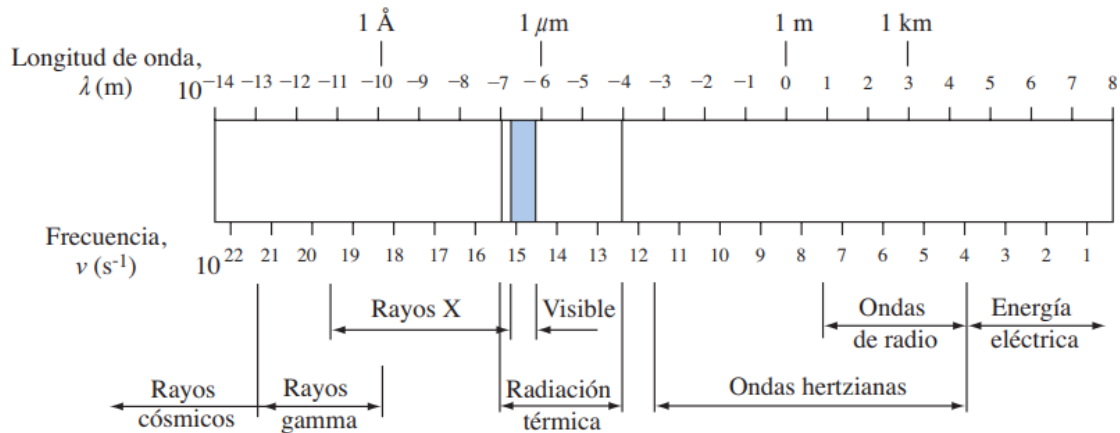


Figura 2-1: Espectro electromagnético. FUENTE: (Kreith et al., 2012).

Del espectro completo es de particular interés el espectro solar, es decir, el rango de longitudes de onda que proporciona el sol. Estos abarcan principalmente desde la parte más grande del ultravioleta hasta el infrarrojo, pasando por el rango visible por el ojo humano, que se encuentra entre los 400 y 700 nm.

### 2.1.3. RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO

Como se mencionó anteriormente, cualquier objeto por sobre el cero absoluto emite radiación, la cantidad de energía que emite depende de las características del material y la temperatura. En los sólidos no transparentes la emisión se realiza principalmente en la superficie del material ya que en el interior se absorbe por los átomos circundantes, por otro lado, en gases o sólidos transparentes se realiza de forma volumétrica.

En la radiación, al depender de la estructura de cada material y no solo de la temperatura, se emplea un material ideal que funciona como un perfecto emisor o absorbedor, llamado cuerpo negro. Esta idealización definida como un absorbedor o emisor perfecto (Incropera & De Witt, 1999), determina el límite en el cual un cuerpo puede emitir o absorber energía y se utiliza para comparar los demás materiales.

## Capítulo 2. Marco teórico

A diferencia de los materiales reales la radiación emitida ( $E_b$ ) por un cuerpo negro no depende de la dirección y la ecuación que la define es:

$$E_b(T) = \sigma T_s^4, \quad (4)$$

Donde  $\sigma$  corresponde a la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ) y  $T_s$  a la temperatura absoluta de la superficie.

La ecuación anterior también llamada potencia de emisión de cuerpo negro o ley de Stefan-Boltzmann corresponde a la totalidad de la radiación emitida por un cuerpo a una determinada temperatura, pero en la práctica no siempre es útil, a veces es necesario conocer la radiación en una cierta longitud de onda o en un rango. En este caso se utiliza la ecuación de Planck que depende tanto de la temperatura como de la longitud de onda.

$$E_b(\lambda, T) = \frac{2\pi h c_0^2}{\lambda^5 n^2 \left( \exp\left(\frac{hc_0}{k\lambda T}\right) - 1 \right)}, \quad (5)$$

donde  $k$  es la constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ). Esta ecuación es para cualquier material. En el caso de que sea a través del vacío o en un gas, se elimina el índice de refracción  $n$  ya que es 1 en dichos materiales.

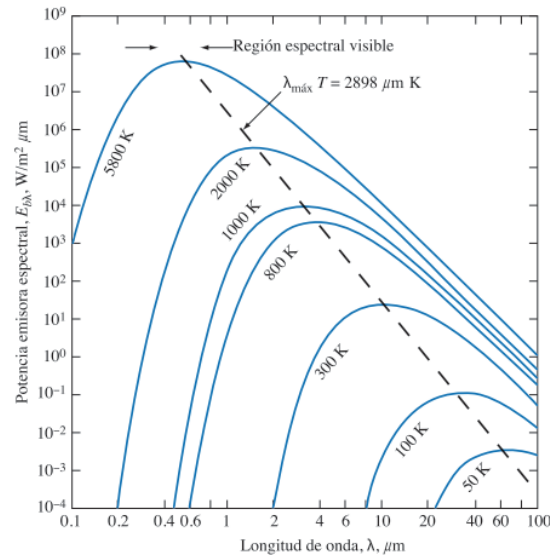


Figura 2-2: Potencia de radiación temperaturas. FUENTE: (Kreith et al., 2012)

En la figura 2-2 se muestra la potencia de radiación para distintos cuerpos negros a distintas temperaturas.

A partir de esta figura se pueden obtener las siguientes conclusiones (Cengel, 2011):

1. La emisión de radiación depende de la longitud de onda, primero aumenta rápidamente y luego decae, a medida que aumenta la longitud de onda.
2. A una misma longitud de onda mientras mayor sea la temperatura, mayor es la emisión.
3. Mientras aumenta la temperatura, la potencia máxima de radiación se corre a la izquierda (Ley de Wien).
4. La emisión de radiación del sol alcanza su máximo en la región visible y los objetos que nos rodean la emiten principalmente en la región infrarroja.

Para un cuerpo negro se pueden relacionar las ecuaciones mencionadas.

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_b(\lambda, T) d\lambda = \sigma T_s^4, \quad (6)$$

Como se mencionó anteriormente, la emisión de cuerpo negro abarca la energía emitida en todas las longitudes de onda a una cierta temperatura.

En el caso de querer conocer la radiación emitida en un rango de longitudes de onda se utiliza la función de radiación de cuerpo negro que corresponde a una resta de integrales entre las dos longitudes de onda que se quiere conocer.

$$f_{\lambda_1-\lambda_2}(T) = \frac{\int_0^{\lambda_1} E_b(\lambda, T) d\lambda - \int_0^{\lambda_2} E_b(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T_s^4} = f_{\lambda_2}(T) - f_{\lambda_1}(T), \quad (7)$$

donde la función  $f_\lambda$  corresponde a una fracción de la radiación emitida de un cuerpo negro a una temperatura T en la banda de longitudes de onda que va desde  $\lambda = 0$  hasta  $\lambda$ . (Cengel, 2011)

#### 2.1.4. INTENSIDAD DE RADIACIÓN

Por otra parte, la emisión de radiación en los materiales reales no es la misma en todas las direcciones y la cantidad que describe la magnitud de la radiación emitida en una cierta dirección es la intensidad de radiación, que depende de los ángulos zenit ( $\theta$ ) y azimut ( $\phi$ ).

La intensidad de radiación emitida es:

$$I_e(\theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}_e}{dA \cos\theta \sin\phi d\theta d\phi} \left( \frac{W}{m^2 sr} \right) \quad (8)$$

### 2.1.5. PROPIEDADES RADIATIVAS

Además de emitir radiación, los objetos también reciben radiación de los medios circundantes, esta cantidad se llama irradiación y se denota con la letra G.

Por otra parte, se emplea la letra  $\varepsilon$  para denotar la emisividad que corresponde a un valor entre 0 y 1. La emisividad representa la relación entre la radiación emitida por una superficie con un cuerpo negro. Como ocurre con los otros términos, este valor depende de la superficie, longitud de onda, dirección y temperatura. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{be}(\lambda, T)}, \quad (9)$$

La emisividad depende de varios factores como se puede apreciar en la ecuación 9. A continuación, se muestra una imagen con los valores de emisividad para distintos materiales.

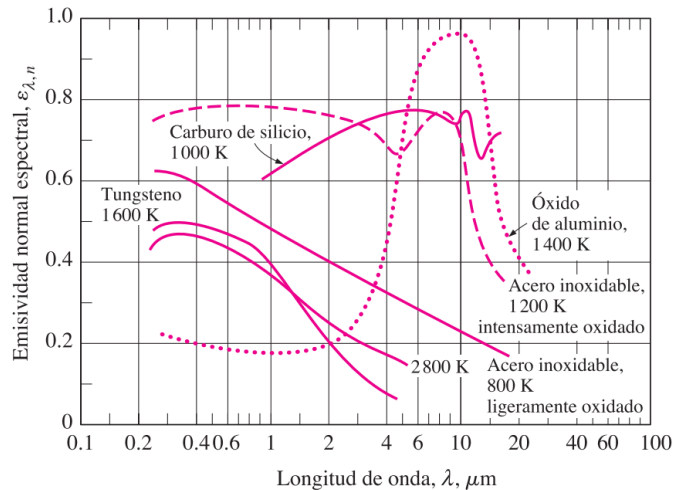


Figura 2-3: Emisividad de distintos materiales según su longitud de onda. FUENTE:(Cengel, 2011)

Como se mencionó anteriormente, todos los cuerpos emiten radiación, es por este motivo que también se recibe radiación de los cuerpos a nuestro alrededor, pero la radiación incidente en un cuerpo puede comportarse de tres formas distintas, cuyos nombres y formulas son:



Absortividad ( $\alpha$ ): Fracción de la irradiación absorbida por la superficie.

$$\alpha = \frac{\text{Radiación absorbida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{abs}}{G}, \quad (10)$$

Reflectividad ( $\beta$ ): Fracción de la irradiación reflejada por la superficie.

$$\beta = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{ref}}{G}, \quad (11)$$

Transmisividad ( $\tau$ ): Fracción de la irradiación transmitida por la superficie.

$$\tau = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{tr}}{G}, \quad (12)$$

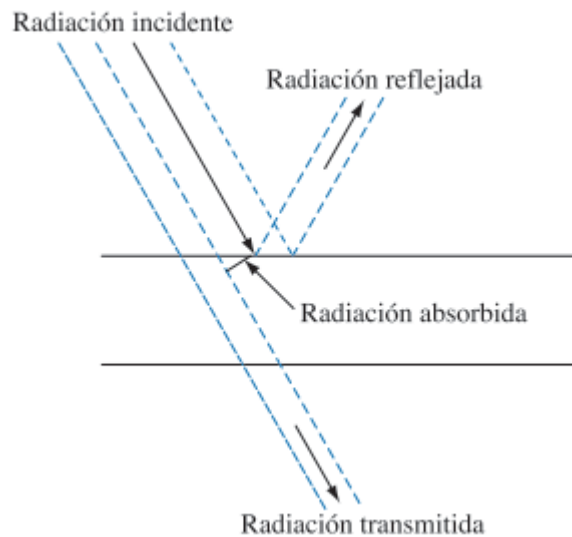


Figura 2-4: Diagrama esquemático reflexión, transmisión y absorción. FUENTE:(Kreith et al., 2012)

La relación entre estos términos para un medio semitransparente es:

$$\alpha + \beta + \tau = 1 \quad (13)$$

La relación entre estos términos es para un medio opaco, es decir no transmite radiación incidente es:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (14)$$

#### **2.1.6. LEY DE KIRCHHOFF**

La ley de Kirchhoff propone que “la emisividad hemisférica total de una superficie a una temperatura T es igual a su absorción hemisférica total para la radiación proveniente de un cuerpo negro a la misma temperatura” (Cengel, 2011). Como lo menciona la definición para que sea efectiva, la temperatura de la superficie debe ser igual a la de la fuente de irradiación. En este caso se cumple la siguiente igualdad:

$$\varepsilon(T) = \alpha(T), \quad (15)$$

#### **2.1.7. RADIACIÓN SOLAR**

Los conceptos y fórmulas mencionadas anteriormente son necesarios para el entendimiento de la transferencia de calor que ocurre desde el Sol a los cuerpos en la tierra, pero también es necesario explicar cómo llega la energía desde el sol, pasando por el vacío, luego por la atmósfera hasta finalmente ser recibida por los cuerpos en la tierra.

El Sol es una esfera de gas calentada por reacciones de fusión nuclear. La temperatura en su centro alcanza los 20 millones Kelvin. La radiación originada en el centro es absorbida en su mayoría y la superficie del sol se comporta como un cuerpo negro ideal a 5780K (Wenham, 2013).

## Capítulo 2. Marco teórico

Aunque la radiación emitida se comporte como un cuerpo negro al llegar a la atmósfera terrestre, al traspasarla esto ya no es así. La absorción y dispersión provocada en la atmósfera hacen que el espectro sea muy variable, como se observa en la figura 2-5

Además, cuando el sol está directamente sobre nuestras cabezas la radiación es mayor, pero al generarse un ángulo esta va decayendo.

La denominación para la trayectoria que debe recorrer la radiación solar se denomina coeficiente de masa de aire (AM), cuya fórmula es:

$$AM = \frac{1}{\cos(\varphi)}, \quad (16)$$

donde  $\varphi$  es el ángulo que forma la posición del sol y un punto hacia arriba. Siendo 0 cuando esta sobre nuestras cabezas y en este caso se denomina AM1 (Honsberg & Bowden, 2019).

La distribución espectral del Sol en el espacio se denomina AM0 ya que no incide en ningún medio y su valor es:

$$G_s = 1.3661 \frac{kW}{m^2},$$

Este valor es llamado también; constante solar o irradiación solar total.

Esta radiación no llega completamente a la superficie terrestre. La totalidad se divide en dos componentes, radiación solar directa, entendida como la parte que llega directamente desde el sol sin haber sido absorbida o esparcida y la radiación solar difusa que corresponde a la radiación que llega indirectamente desde todas las direcciones al haber interactuado con moléculas en la atmósfera. Estos valores varían notoriamente, en un día nublado la radiación difusa es mayor, no así en un día despejado y con un cielo limpio.

La radiación difusa se origina principalmente por los siguientes factores (Modest, 2003; Wenham, 2013):

1. Dispersión de Rayleigh por algunas moléculas en la atmósfera a longitudes de onda corta.
2. Dispersión por aerosoles.
3. Absorción por la atmósfera por gases como oxígeno, ozono, vapor de agua y dióxido de carbono, como se puede apreciar en la figura 2-5.

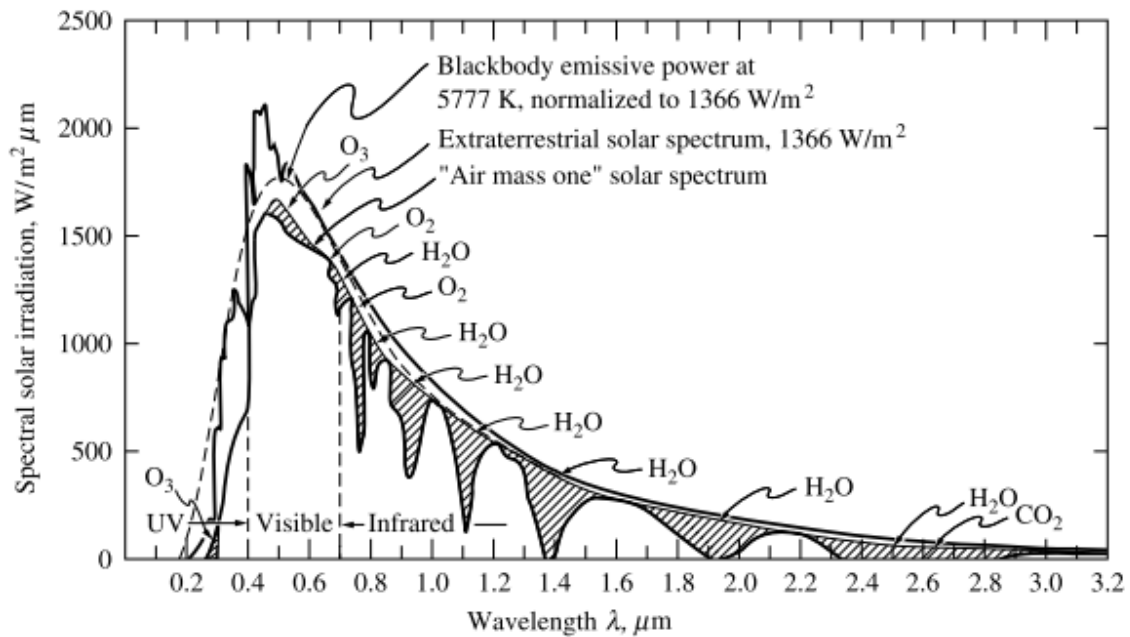


Figura 2-5: Espectro solar y absorción de distintas moléculas en la atmósfera. FUENTE: (Modest, 2003)

### 2.1.8. BALANCE ENERGÉTICO

Para realizar los balances energéticos en la superficie terrestre considerando la radiación absorbida por el cielo, es conveniente otorgar una temperatura ficticia para este y que se comporte como un cuerpo negro ideal.

$$G_{cielo} = \sigma T^4 \quad (17)$$

El valor de la temperatura ficticia, denominada temperatura efectiva de cielo varía entre 230K y 285K (Cengel, 2011).

$$\begin{aligned} \dot{q}_{neta,rad} &= \sum E_{absorbida} - \sum E_{emitida} \\ &= E_{solar,absorbida} + E_{cielo,absorbida} - E_{emitida} \\ &= \alpha_s G_{solar} + \varepsilon \sigma T_{cielo}^4 - \varepsilon \sigma T_s^4 \\ &= \alpha_s G_{solar} + \varepsilon \sigma (T_{cielo}^4 - T_s^4) \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (18)$$

Este balance es positivo cuando la superficie gana energía y negativo cuando lo pierde, con el fin de poder enfriar una superficie, cuyo objetivo es el central de esta investigación, es de gran importancia tener presente esta ecuación, aunque, como se verá más adelante existen otros factores que complejizan el cálculo.

El conocimiento de las propiedades y definiciones vistas anteriormente es vital, aunque el hecho de que varíen con la longitud de onda, dirección de entrada y salida las hacen poco prácticas. Las superficies puras y lisas se pueden calcular a partir de la teoría electromagnética (Modest, 2003).

## 2.2. ECUACIONES DE MAXWELL

Los primeros avances de esta teoría se realizaron en el siglo XVII con Snell con la ley de refracción, más adelante Newton descompuso la luz blanca. Romer, en el mismo siglo, determina la velocidad de luz, pero en el siglo XIX se da el salto con físicos como Young, Faraday o Fresnel hasta llegar el punto capital en el que James Maxwell presenta cuatro ecuaciones que describen completamente las ondas electromagnéticas, es decir, la interacción entre campos eléctricos y magnéticos (Fleish, 2008):

## Capítulo 2. Marco teórico

Las cuatro ecuaciones se muestran a continuación como (Serway & Jewett, 2016):

1. Ley de Gauss: Es el flujo total eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es igual a la densidad de carga de dicha superficie dividida en  $\epsilon_0$ .

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (19)$$

2. Ley de Gauss del magnetismo: El flujo magnético neto a través de una superficie cerrada es cero.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (20)$$

3. Ley de Faraday: Describe la creación de un campo eléctrico por un flujo magnético cambiante

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (21)$$

4. Ley de Ampere-Maxwell: Describe la creación de un campo magnético por un campo eléctrico variable y por corriente eléctrica.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (22)$$

### **2.2.1. RCWA**

Es un método computacional semi-analítico desarrollado en la década de los 80, que permite resolver estructuras periódicas aplicando las ecuaciones de Maxwell utilizando la transformada de Fourier (Z. M. Zhang, 2020).

Es un método rápido y eficaz, además necesita pocos datos de entrada, por ejemplo, en el software S4 es necesario añadir como entrada, el vector de longitud de onda y los vectores de las constantes dieléctricas reales e imaginarias.

Permite obtener las propiedades radiativas de una estructura (reflexión, absorción y transmisión).

## **2.3. ENFRIAMIENTO RADIATIVO**

### **2.3.1. DEFINICIÓN**

En la actualidad la demanda energética para refrigerar o usar aire acondicionado crece drásticamente debido al aumento de la población, mayor desarrollo industrial y mejor calidad de vida. Las tecnologías convencionales de enfriamiento usan compresión de vapor lo que involucra un gran gasto energético y además el uso de componentes nocivos para la atmósfera como los Hidrofluorocarbonos (HFC).

La conciencia medioambiental está creciendo a pasos agigantados y el uso de procesos que no sean invasivos con el medioambiente y que no requieran grandes gastos energéticos se vuelven necesarios. Como se mencionó anteriormente, todos los cuerpos emiten energía en forma de radiación al tener cierta temperatura y mientras mayor sea, mayor es la emisión. El enfriamiento radiativo se denomina al “proceso por el cual una superficie pierde calor a través de la radiación térmica”(D. Zhao et al., 2019).

La tierra se encuentra alrededor de los 300K y el espacio alrededor de los 3K. La diferencia de temperaturas es considerable por lo que se puede ocupar el espacio exterior como medio para desechar energía y así enfriar alguna superficie. Esto es una gran ventaja con otros sistemas de enfriamiento, que vierten la energía residual en los alrededores. En este caso se envía al espacio sin consumir energía en el proceso. El constante aumento en la temperatura terrestre posiciona este proceso como una solución con un gran potencial a futuro.

### **2.3.2. ORÍGENES DEL ENFRIAMIENTO RADIATIVO**

En la antigüedad, los persas ocupaban este proceso para fabricar hielo, aunque no eran conscientes del fenómeno que estaba ocurriendo, colocaban capas de bajo espesor con paredes para evitar el viento sobre una superficie sólida y en las noches de invierno debido a la expulsión de energía del agua, que posee una diferencia de temperatura con el espacio, se enfriaba hasta convertirse en hielo. En la naturaleza también se encuentra este fenómeno, las hormigas plateadas del Sahara están cubiertas por una densa capa de pelos que reflejan fuertemente la luz en el rango de 0,4-1,7 $\mu\text{m}$  y con una alta emisión entre los 2,5-16 $\mu\text{m}$  lo que las mantiene a una temperatura agradable.

El estudio sistemático de este proceso comenzó en 1960 investigando los principios para comprender el fenómeno y aplicaciones prácticas. En los 70 y 80 se investigó principalmente su uso nocturno (Catalanotti et al., 1975), encontrando que la temperatura se podía disminuir entre 10 y 15°C produciendo una potencia de enfriamiento entre 40-80 W/m<sup>2</sup>.

### **2.3.3. VENTANA ATMOSFÉRICA**

La radiación emitida desde la Tierra al espacio es retenida en la atmósfera en dos rangos, de 4 a 7 $\mu\text{m}$  el vapor de agua absorbe la radiación y de los 13 a 19 $\mu\text{m}$  el dióxido de carbono. Esto deja un rango, entre los 7 y 13 $\mu\text{m}$  en el que se escapa, aproximadamente, un 70% de radiación y se denomina “ventana atmosférica”.



### 2.3.4. ENFRIAMIENTO RADIATIVO EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad se busca aplicar el enfriamiento radiativo principalmente en el día, ya que es donde más se requiere refrigerar. Ha habido estudios sobre el uso de estructuras para enfriar edificios o casas y también para enfriar paneles fotovoltaicos.

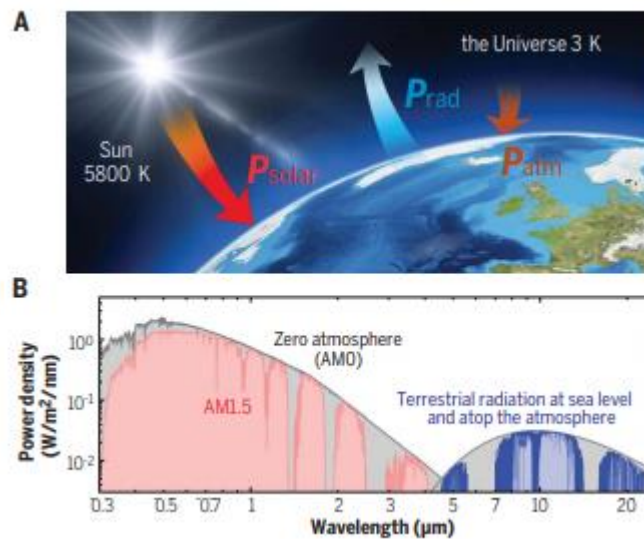


Figura 2-6: Esquema de los flujos de calor que ocurren en las superficies terrestres. B. Espectro solar (rojo) y espectro de radiación terrestre (azul). FUENTE:(Yin et al., 2020)

A partir del modelo mostrado en la ilustración 2-6, se puede determinar la potencia neta de refrigeración radiativa ( $P_{net}^{rad}$ ), en la ecuación de equilibrio que se utilizará, además se añade la potencia perdida por convección y conducción

$$P_{net}^{rad} = P_{rad} - P_{atm} - P_{solar} - P_{conv+cond} \quad (23)$$

## Capítulo 2. Marco teórico

Donde

$P_{rad}$ : Es la potencia de radiación térmica de la superficie

$P_{atm}$ : Es la potencia de radiación atmosférica absorbida en la superficie.

$P_{solar}$ : Es la energía de irradiación solar absorbida en la superficie.

$P_{conv+cond}$ ; Es la potencia perdida por convección y conducción.

### 2.3.5. APLICACIONES

### 2.3.6. ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La energía fotovoltaica es una energía renovable alternativa, cada vez más importante en comparación con las energías basadas en el uso de combustibles fósiles. Su uso es reciente, impulsado principalmente por la industria aeroespacial en la década de 1960, ya que se requería una fuente de alimentación que no estuviera conectada a la red energética. Las celdas solares abarcaron esta necesidad, aunque en esos años su costo era significativamente mayor al actual, lo que no las hacía ver como un competidor. Sin embargo, debido al avance en la electrónica principalmente en los transistores, sumado a la crisis del petróleo en la década del 70 posicionaron a las energías renovables, y en especial a la energía fotovoltaica, como una necesidad. Aunque en un comienzo el uso diario se vio mermado a calculadoras y relojes.

En la década del 80, la constante investigación científica logró fabricar paneles con un 20% de eficiencia y ya llegando al siglo XXI se podían encontrar celdas que llegaban a 38% (Jošt et al., 2020). Esto abrió nuevas posibilidades en su uso y en la actualidad son una opción para personas que se encuentran alejadas de la red eléctrica, sumado al aporte del uso de energías limpias.

En Chile su uso se ha masificado, debido principalmente al clima favorable en el norte del país. Desde el 2017 a la fecha se han puesto en marcha más de 10 plantas que suministran más de 1.000MW, aproximadamente.

## Capítulo 2. Marco teórico

Para una celda de unión única se determinó, según los análisis de Shockley y Queisser's, que su conversión máxima de energía teórica es 33,7% bajo el espectro solar (Shockley & Queisser, 1961), aunque en la práctica la eficiencia de las placas comerciales varía entre el 12% y el 20%. Esto nos dice que mientras existe una gran parte de la energía que es absorbida, hay otra parte que se pierde, no se puede convertir en electricidad y genera calor, calentando la estructura. Como se mencionó anteriormente, el aumento de la temperatura de operación influye negativamente en la eficiencia de conversión, pero también en la duración de un panel, ya que por cada 10°C sobre la temperatura optima de funcionamiento la tasa de envejecimiento se duplica (Zhu et al., 2014).

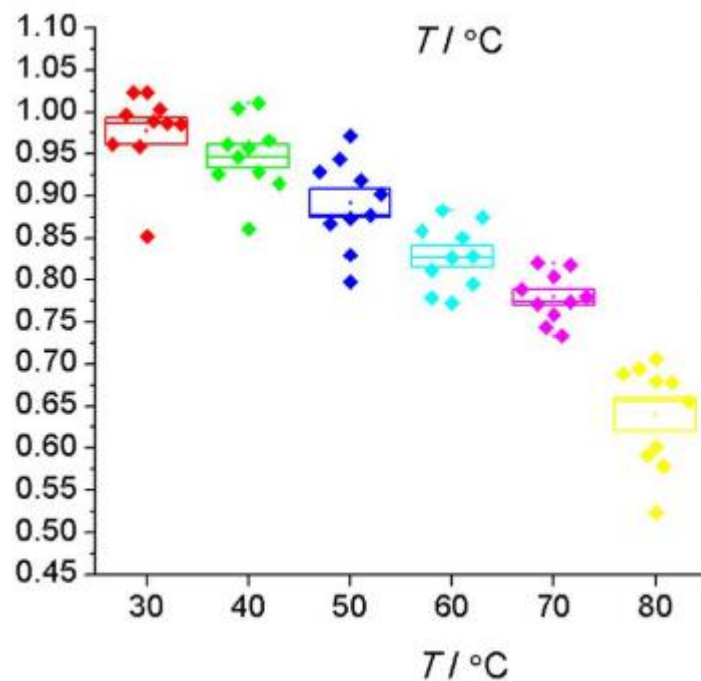


Figura 2-7: Eficiencia vs temperatura en un panel de perovskita  $CH_3NH_3PbI_3$ .

FUENTE:(Mesquita et al., 2019)

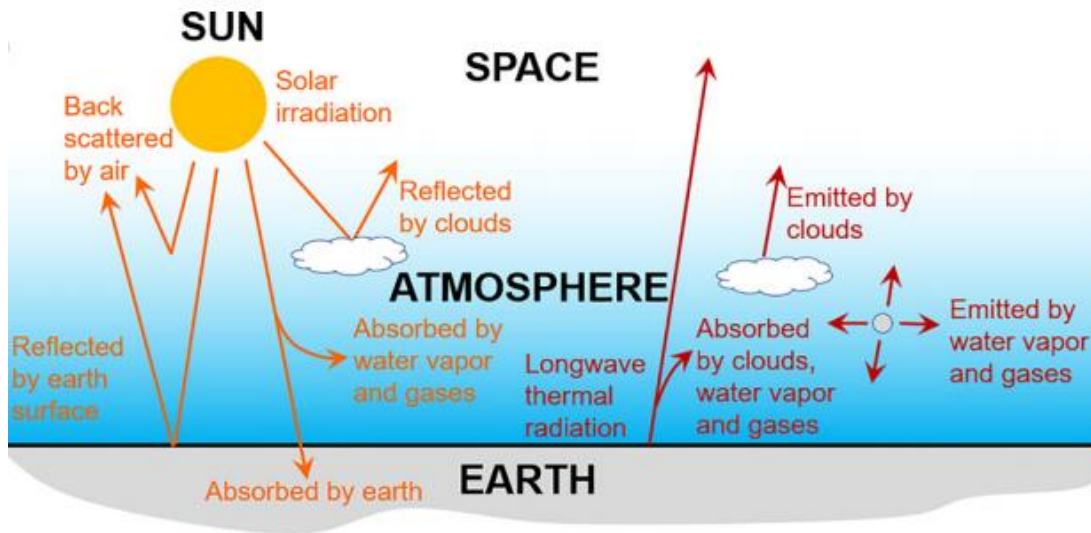


Figura 2-8: Procesos de absorción, emisión y reflexión que ocurren al recibir energía del sol. FUENTE:(D. Zhao et al., 2019)

La idea principal en el diseño de un enfriador radiativo es colocar una capa que sea transparente en el rango del espectro solar y además que sea un gran emisor en el rango de la ventana atmosférica, que se encuentra entre los 8 y los 13 $\mu\text{m}$ . El enfriamiento por este método se ha estudiado bastante, aunque principalmente como enfriador nocturno, usado en edificios. La complicación en el uso de enfriamiento en el día es que se debe absorber energía y al mismo tiempo liberar al espacio, lo que implica una aplicación más compleja de la ingeniería de los materiales.

Entre las aplicaciones, el estudio de enfriamiento radiativo en paneles fotovoltaicos ha crecido en el tiempo, aunque los desafíos siguen siendo altos, la necesidad de lograr una alta emisividad en un rango determinado ha llevado a ocupar principalmente óxidos y carbonatos de titanio, aluminio, calcio y zinc debido a su alta reflectividad en el espectro solar. En la ilustración 2-9 se muestra la primera demostración experimental de enfriamiento radiativo mediante el uso de un material nanofotónico (D. Zhao et al., 2019). Se puede evidenciar la alta emisión en la

ventana atmosférica y la baja en donde se concentra el espectro solar. Estos materiales son complejos y muchas veces escapan de la factibilidad económica para su fabricación, pero es un reto en la comunidad científica encontrar la configuración óptima, ya que las ventajas que entrega son prometedoras. En la actualidad los sistemas de prueba logran bajar alrededor de 10°C, aunque faltan más pruebas de campo para seguir perfeccionando el proceso.

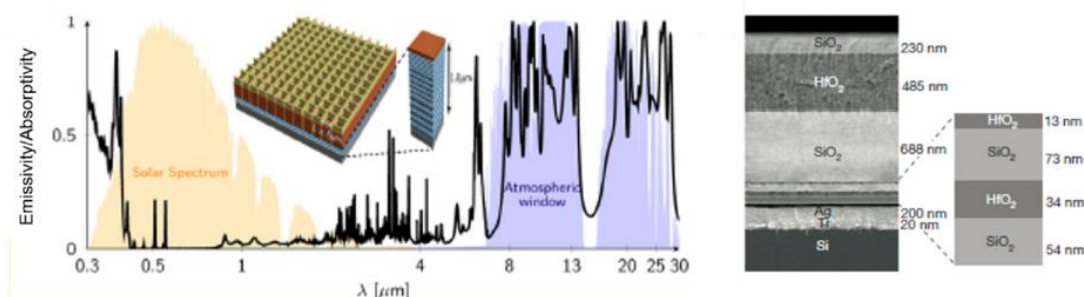


Figura 2-9: Celda experimental propuesta: A la derecha (línea negra), el espectro de emisión de la celda experimental, superpuesta con el espectro solar y la ventana atmosférica. A la derecha la composición de la estructura estudiada. FUENTE: (D. Zhao et al., 2019)

## 2.4. POLARITONES MAGNÉTICOS

### 2.4.1. ABSORBEDORES PERFECTOS Y METAMATERIALES

En 2008 Landy (Landy et al., 2008) demuestra la existencia de absorbedores perfectos en la región de microondas, provocados por metamateriales, definidos como “estructuras ordenadas artificialmente que rara vez se observan en materiales naturales. Los metamateriales electromagnéticos son materiales sintetizados o no convencionales con propiedades eléctricas y magnéticas exóticas” (Z. M. Zhang, 2020). Por otra parte, los absorbedores perfectos consisten en materiales que en algún lugar del espectro electromagnético logran que la absorción sea uno o un valor cercano.

Luego se descubrió que también existen metamateriales que actúan como absorbedores perfectos en otras longitudes de onda como la infrarroja y la luz visible. Llegar la unidad en la

## Capítulo 2. Marco teórico

absorción tiene varias aplicaciones: Recolectores de energía solar, enfriadores radiativos y sensores de alta calidad. Además, existen varios tipos de estructuras para lograr una absorción perfecta como son: nano-antenas, nano-cables, meta-superficies planas y estructuras metal-aislante-metal (MIM). Varios mecanismos físicos logran la absorción de resonancia: Plasmón-polaritón, resonancia de Fabry-Perot, entre otros, polaritones magnéticos. Estos últimos son de especial importancia ya que los polaritones magnéticos inducen una absorción perfecta que es casi independiente del ángulo de incidencia.

Un estudio (Cai et al., 2019) propone el uso de SiC dentro de un panel de rejilla híbrida, para provocar dos peaks de absorción, uno en los  $9,835\mu\text{m}$  y otro en los  $11,525\mu\text{m}$ . En la figura 2-10 se muestra el panel fotovoltaico usando la capa de SiC para generar dos peaks de absorción y el panel sin la capa de SiC provocando solo uno (figura 2-11).

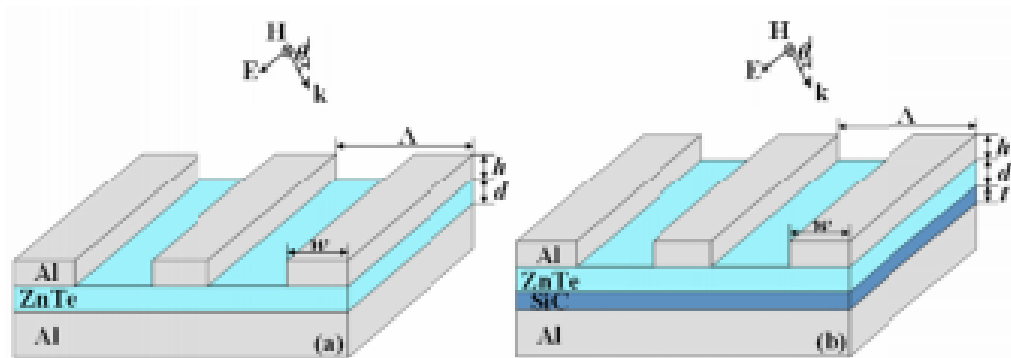


Figura 2-10: Panel fotovoltaico sin SiC (Izquierda) y con SiC (derecha). FUENTE:(Cai et al., 2019)

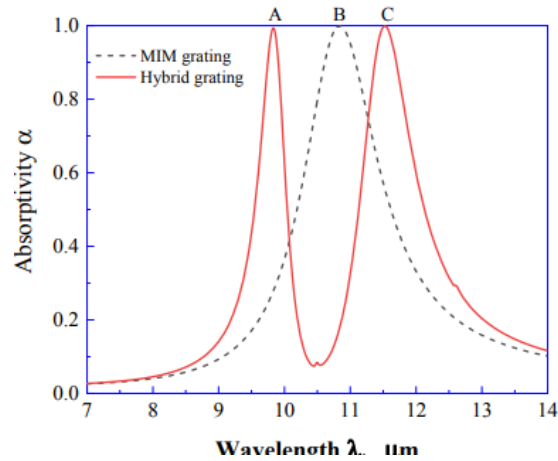


Figura 2-11: Absorción obtenida a partir de las celdas de la figura 2-15. La línea roja corresponde a la celda con SiC y la línea punteada a la celda sin SiC. FUENTE:(Cai et al., 2019)

#### 2.4.2. MODELO CIRCUITO LC

La longitud de onda a la que ocurre la resonancia puede ser predicha usando un modelo de circuito eléctrico (modelo LC) (Wang & Zhang, 2012), en el cual se toman los componentes de la celda como parte de un circuito eléctrico y cuya finalidad es calcular la impedancia generada.

El modelo más usado y simple es el de tiras paralelas, similar al de la figura 2-11, cuya capa superior comprende varias tiras de Aluminio.

Para ilustrar el cálculo del circuito LC, en la figura 2-16 se muestra una estructura más simple y su circuito equivalente.

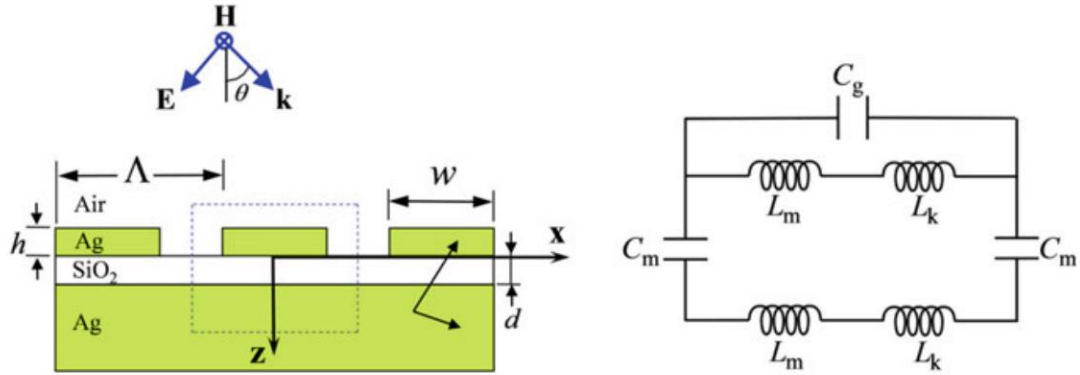


Figura 2-12: Celda fotovoltaica y su circuito LC asociado. FUENTE:(Z. M. Zhang, 2020)

En este caso, las tiras superiores son de plata, separadas por un material dieléctrico (aire). La capa activa es de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) y el sustrato es de plata.

El circuito asociado, y las fórmulas correspondientes mostrado a la derecha de la figura 2-12 se componen de la siguiente forma (Wang & Zhang, 2012):

1.  $C_g$ : Corresponde a la capacitancia generada por el aire cuya fórmula es:

$$C_g = \frac{\epsilon_0 h l}{(\Lambda - w)} \quad (24)$$

2.  $C_m$ : Capacitancia generada en el dieléctrico central SiO<sub>2</sub>.

$$C_m = \frac{c1\epsilon_d\epsilon_0 w l}{d} \quad (25)$$

3.  $L_m$ : Inductancia cinética originada en el conductor (plata).

$$L_m = \frac{0.5\mu_0 d w}{l} \quad (26)$$

4.  $L_e$ : Inductancia mutua originada en el conductor (plata).

$$L_e = \frac{-w}{(\omega^2 h_{eff} l \epsilon_0 \epsilon'_m)} \quad (27)$$

Donde:



## Capítulo 2. Marco teórico

$\epsilon_0$ : Permitividad en el vacío

$h$ : Espesor tira metálica

$\Lambda$ : Periodo del grating.

$w$ : Espacio entre tiras.

$c_1$ : Factor de corrección.

$\epsilon_d$ : Función constante dieléctrica aislante.

$\mu_0$ : Permeabilidad en el vacío.

$d$ : espesor material dieléctrico.

$l$ : ancho celda.

$\omega$ : frecuencia angular

$\epsilon'_m$ : parte real constante dieléctrica de material tira metálica.

$h_{eff}$ : espesor efectivo

Hay valores que no son constantes, como  $\omega$ ,  $\epsilon_d$ ,  $\epsilon'_m$  y  $h_{eff}$ . El primer valor es una relación a partir de la longitud de onda de los materiales.

$$\omega = \frac{2\pi c_0}{\lambda} \quad (28)$$

$\epsilon_d$  y  $\epsilon'_m$  dependen de la longitud de onda. La función dieléctrica se obtiene a partir de la parte real  $\epsilon'$  e imaginaria  $\epsilon''$  de las constantes dieléctricas de un material mediante la fórmula.

$$\epsilon_d = \epsilon'^2 + i\epsilon''^2 \quad (29)$$

La parte real se obtiene a partir del coeficiente de refracción  $n$  y del coeficiente de extinción  $k$  a partir de la relación.

$$\epsilon' = n^2 - k^2 \quad (30)$$

La parte imaginaria se obtiene a partir de la ecuación.

$$\varepsilon'' = 2nk \quad (31)$$

Y  $h_{eff}$ , que depende de la longitud de onda y del coeficiente de extinción  $k$ , se obtiene según la fórmula:

$$h_{eff} = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (32)$$

Aunque en el caso de que  $h_{eff}$  sea menor al espesor del material dieléctrico, se debe usar este último valor en la ecuación 27,

Finalmente, con las inductancias y capacitancias del circuito asociado, se debe calcular una raíz de la impedancia ( $Z_{tot} = 0$ ), ya que, de esta forma se puede predecir una frecuencia de resonancia.

Para realizar el cálculo se tienen una serie de vectores (longitud de onda, coeficiente  $n$  y  $k$ , constantes dieléctricas), por lo tanto, corresponde a una ecuación no lineal.

El cálculo de la impedancia,  $Z_{tot}$  mencionada más arriba, se realiza a partir de la siguiente fórmula.

$$Z_{tot}(\omega) = \frac{L_m + L_e}{1 - \omega^2 C_g (L_m + L_e)} - \frac{2}{\omega^2 C_m} + L_m + L_e \quad (33)$$

La ventaja de calcular estructuras mediante el circuito LC es que se pueden predecir las frecuencias de resonancia y de esta forma comprender parte de los fenómenos físicos involucrados y modificar la estructura que se diseñará.

## **CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA**

### **3.1. DEFINICIÓN**

En este capítulo se muestra el desarrollo de la propuesta realizada, considerando todos los pasos abordados para poder generar el diseño final.

En primera instancia se mencionan los pasos para obtener las propiedades ópticas de distintos materiales. Luego, una pequeña introducción al software S4, en el que se calculan algunas propiedades de las estructuras (reflexión, transmisión y absorción). Posteriormente, se realizan un par de benchmark para validar tanto los programas utilizados como los códigos que se escribieron. Luego, el uso del circuito LC y su validación, y finalmente, la validación del código para obtener la potencia de enfriamiento.

La naturaleza de este trabajo es desarrollar una estructura que permita enfriar una superficie, para lograrlo, primero se deben conocer las propiedades ópticas de dichos materiales en distintas longitudes de onda. Al estudiar el comportamiento a partir de la radiación solar, las propiedades utilizadas abordan desde los  $0,1\mu\text{m}$  hasta los  $30\mu\text{m}$  aproximadamente.

### **3.2. OBTENCIÓN DE PROPIEDADES ÓPTICAS**

Las propiedades ópticas permiten analizar el comportamiento de la estructura al recibir la radiación solar. Las propiedades que se necesitan para poder obtener estos resultados son el índice de refracción  $n$  y el coeficiente de extinción  $k$ . Estas varían entre materiales y dependen de la longitud de onda. Para obtenerlas se debe recurrir a algún artículo científico dedicado a la obtención, experimental o simulada, de estas.

Las fuentes usadas para obtener las propiedades ópticas en esta la investigación son 3:

#### **3.2.1. Book of optical constants of solid (Palik, 1998).**

Este material corresponde a un libro con varios volúmenes en los que se recopilan estudios sobre obtención de propiedades ópticas de distintos materiales. Es la fuente más confiable al momento

### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

de obtener datos, ya que estos han sido revisados por la comunidad científica. Gran parte de los artículos escritos que necesitan propiedades ópticas ocupan este libro como referencia. Se divide en varios capítulos en el que va abarcando distintos elementos y materiales.

En cada capítulo, después de definir brevemente cómo se obtuvieron las propiedades, muestra una tabla con los resultados obtenidos y finalmente una gráfica.

A continuación, se muestra parte de una tabla y una gráfica obtenida del material telurio de cadmio en el Palik.

**TABLE I**  
Values of  $n$  and  $k$  for Cadmium Telluride Obtained from Various References<sup>a</sup>

| $\mu\text{m}$ | $n$       | $n$ | $n$ | $k$       |
|---------------|-----------|-----|-----|-----------|
| 0.2530        | 2.48 [1]  |     |     | 2.04 [1]  |
| 0.2583        | 2.49      |     |     | 1.89      |
| 0.2638        | 2.48      |     |     | 1.80      |
| 0.2695        | 2.45      |     |     | 1.73      |
| 0.2755        | 2.43      |     |     | 1.67      |
| 0.2818        | 2.41      |     |     | 1.64      |
| 0.2883        | 2.38      |     |     | 1.60      |
| 0.2952        | 2.36      |     |     | 1.57      |
| 0.3024        | 2.33      |     |     | 1.59      |
| 0.3100        | 2.39      |     |     | 1.71      |
| 0.3179        | 2.57      |     |     | 1.90      |
| 0.3263        | 2.80      |     |     | 1.77      |
| 0.3351        | 2.92      |     |     | 1.61      |
| 0.3444        | 2.93      |     |     | 1.54      |
| 0.3542        | 2.89      |     |     | 1.52      |
| 0.3647        | 2.91      |     |     | 1.67      |
| 0.3757        | 3.30      |     |     | 1.67      |
| 0.3875        | 3.44      |     |     | 1.16      |
| 0.4000        | 3.43      |     |     | 1.02      |
| 0.4133        | 3.37      |     |     | 0.861     |
| 0.45          | 3.080 [3] |     |     | 0.485 [3] |
| 0.4509        | 3.23 [1]  |     |     | 0.636 [1] |
| 0.475         | 3.045 [3] |     |     |           |
| 0.4959        | 3.14 [1]  |     |     | 0.525     |

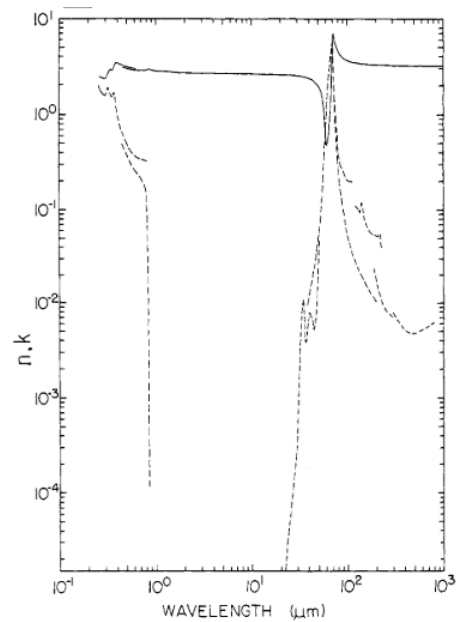


Figura 3-1: Tabla con propiedades ópticas del telurio de cadmio. FUENTE:(Palik, 1998)

Figura 3-2: Gráfica de propiedades ópticas del telurio de cadmio. FUENTE: (Palik, 1998)

El uso del Palik para obtener propiedades no abarca todas las posibilidades disponibles en el diseño de una estructura tipo celda. En este libro se encuentra una gran cantidad de materiales, pero hay muchos que quedan fuera. Además, como se puede ver en la imagen 3-1, los datos son entregados en una tabla y la utilización de estos datos requiere que sean transcritos a mano para

ser utilizados en algún diseño. Por estos motivos (aunque de mayor peso el primero), es que también se utilizan otros medios para obtener propiedades.

### **3.2.2. Refractive index**

Es una web dedicada a recopilar propiedades ópticas obtenidas en distintas investigaciones científicas. A diferencia del “Book of optical constant of solid” (Palik, 1998), posee materiales menos habituales (como algunas perovskitas), lo que entrega una herramienta adicional al tener un reservorio más diverso.

En esta plataforma se referencia el origen de la obtención de los datos, citando el artículo para poder buscarlo directamente y comprobar los datos o métodos utilizados. Además, se entregan los datos en formato .dat o .csv lo que facilita su trabajo al no ser necesaria la transcripción.

### **3.2.3. Artículos científicos**

Algunos papers entregan directamente las propiedades que utilizaron o la referencia asociada. Otros entregan una tabla con las propiedades obtenidas y simulaciones (Löper et al., 2015). En especial se utilizó un artículo que buscaba validar un código para simular el comportamiento en monocapas y multicapas utilizando RCWA (Bo Zhao, 2014), este artículo como archivo anexo entrega varias propiedades, de los materiales más usados, en un formato para su lectura en MATLAB.

## **3.3. CALCULO DE CONSTANTE DIELECTRICA**

Con las propiedades obtenidas (índice de refracción  $n$  y coeficiente de extinción  $k$ ), se puede calcular la constante dieléctrica, tanto la parte real e imaginaria usando las ecuaciones 30 y 31. Para usar el programa S4, que calcula las propiedades radiativas (Reflexión, Transmisión y Absorción), cada valor va asociado a una longitud de onda en particular, es decir, se calcula la reflexión, transmisión y absorción que produce una estructura de uno o varios materiales en una longitud de onda en específico, por lo tanto, todas las propiedades obtenidas deben ser calculadas para unas longitudes de onda en particular.

### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Para este trabajo, generalmente, se abarca desde  $0,1\mu\text{m}$  hasta los  $30\mu\text{m}$ , aunque el rango más importante es de  $0,28\mu\text{m}$  hasta los  $15\mu\text{m}$  aproximadamente ya que se debe observar el comportamiento de la absorción principalmente en la región donde la radiación solar es mayor (longitudes de onda bajas) y en la ventana atmosférica (longitud de onda entre  $8$  y  $13\mu\text{m}$ ).

Para hacer coincidir los valores de todas las propiedades, se escribió un código en MATLAB usando el comando INTERPL, para interpolar linealmente a partir de datos entregados, se usó una serie de datos, obtenidos desde las fuentes antes mencionadas, y se generó un vector de las constantes dieléctricas, reales y complejas, para cada material en el rango deseado.

En la mayoría de las simulaciones se utilizaron 300 puntos entre  $0,2$  y  $15\mu\text{m}$  lo que produce que cada valor esté a  $0,1\mu\text{m}$  de distancia. Este número de datos es relativamente alto y permite generar una buena interpolación, en la que los valores originales se vean reflejados.

De esta forma se obtienen las propiedades  $n$ ,  $k$  y la constante dieléctrica (real e imaginaria) para varios materiales en longitudes de onda iguales.

A continuación, se muestra una gráfica de una interpolación realizada en MATLAB, corresponde al carburo de silicio y abarca desde los  $6$  hasta los  $16\mu\text{m}$ .

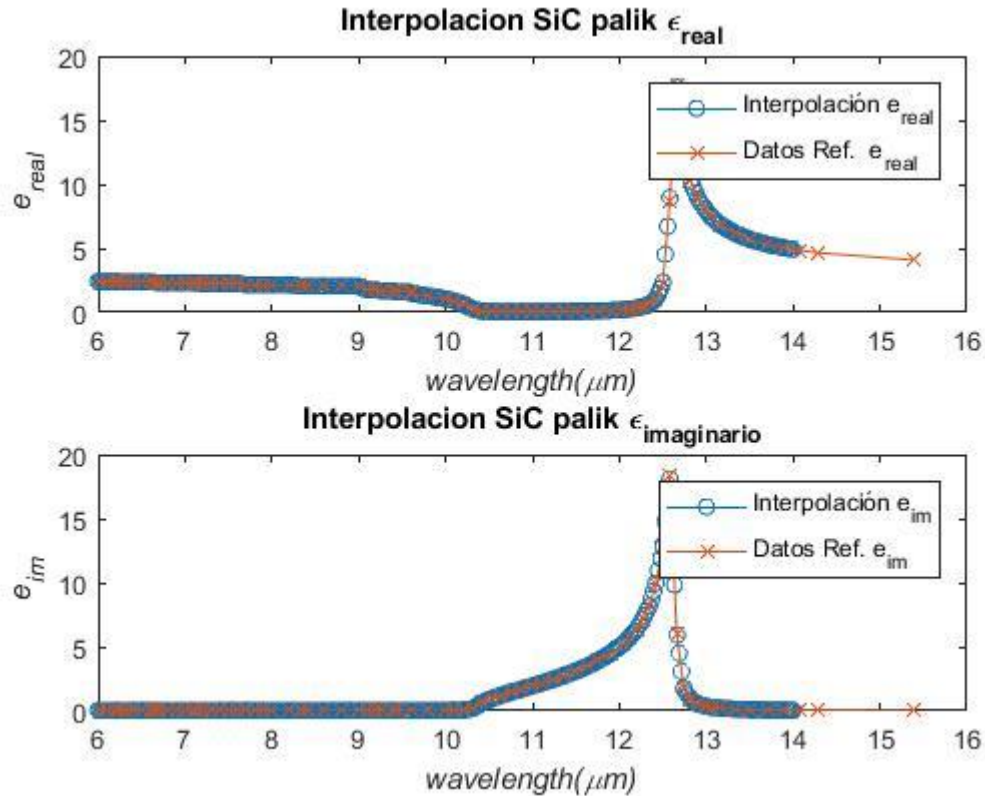


Figura 3-3: Interpolación realizada en Matlab para las constantes dieléctricas real e imaginaria del carburo de Silicio. FUENTE: Elaboración propia.

### 3.3.1. CALCULO REFLEXIÓN, TRANSMISIÓN Y ABSORCIÓN: S4

S4 es un software libre creado por docentes de la universidad de Standford (Liu & Fan, 2012) con el fin de realizar cálculos de propiedades radiativas a distintas estructuras. El programa es de código libre utilizando el sistema operativo Linux.

Para realizar una simulación en S4 es necesario definir los espesores y ancho de tira (en los casos que corresponda) de la estructura. También se deben escribir las constantes dieléctricas tanto real como imaginaria y la longitud de onda en la que se realizará la simulación. Luego se define el orden de cada capa y las dimensiones de cada una.



### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

El algoritmo que usa el software resuelve las ecuaciones de Maxwell usando el método RCWA para encontrar las propiedades radiativas. Las que se recopilan y grafican usando el programa Gnuplot.

En la imagen a continuación se muestra la primera parte del código realizado para simular el benchmark 2 (Wang & Zhang, 2012).

```
outfile = io.open('/home/jav/documentos/PROYECTO/archivos/resultados/datossalida7.txt','w');

S = S4.NewSimulation()
S:SetLattice(0.6)
S:SetNumG(50)

S:AddMaterial("wolf", {-8.3367,9.5256})
S:AddMaterial("sio2", { 2.41597454582944,1.46098576419214e-05})
S:AddMaterial("vacio", { 1.000,0.000 })

S:AddLayer('layer_above', 0.000000, 'vacio')
S:AddLayer('layer_1', 0.000000, 'vacio')
S:SetLayerPatternRectangle('layer_1','wolf', {0.0, 0.0}, 0.0, {0.15,1})
S:AddLayer('layer_2', 0.000000, 'sio2')
S:AddLayer('layer_4', 0.500000, 'wolf')
S:AddLayerCopy('layer_below', 0.000000, 'layer_above')

S:SetExcitationPlanewave({0.000000,0.000000},{0.000000,0.000000},{1.000000,0.000000})

wavelength = { -- wavelength (0.1-4.0um)
0.2,0.207615230460922,0.215230460921844,0.222845691382766,0.230460921843687,0.238076152304609,
,
}
```

*Figura 3-4: Interfaz código programa S4. FUENTE: Elaboración propia.*

Finalmente, al seguir los pasos descritos se pueden replicar estructuras diseñadas o simuladas por la comunidad científica. La imagen a continuación muestra una de las primeras simulaciones realizadas para validar los códigos hechos. Corresponde a una capa de perovskita que produce una alta reflexión entre los 800 y 2200 nm. En la figura 3-5, se compara lo obtenido por el programa S4 y lo digitalizado a través de la figura 1 del artículo. (Löper et al., 2015)

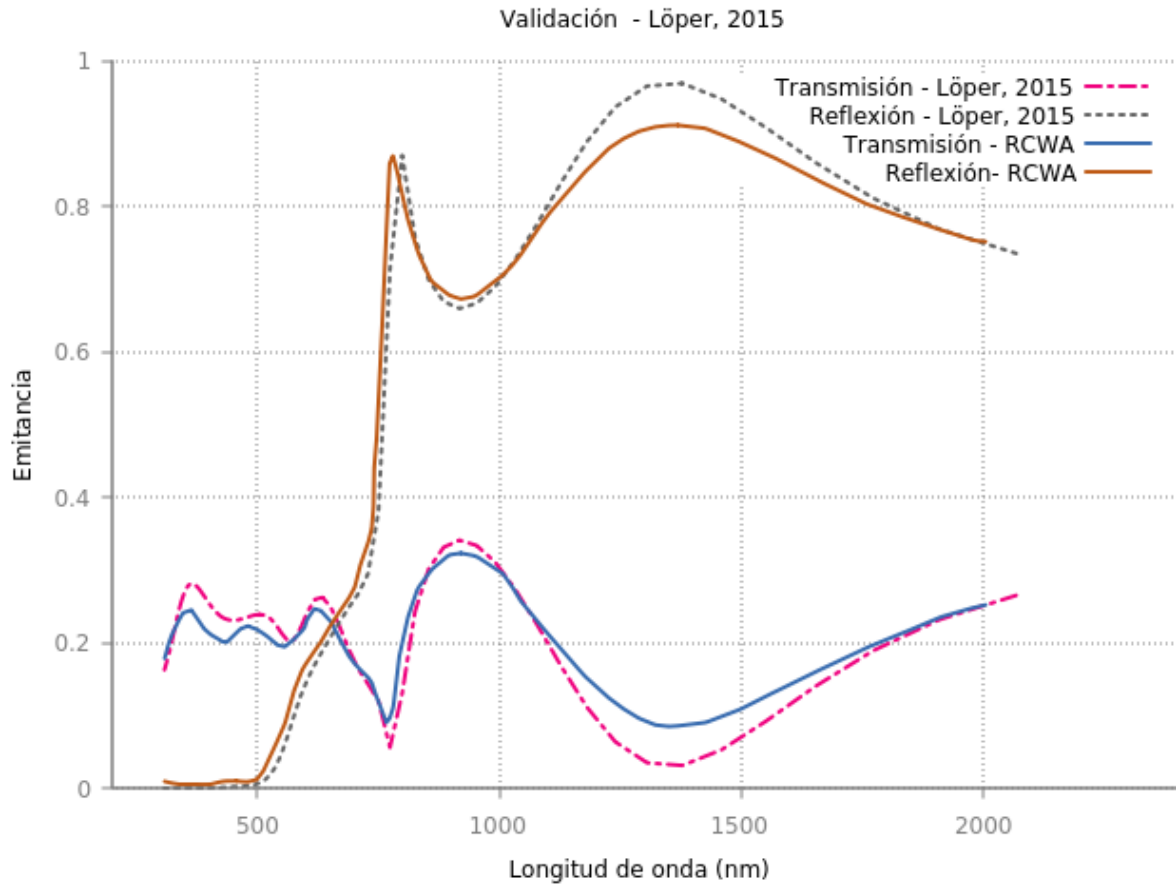


Figura 3-5: Validación código realizado en software S4 a partir de una celda de perovskita.

FUENTE: Elaboración propia.

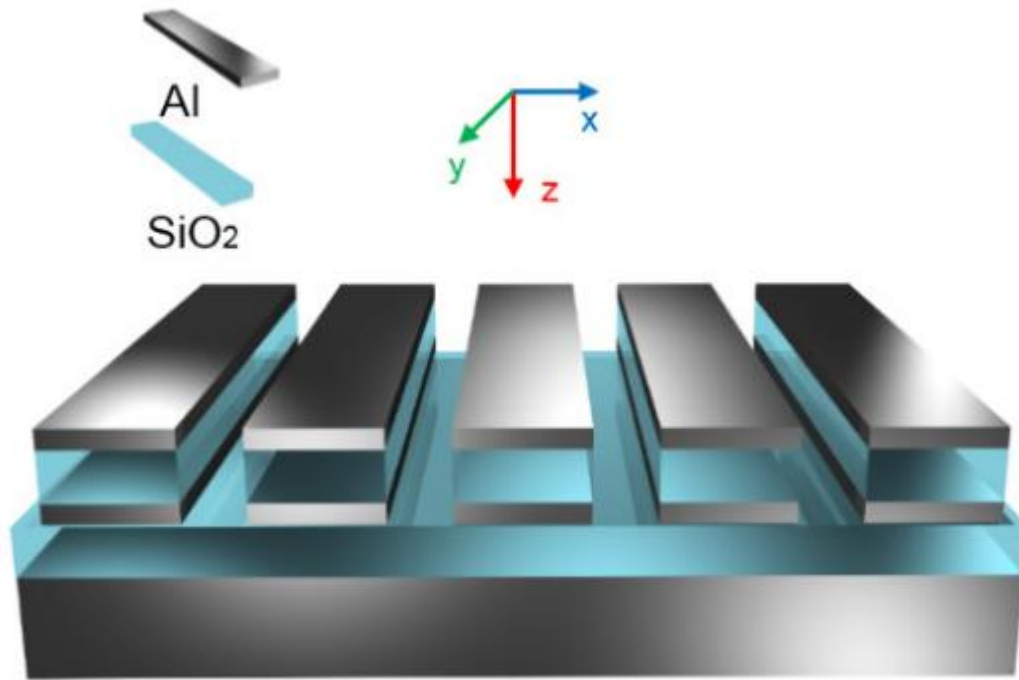
### 3.3.2. BENCHMARK 1 (Z. Zhang et al., 2018)

En este artículo se propone el diseño de una estructura 3-6 con cinco capas. Se intercala una capa metálica y luego una capa de un dieléctrico. Este formato de estructura se denomina Metal-Insulator-Metal (MIM) y es utilizado, ya que produce resonancias cuando se utilizan las dimensiones adecuadas, tanto de espesores de las capas como del ancho de las tiras.

El diseño propuesto posee tiras en la parte superior. Habitualmente en los diseños propuestos las tiras son metálicas (Cai et al., 2019; Wang & Zhang, 2012), pero en este caso la tira superior posee tres capas (Metal-Aislante-Metal). Está tira está compuesta solo de dos materiales, las

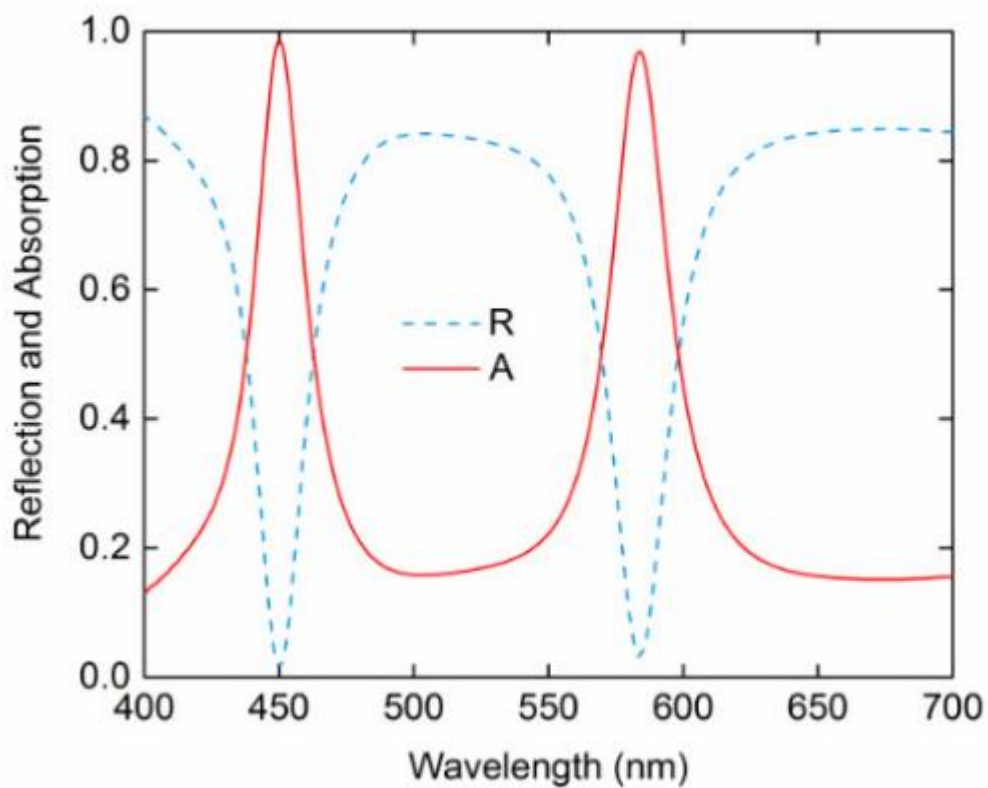
### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

capas metálicas son de aluminio y las capas celestes de dióxido de silicio. Con esto se busca obtener peaks de absorción en un rango de 400 a 700nm.



*Figura 3-6: Estructura celda para realizar el benchmark 1. FUENTE:(Z. Zhang et al., 2018)*

En la figura 3-7 se pueden visualizar los resultados obtenidos a partir de la estructura diseñada. Existen dos peaks de absorción (línea roja). Las longitudes de onda a la que ocurren estos peaks son 450 y 580nm. Con los datos mostrados en la tabla más los resultados obtenidos en el artículo se usó el programa S4 para replicar la estructura. Posteriormente se utilizó el programa Engauge Digitizer para digitalizar los resultados a partir de la gráfica del partículo.



*Figura 3-7: Reflexión (línea azul) y absorción (línea roja) versus longitud de onda producida por la estructura propuesta. FUENTE: (Z. Zhang et al., 2018)*

En la figura 3-8, se muestran los resultados de la simulación obtenida (línea azul) y los resultados de artículo usado como referencia (cruces de color magenta).

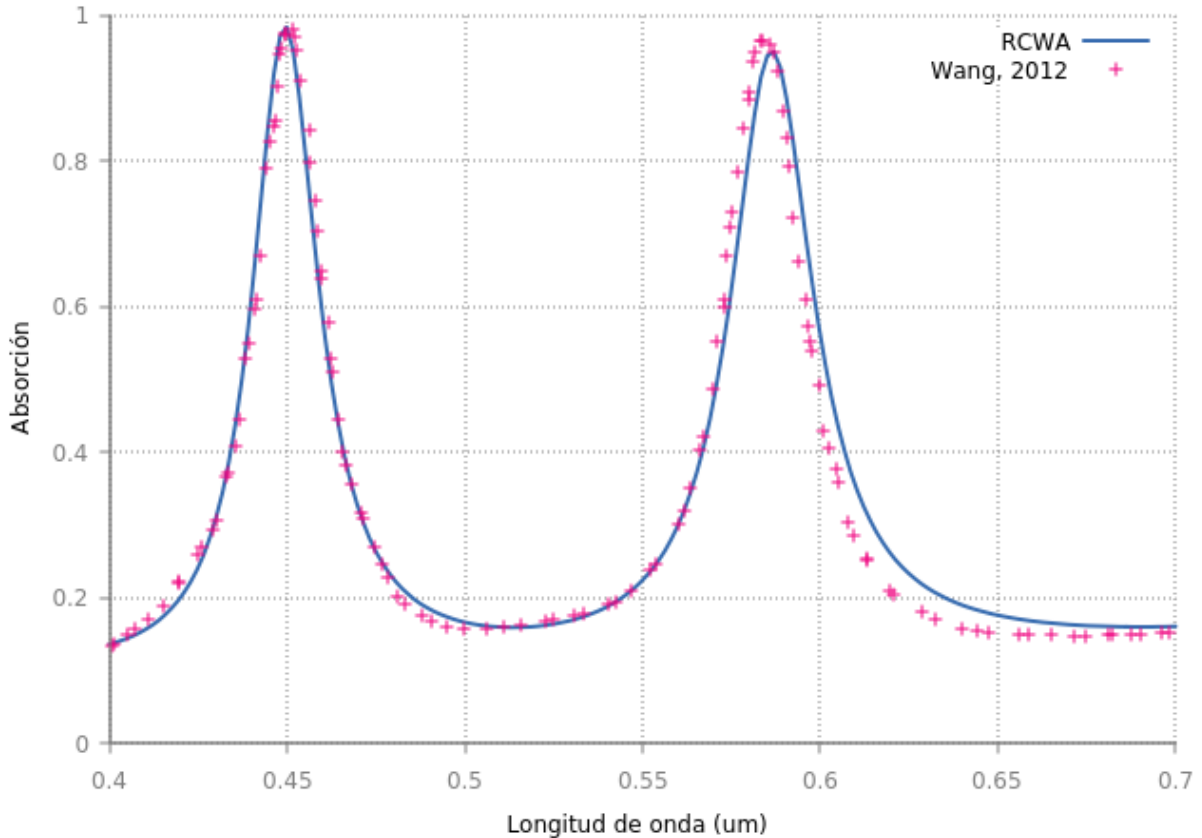


Figura 3-8: Resultados obtenidos de la simulación usando el programa S4 (línea azul), datos obtenidos de la figura 3-7 (línea roja). FUENTE: Elaboración propia.

Ambos resultados son prácticamente iguales, los peaks se presentan prácticamente en las mismas longitudes de onda (0,45 y 0,58 $\mu$ m), por lo tanto, se puede inferir que el código usado responde de forma correcta a situaciones y simulaciones reales.

### 3.3.3. BENCHMARK 2 (Wang & Zhang, 2012)

El segundo artículo utilizado como benchmark para validar el uso del software S4 y además el código escrito para la utilización del circuito LC se titula “Wavelength-selective and diffuse emitter enhanced by magnetic polaritons for thermophotovoltaics” (Wang & Zhang, 2012). En este artículo se diseña una estructura, mostrada en la figura 3-9. La capa superior (tiras metálicas) son de tungsteno, la capa intermedia es de dióxido de silicio y la capa inferior o sustrato también es de tungsteno.

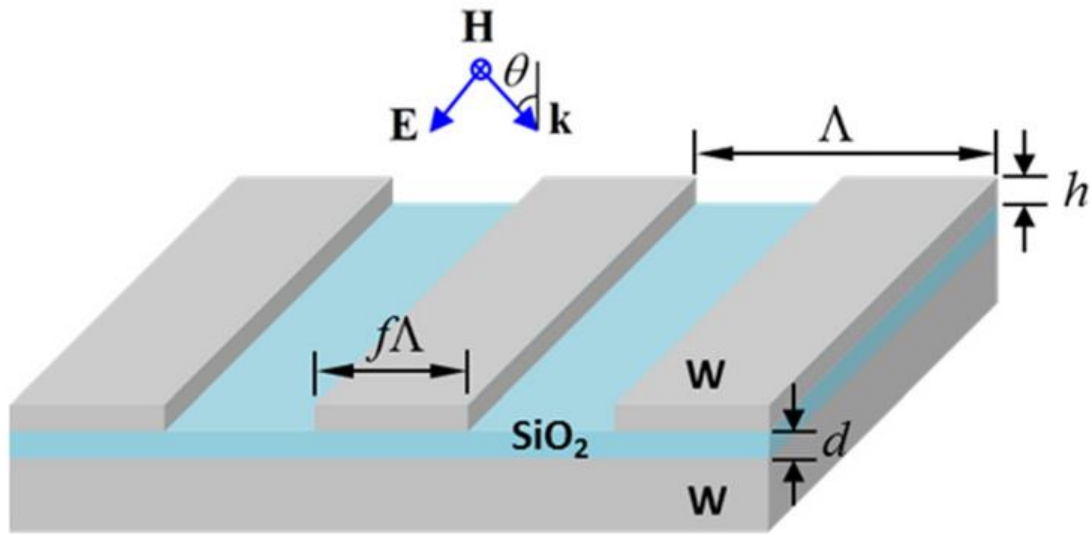


Figura 3-9: Estructura propuesta en el artículo. FUENTE: (Wang & Zhang, 2012)

En esta estructura, al igual que la realizada en el benchmark anterior, se utilizó el modelo LC para predecir los peaks de absorción y encontrar la configuración en las medidas de la estructura de tal manera que se produzca una absorción mayor en la ventana atmosférica.

Al realizar el circuito LC se encuentra un peak de absorción en la longitud de onda igual a  $1,83\mu\text{m}$ , pero al simular la emitancia producida entre  $0$  y  $4\mu\text{m}$  se encuentra un peak adicional. En este artículo se explica que el modelo LC sirve solo para encontrar resonancias producidas por polaritones magnéticos (peak obtenido a los  $1,83\mu\text{m}$ ), pero existen otros fenómenos que producen resonancia, como el plasmón superficial, que, en este caso, produce un peak a los  $0,73\mu\text{m}$ . En la gráfica 3-10, a continuación, extraída del artículo se muestra esta situación.

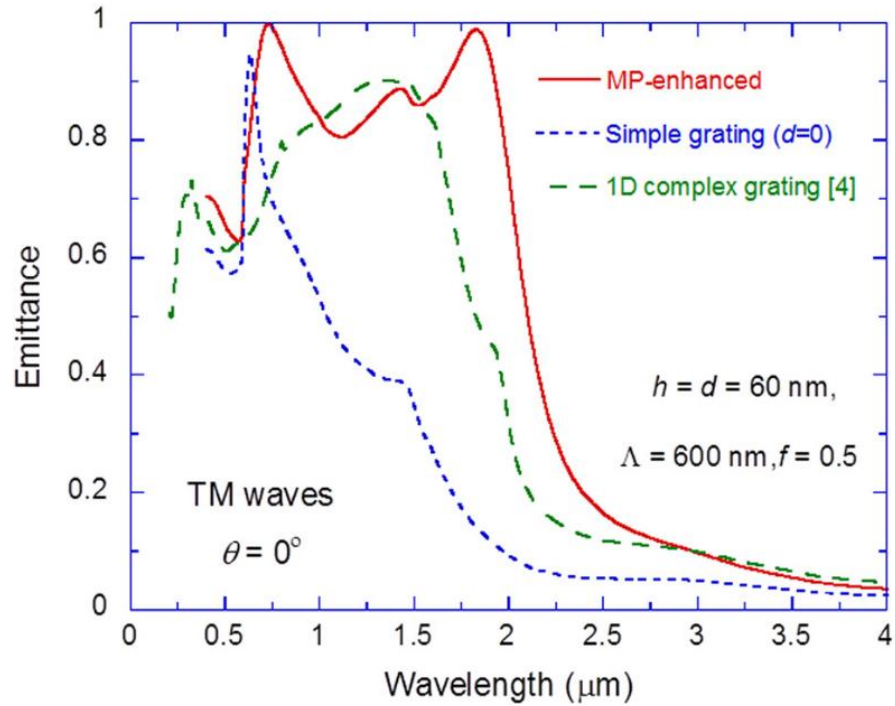


Figura 3-10: Gráfica de longitud de onda versus emitancia de la estructura propuesta (línea roja). FUENTE: (Wang & Zhang, 2012)

La línea roja es el caso analizado y muestra los dos peaks. Para simular y replicar el artículo se obtuvieron las propiedades del tungsteno y del dióxido de carbono del Palik (Palik, 1998), se obtuvieron los vectores a través de los códigos realizados en MATLAB y las dimensiones otorgadas por el artículo.

La imagen 3-10 se muestra la figura obtenida del paper, en la que se rescataron las mediciones mostradas en la figura 3-10 (línea roja), usando el software Engauge Digitizer para obtener los puntos a través de la gráfica.

Estos puntos se contrastaron con los obtenidos en el software S4.

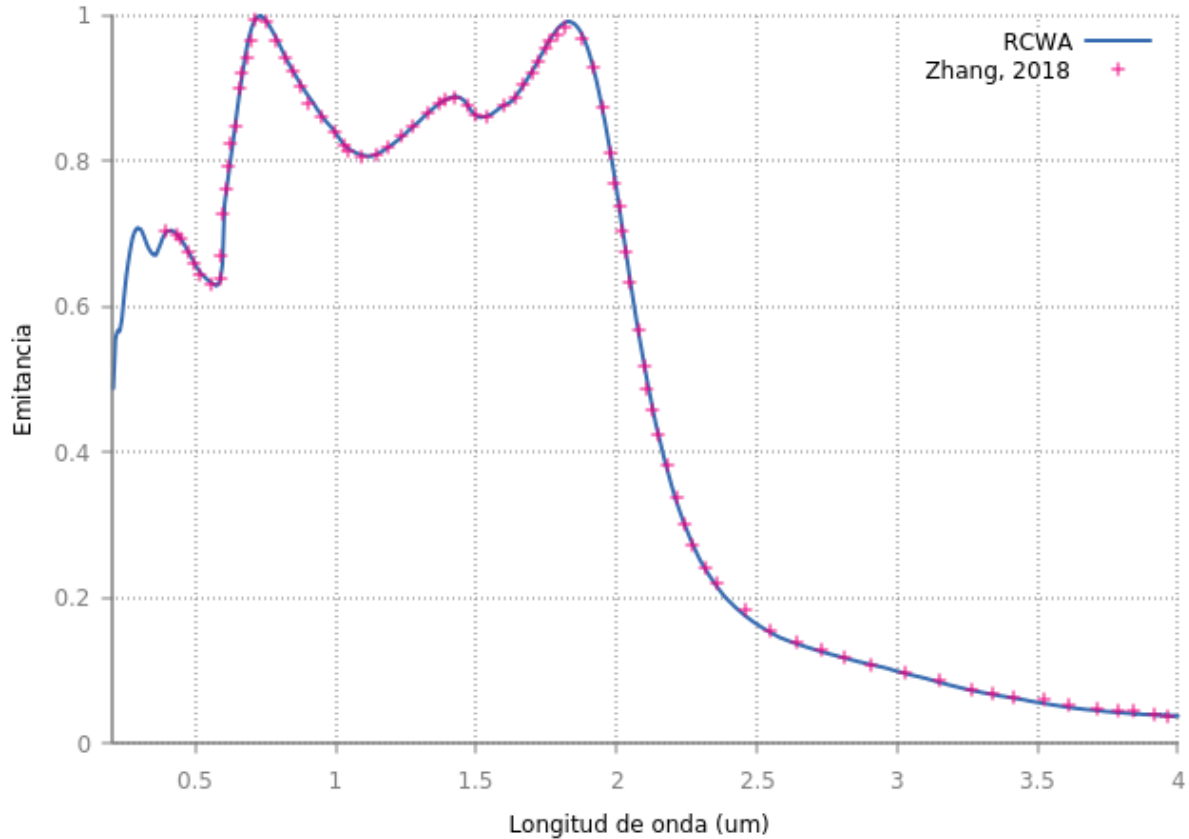


Figura 3-11 Resultados obtenidos de la simulación usando el programa S4 (línea negra), datos obtenidos de la figura 3-10 (línea azul). FUENTE: Elaboración propia.

En el gráfico, las cruces de color magenta corresponden a los resultados extraídos del artículo y la línea azul a los datos obtenidos mediante la simulación. Se puede observar que ambas líneas en la gráfica son prácticamente iguales por lo que se puede inferir que el software es capaz de replicar casos de estudio reales y, por lo tanto, se puede utilizar para diseñar estructuras originales con la certeza de que los resultados obtenidos son acordes a la realidad.

### 3.4. CIRCUITO LC – CÓDIGO MATLAB

Como se mencionó en el capítulo II, el circuito LC sirve para encontrar las longitudes de onda en los que una estructura provoca una resonancia por un polaritón magnético. Las fórmulas utilizadas se obtuvieron principalmente de dos fuentes. La primera es el artículo utilizado como benchmark 2 (Wang & Zhang, 2012) y el segundo el libro “Nano/micro escale heat transfer”

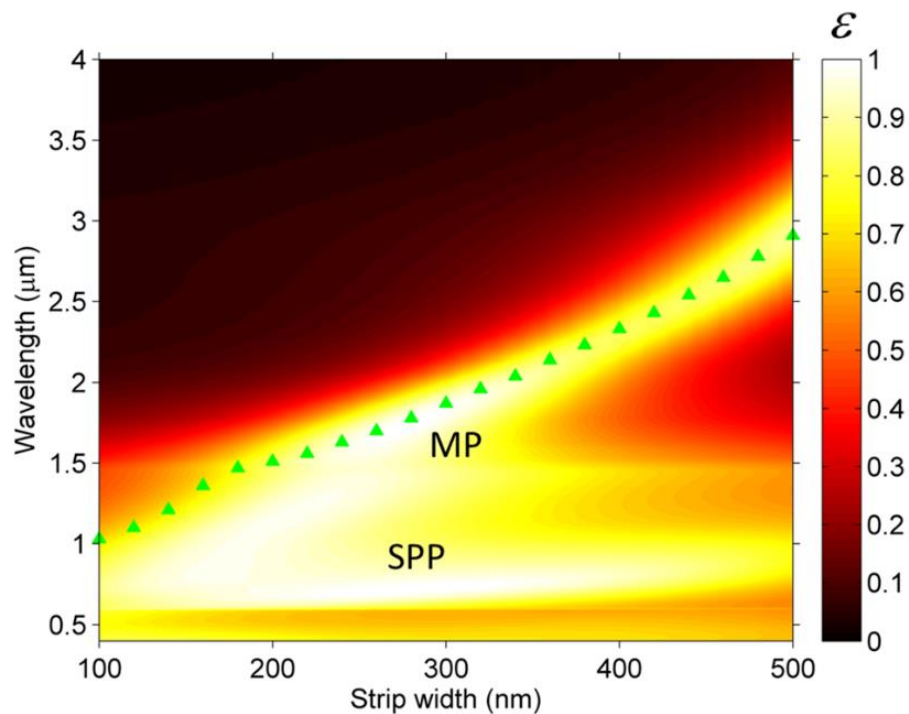


### Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

(Z. M. Zhang, 2020) que entrega una basta explicación con todas las fórmulas y conceptos necesarios para la utilización de este modelo.

Las fórmulas utilizadas se mencionan en el capítulo II, como resumen, las capas de la estructura se simulan usando capacitancias para las capas aislantes e inductancias para las capas metálicas. Todo esto con el objetivo de encontrar la impedancia del circuito. En los puntos en que esta se hace cero es donde ocurren los peaks. En el modelo del circuito LC de paper de Wang (Wang & Zhang, 2012), se calculó la longitud de onda en la que ocurre la resonancia en función del ancho de la tira de la estructura, cuyo resultado muestra que mientras más crece el tamaño de la tira, la longitud de onda a la que ocurre la emitancia cercana a la unidad también aumenta.

La figura se muestra a continuación.



*Figura 3-12: Gráfica de ancho de tira de metal versus longitud de onda y versus emitancia. Mientras más claro es el sector, la emitancia es mayor. En los triángulos verdes se marca el sector donde ocurre la resonancia por polaritones magnéticos. FUENTE: (Wang & Zhang, 2012)*

La línea marcada con los triángulos verdes en la figura 3-12 es la que se buscó replicar con el código, los resultados obtenidos se muestran en la figura 3-13.

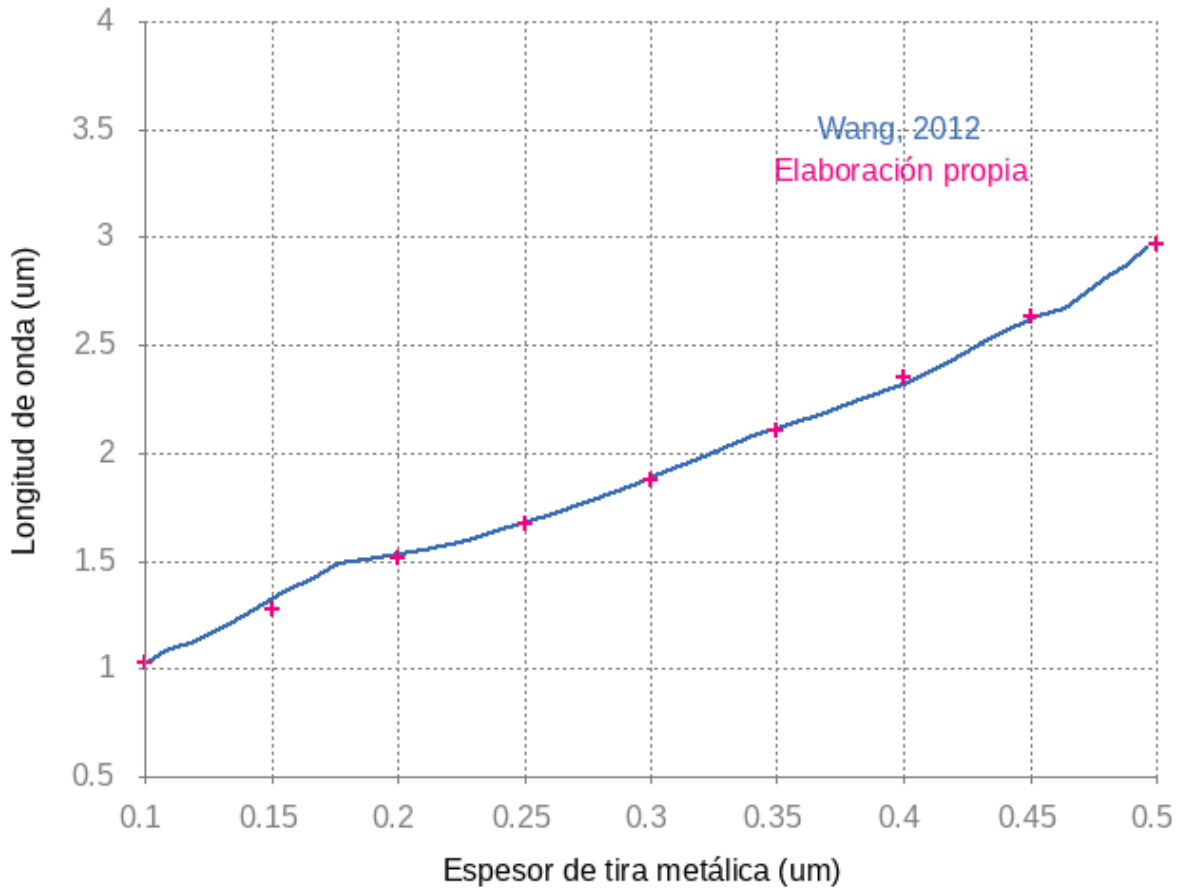


Figura 3-13: Gráfica de ancho de tira de metal versus longitud de onda. La línea azul representa la referencia y los puntos magenta los resultados obtenidos con el código. FUENTE: Elaboración propia.

Se puede notar que el grado de error es bajo por lo que el código sirve para predecir la aparición de resonancias mediante polaritones magnéticos.

### 3.5. POTENCIA ENFRIAMIENTO – MATLAB

Para calcular la potencia de enfriamiento se utiliza un script confeccionado en MATLAB en el que es necesario añadir una serie de datos:

## Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

1. Longitud de onda inicial a analizar.
2. Longitud de onda inicial a analizar.
3. Temperatura ambiente.
4. Coeficiente de convección
5. Irradiancia solar.
6. Absorción de la estructura para distintos ángulos de incidencia solar ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $85^\circ$ ).

Los valores de absorción para distintos ángulos se obtienen del software S4 y con todos estos valores se puede determinar la potencia de enfriamiento producida por la estructura a partir de las ecuaciones mostradas en el capítulo 2.3.4. El resultado se entrega en Watts dividido en metros cuadrados y sirve para realizar una comparación con otros diseños propuestos por distintos investigadores.

### **3.6. ESQUEMA RESUMEN PROCEDIMIENTO**

El flujo de trabajo completo que se necesita para diseñar una estructura se muestra como resumen a continuación.

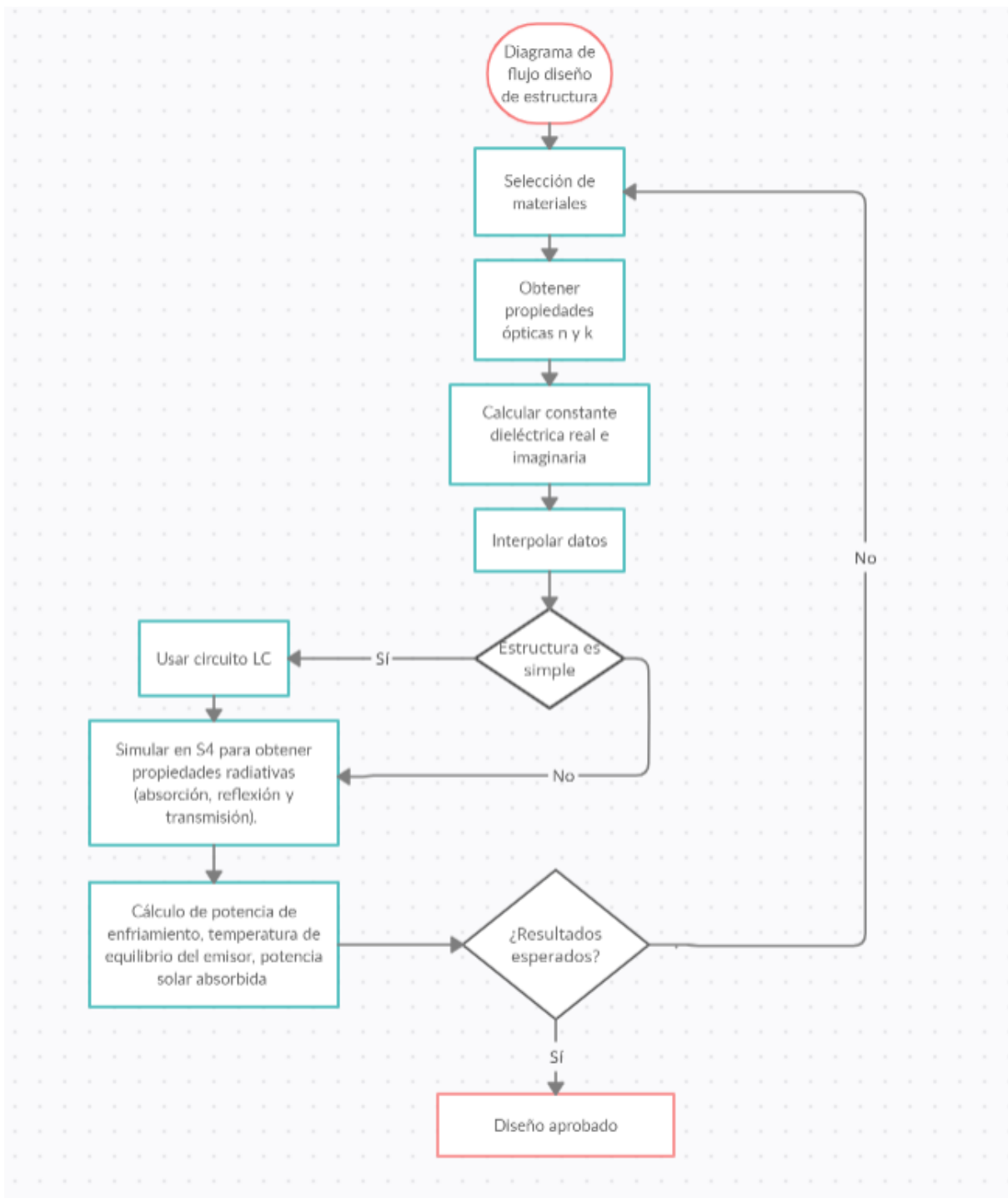


Figura 3-14: Diagrama de flujo simplificado del procedimiento para diseñar una estructura.

FUENTE: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## 4.1. DEFINICIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir del estudio de diversas nanoestructuras. Primero, se describe cada estructura, mencionando los materiales que la componen, la distribución de las capas y dimensiones de estas. Luego, se muestra una gráfica del espectro de emisión para distintos ángulos de incidencia. Finalmente, se muestra la potencia absorbida por la superficie, la potencia que emite el enfriador y la temperatura de equilibrio del enfriador radiativo en la que la ecuación de balance se equilibra.

En total se estudian seis nanoestructuras: la primera corresponde a una nanoestructura similar a la mencionada en el benchmark 2, pero modificando sus dimensiones para optimizarla como enfriador radiativo. La segunda y tercera nanoestructura se modelan a partir del modelo del circuito LC. La cuarta y quinta estructura se obtienen a partir de un artículo en el que se diseñan dos estructuras que producen peaks de absorción en la ventana atmosférica (Cai et al., 2019). La sexta estructura corresponde a un modelo original que posee un grating de aluminio y tres capas de material aislante. Finalmente, se estudia una capa de tungsteno, que no es un enfriador radiativo y se simula su espectro de absorción y potencia de enfriamiento para compararlos con los demás casos.

Como se mencionó en el capítulo 3, las simulaciones en S4 se realizaron desde los 0,2 hasta los 30 $\mu\text{m}$  en intervalos de 0,1 $\mu\text{m}$  y para obtener los valores de la ecuación de balance de energía fue necesario definir la temperatura ambiente y la constante de convección. Los valores elegidos se tomaron desde un artículo de referencia (ZHU et al., 2014) en el que se diseña un enfriador radiativo que logra mantenerse a 5K por debajo de la temperatura ambiente. Este artículo es usado como referencia en el diseño de enfriadores radiativos, por lo que se encontró conveniente utilizar los mismos parámetros. La temperatura ambiente usada es 310K y el coeficiente de convección es 6,9W/m<sup>2</sup>K.

## 4.2. ESTUDIOS DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS

### 4.2.1. PRIMER ESTUDIO

La primera propuesta de estudio corresponde a una estructura con tres capas, usando la distribución MIM (Metal-Aislante-Metal), material superior es tungsteno, el central es dióxido de silicio y el inferior tungsteno.

La idea es usar como base el diseño realizado en el benchmark 2 (Wang & Zhang, 2012). La estructura es idéntica a la figura 3-9, pero se realizaron algunas modificaciones para que el peak producido por el polaritón magnético esté dentro de la ventana atmosférica.

Las dimensiones de la primera estructura propuesta se muestran a continuación:

*Tabla 4.1 Medidas estructura usada como primer estudio. FUENTE: Elaboración propia.*

| <b>Dimensión</b>               | <b>Simbología</b> | <b>Longitud (micrómetros)</b> |
|--------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Periodo                        | $\Lambda$         | 0,6                           |
| Espesor tira metálica superior | h                 | 0,54                          |
| Espesor tira SiO <sub>2</sub>  | d                 | 2                             |
| Factor de llenado              | f                 | 0,9                           |
| Ancho espacio libre (aire)     | w                 | 0,06                          |
| Espesor sustrato               | -                 | 1                             |

Con estos datos se encontró, usando las fórmulas expuestas en el capítulo 2.4.2, que el peak se produce en 11,6 $\mu$ m. Este valor se encuentra en la parte central de la ventana atmosférica (8-13 $\mu$ m).

Posteriormente se utilizó el software S4 para encontrar la absorción de la estructura. Se obtuvieron estos valores para varios ángulos (desde 0° hasta 85° en intervalos de 5°), con el fin de obtener la potencia de enfriamiento al balance de energía (capítulo 2.1.7).

## Capítulo 4. Análisis de resultados

La longitud de onda para la que se calculó va desde los 0,2 micrómetros hasta los 30 $\mu\text{m}$  en intervalos de 0,1 $\mu\text{m}$  y las propiedades ópticas del tungsteno y del dióxido de Silicio se obtuvieron del “Book of optical constants

of solid” (Palik, 1998) y se interpolaron en MATLAB. Las gráficas obtenidas se pueden ver en el anexo 1.

A continuación, se muestra la emitancia producida por la nanoestructura con un ángulo de incidencia igual a 0°, 30° y 60°.

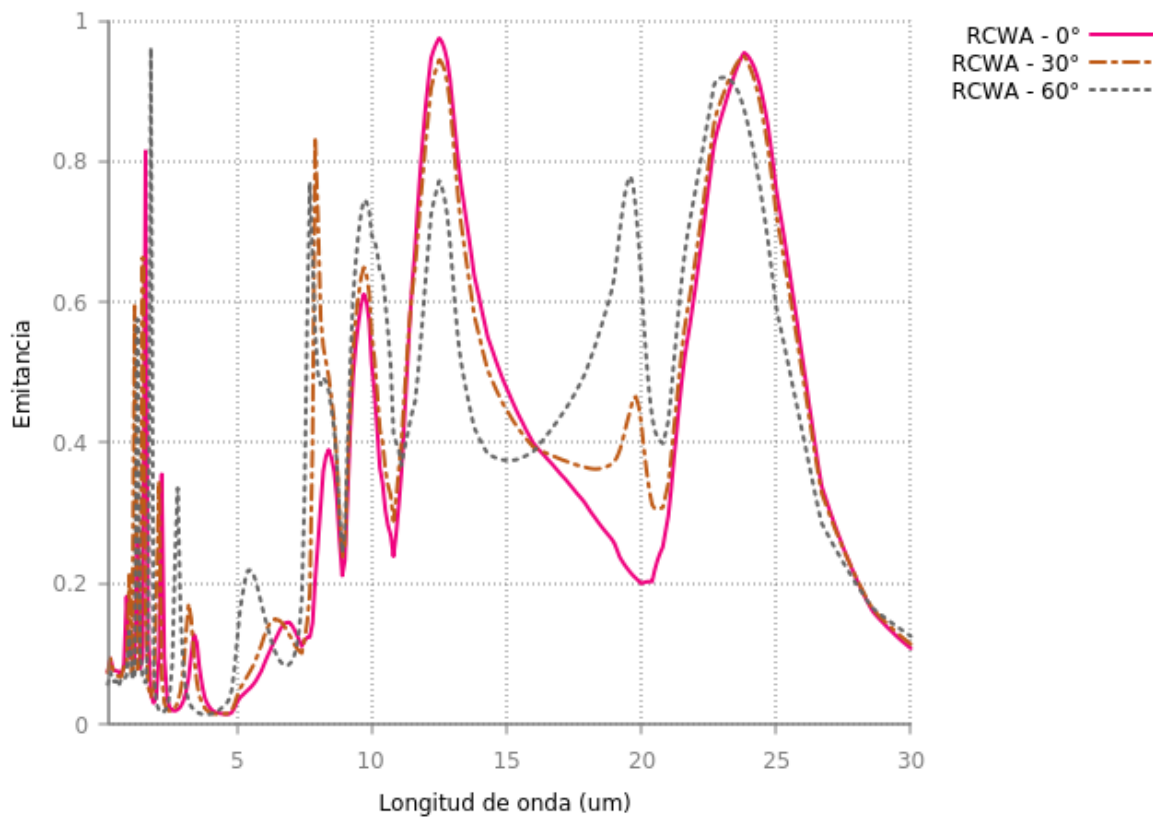


Figura 4-1: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la primera nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos a partir de la utilización del script en MATLAB para resolver el balance de energía son los siguientes:

- La temperatura de equilibrio es 310K



## Capítulo 4. Análisis de resultados

- La potencia solar absorbida por la nanoestructura es 104 (W/m<sup>2</sup>)
- La potencia de enfriamiento producida por la nanoestructura es 210 (W/m<sup>2</sup>)

### 4.2.2. SEGUNDO ESTUDIO

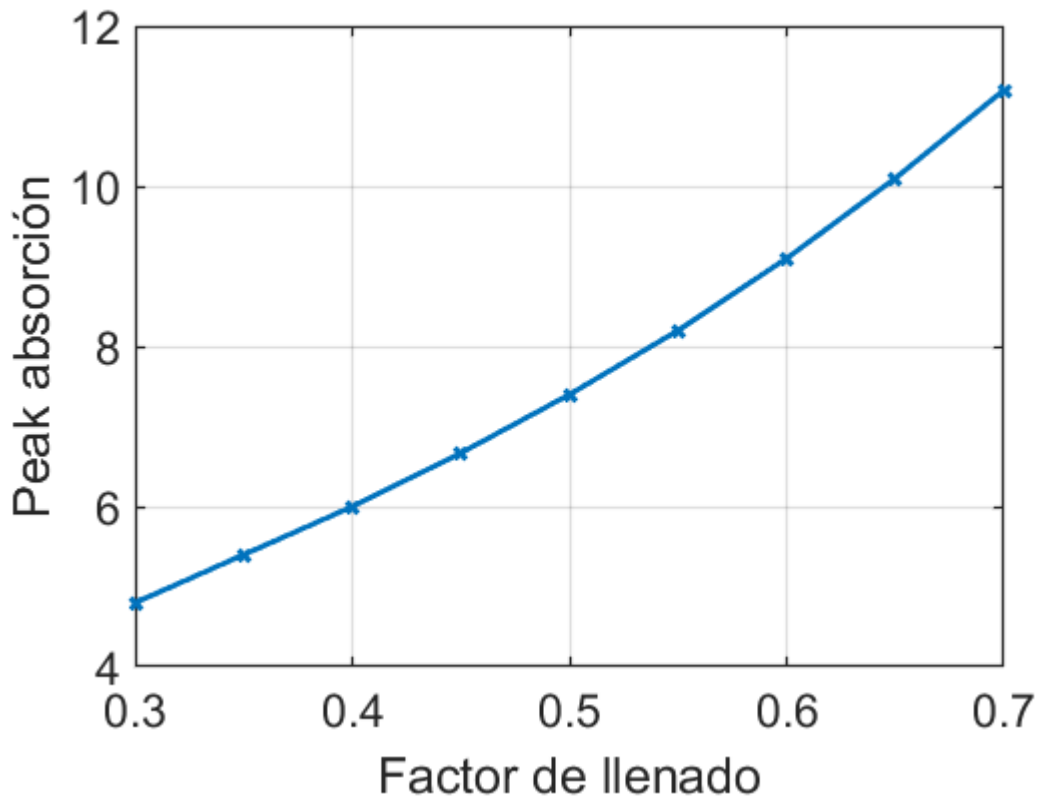
La segunda propuesta busca encontrar la influencia del factor de llenado en el peak de absorción (para visualizar si aumenta o disminuye la longitud de onda a la que ocurre).

En la tabla 4.2 se mencionan las dimensiones iniciales para estudiar la influencia del factor de llenado en el peak de absorción.

*Tabla 4.2 Medidas iniciales de nanoestructura usada para estudio a partir del espesor factor de llenado. FUENTE: Elaboración propia.*

| <b>Dimensión</b>               | <b>Simbología</b> | <b>Longitud (μm)</b>  |
|--------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Periodo                        | $\Lambda$         | 2                     |
| Espesor tira metálica superior | h                 | Variable para estudio |
| Espesor tira SiO <sub>2</sub>  | d                 | 1,5                   |
| Factor de llenado              | f                 | Variable para estudio |
| Ancho espacio libre (aire)     | w                 | Variable para estudio |
| Espesor sustrato               | -                 | 1                     |

Con los datos iniciales se utilizaron distintos factores de llenado (desde 0,3 a 0,7 en intervalos de 0,05). Y en cada uno se calculó el peak de absorción producido por un polaritón magnético a partir del circuito LC. La grafica obtenida a partir del modelo LC se muestra a continuación.



*Figura 4-2: Gráfico de factor de llenado versus peak de absorción en la nanoestructura a partir del modelo del circuito LC. FUENTE: Elaboración propia.*

Se puede apreciar la influencia del factor de llenado, cuando este aumenta, el peak de absorción ocurre a una longitud de onda mayor. A partir de los resultados obtenidos para distintos factores de llenado se encuentra que con un factor de llenado igual a 0,7 la absorción ocurre dentro de la ventana atmosférica. Por lo tanto, se utiliza este valor para realizar la simulación en el software S4 y además el cálculo de la potencia de enfriamiento producida.

Las dimensiones finales son:

Capítulo 4. Análisis de resultados

Tabla 4.3 Medidas finales de la estructura usada como segundo diseño. FUENTE: Elaboración propia.

| Dimensión                      | Simbología | Longitud ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------------------------|------------|----------------------------|
| Periodo                        | $\Lambda$  | 2                          |
| Espesor tira metálica superior | h          | 1,4                        |
| Espesor tira SiO <sub>2</sub>  | d          | 1,5                        |
| Factor de llenado              | f          | 0,7                        |
| Ancho espacio libre (aire)     | w          | 0,6                        |
| Espesor sustrato               | -          | 1                          |

A continuación, se muestra la emitancia producida por la nanoestructura con un ángulo de incidencia igual a 0°, 30° y 60°.

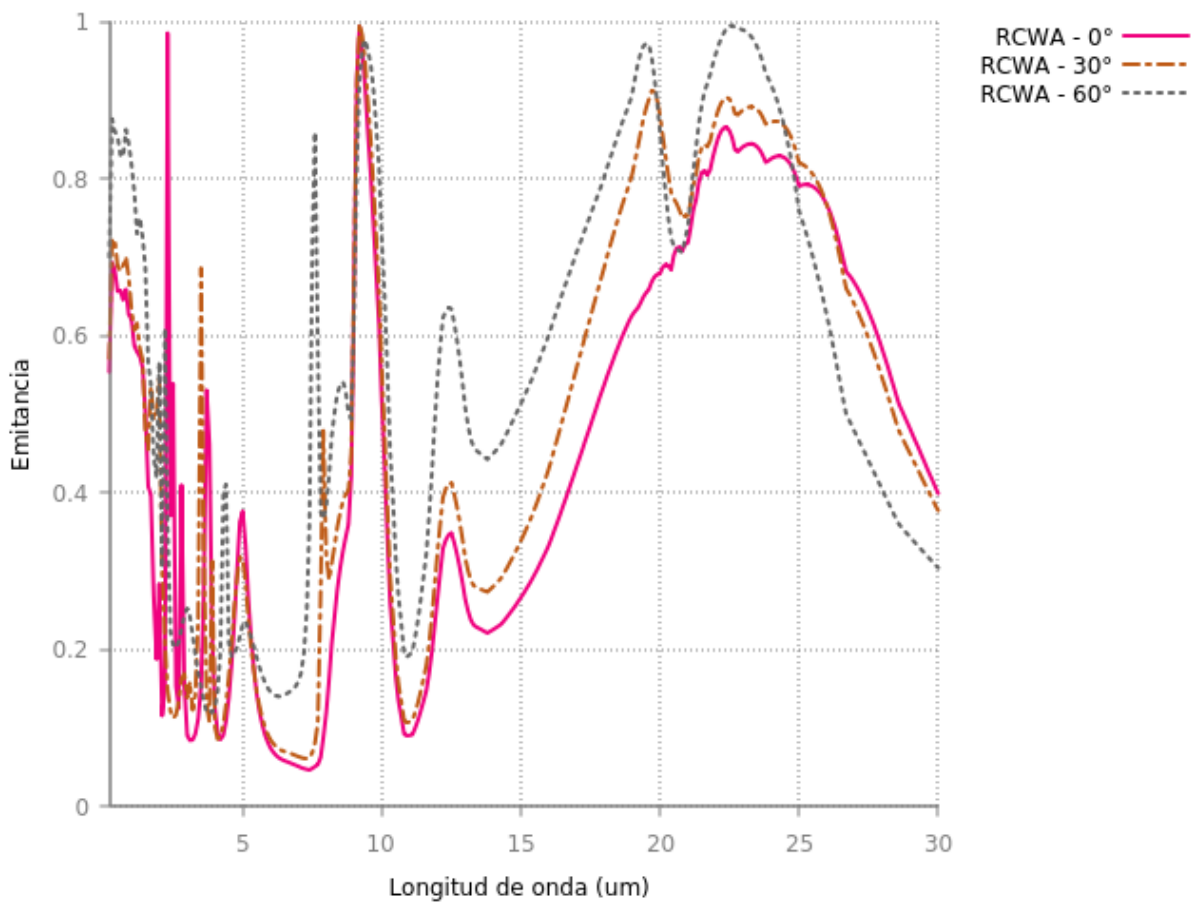


Figura 4-3: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la segunda nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.

## Capítulo 4. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos a partir de la utilización del script en MATLAB para resolver el balance de energía son los siguientes:

- La temperatura de equilibrio es 355K
- La potencia solar absorbida por la nanoestructura es 371 (W/m<sup>2</sup>)
- La potencia de enfriamiento producida por la nanoestructura es 551 (W/m<sup>2</sup>)

### 4.2.3. TERCER ESTUDIO

En la sección anterior se visualizó la influencia del factor de llenado. Ahora se mostrará la influencia del espesor del material dieléctrico en el peak de absorción.

Para realizar esto se tomaron longitudes de la estructura inicial basados en estudios ya realizados (Cai et al., 2019; Wang & Zhang, 2012; Z. Zhang et al., 2018). En ellos las capas de la estructura no sobrepasan los 200 nanómetros.

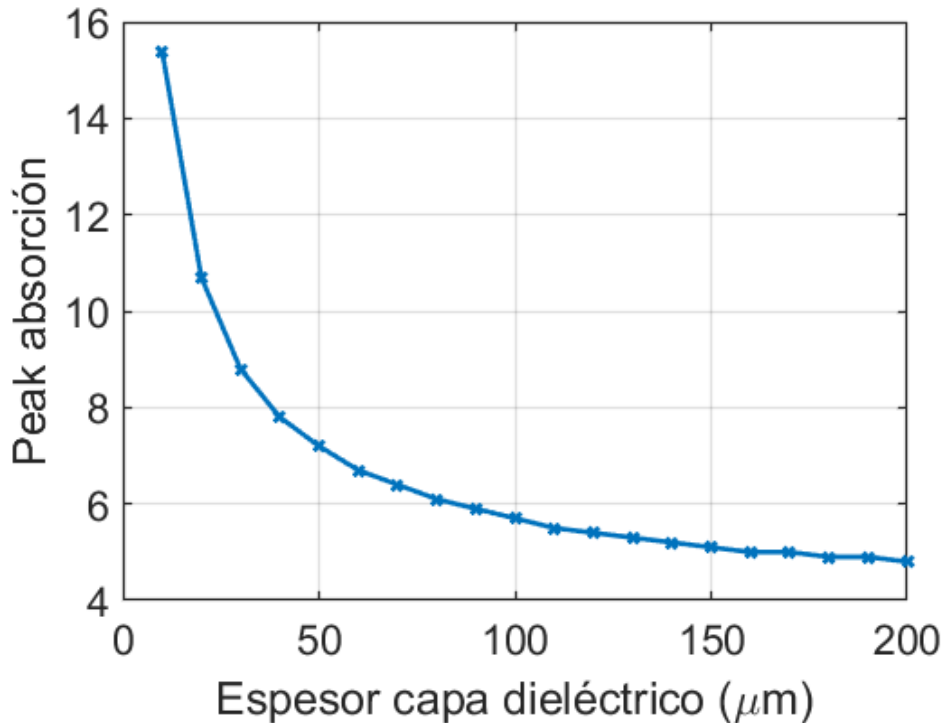
Para realizar el tercer caso de estudio se establecieron las siguientes dimensiones iniciales.

*Tabla 4.4 Medidas iniciales de la nanoestructura usada para estudio a partir del espesor de la tira del dieléctrico. FUENTE: Elaboración propia.*

| <b>Dimensión</b>               | <b>Simbología</b> | <b>Longitud (micrómetros)</b>          |
|--------------------------------|-------------------|--|
| Periodo                        | $\Lambda$         | 2                                      |
| Espesor tira metálica superior | h                 | 0,1                                    |
| Espesor tira SiO <sub>2</sub>  | d                 | Variable para estudio de convergencia. |
| Factor de llenado              | f                 | 0,85                                   |
| Ancho espacio libre (aire)     | w                 | 0,3                                    |
| Espesor sustrato               | -                 | 1                                      |

## Capítulo 4. Análisis de resultados

El espesor del material dieléctrico (SiO<sub>2</sub>) varió desde los 10 hasta los 200nm y el cálculo del peak ocurrido, usando el modelo del circuito LC, se muestra en la siguiente gráfica.



*Figura 4-4: Gráfico espesor de la capa del material dieléctrico (SiO<sub>2</sub>) versus peak de absorción en la nanoestructura a partir del modelo del circuito LC. FUENTE: Elaboración propia.*

Como se puede apreciar en la gráfica, mientras disminuye el espesor de dieléctrico aumenta la longitud de onda a la que ocurre el peak de absorción, esto es expuesto en la literatura (Cai et al., 2019; Wang & Zhang, 2012). A partir de la gráfica se puede encontrar que con un espesor de 20 nanómetros el peak de absorción ocurre dentro de la ventana atmosférica. Por lo tanto, se utilizará este valor para su cálculo de propiedades ópticas en el software S4 y el cálculo de potencia de enfriamiento.

Las longitudes finales que se utilizarán para los cálculos son:

Tabla 4.5 Medidas finales de la estructura usada como tercer diseño. FUENTE: Elaboración propia.

| Dimensión                      | Simbología | Longitud (micrómetros) |
|--------------------------------|------------|------------------------|
| Periodo                        | $\Lambda$  | 2                      |
| Espesor tira metálica superior | h          | 1,7                    |
| Espesor tira SiO <sub>2</sub>  | d          | 0,02                   |
| Factor de llenado              | f          | 0,85                   |
| Ancho espacio libre (aire)     | w          | 0,3                    |
| Espesor sustrato               | -          | 1                      |

A continuación, se muestra la emitancia producida por la nanoestructura con un ángulo de incidencia igual a 0°, 30° y 60°.

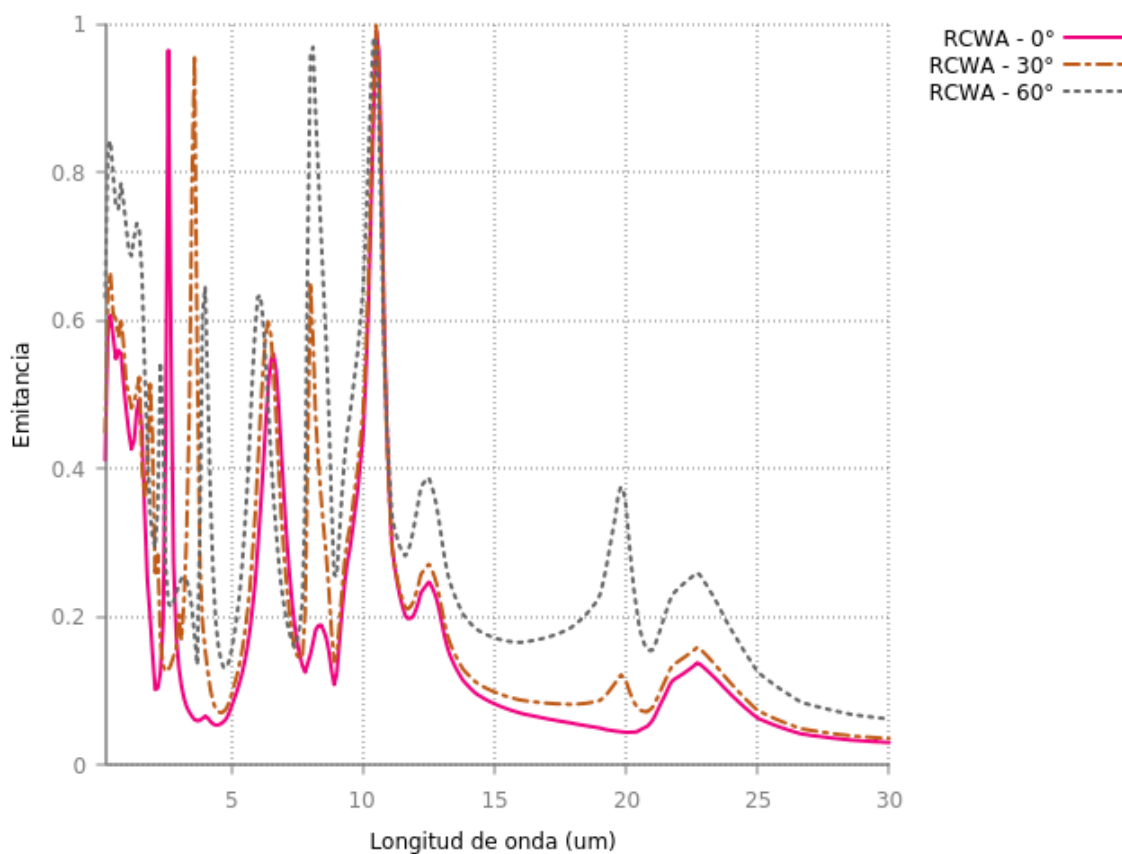


Figura 4-5: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la tercera nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.

## Capítulo 4. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos a partir de la utilización del script en MATLAB para resolver el balance de energía son los siguientes:

- La temperatura de equilibrio es 351K
- La potencia solar absorbida por la nanoestructura es 459 (W/m<sup>2</sup>)
- La potencia de enfriamiento producida por la nanoestructura es 239 (W/m<sup>2</sup>)

### 4.3.4. CUARTO ESTUDIO

Para el cuarto caso de estudio se utilizó un artículo de referencia (Cai et al., 2019) en el que se diseñan dos nanoestructuras que producen peaks de absorción en la ventana atmosférica. La estructura simulada en este caso contiene un grating superior de aluminio luego dos capas aislantes, la primera de telurio de zinc (ZnTe) y la segunda de carburo de silicio (SiC). Se utilizan dos capas aislantes para producir dos peaks de absorción.

Las dimensiones utilizadas se muestran en la tabla 4-6.

*Tabla 4.6 Medidas nanoestructura articulo Cai, 2009 usada como cuarto estudio. FUENTE: Elaboración propia.*

| <b>Dimensión</b>               | <b>Simbología</b> | <b>Longitud (μm)</b> |
|--------------------------------|-------------------|----------------------|
| Periodo                        | $\Lambda$         | 2                    |
| Espesor tira metálica superior | h                 | 1,7                  |
| Espesor tira ZnTe              | d                 | 0,11                 |
| Espesor tira SiC               | t                 | 0.01                 |
| Factor de llenado              | f                 | 0,85                 |
| Ancho espacio libre (aire)     | w                 | 0,3                  |
| Espesor sustrato               | -                 | 1                    |

Con las dimensiones mencionadas se obtuvo el espectro de emitancia en el programa S4 con distintos ángulos de incidencia.

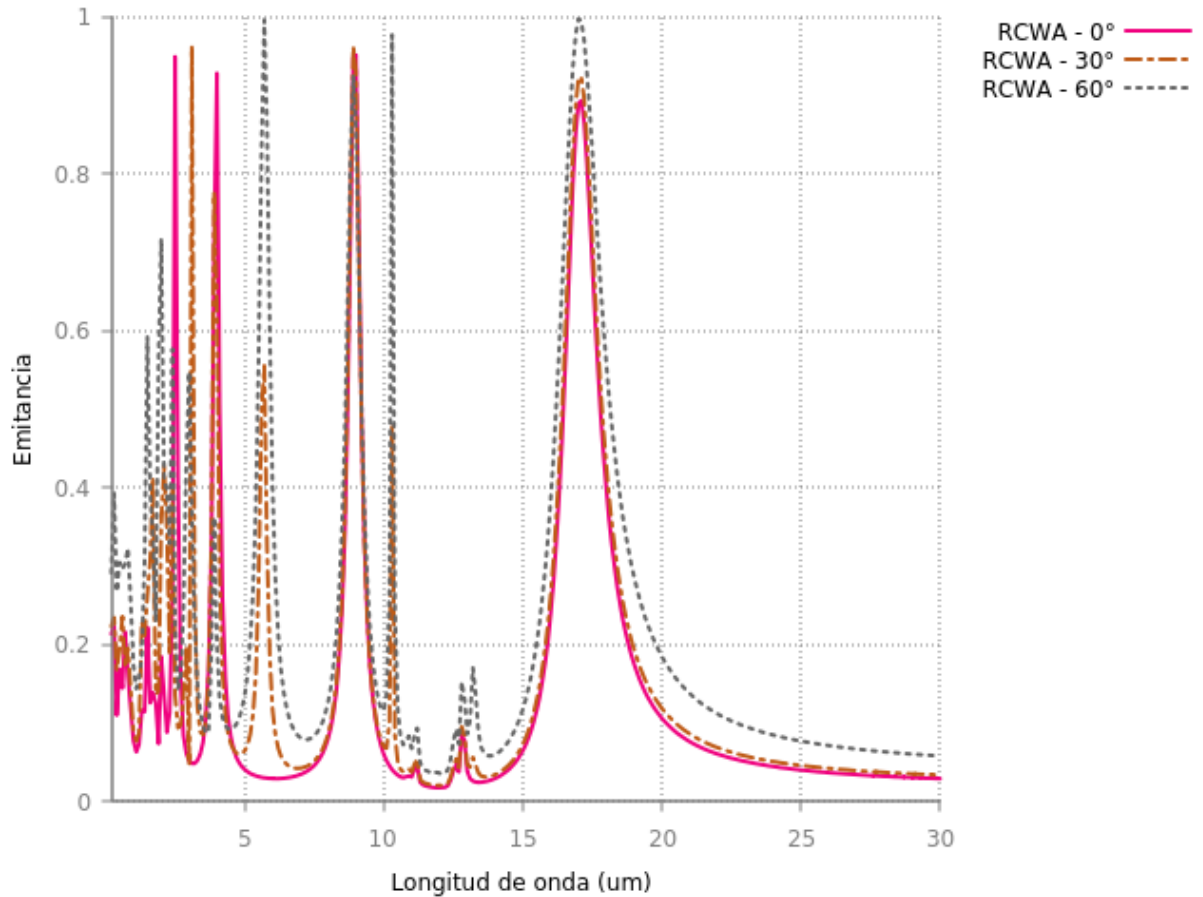


Figura 4-6: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la cuarta nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos a partir de la utilización del script en MATLAB para resolver el balance de energía son los siguientes:

- La temperatura de equilibrio es 321K
- La potencia solar absorbida por la nanoestructura es 129 (W/m<sup>2</sup>)
- La potencia de enfriamiento producida por la nanoestructura es 111 (W/m<sup>2</sup>)

#### 4.3.5. QUINTO ESTUDIO

Al igual que en el anterior estudio se obtuvo el diseño de un artículo (Cai et al., 2019). En esta nanoestructura se produce un único peak de absorción en la ventana atmosférica. Su estructura



## Capítulo 4. Análisis de resultados

es un grating de aluminio, luego una capa de telurio de zinc y finalmente el sustrato de aluminio, como se puede apreciar en la figura 4-7.

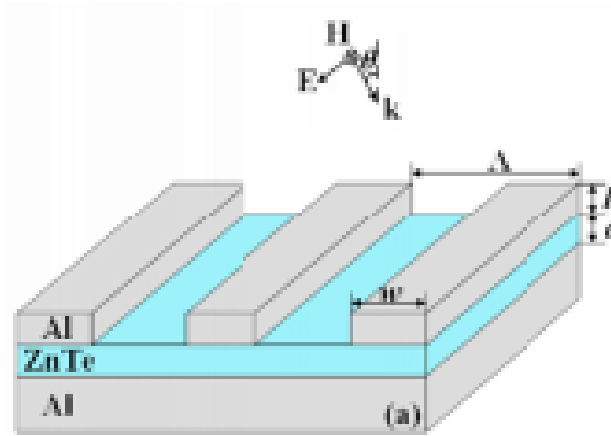


Figura 4-7: Estructura usada en el caso de estudio. FUENTE:(Cai et al., 2019)

Las dimensiones se muestran en la tabla de tabla 4-7:

Tabla 4.7 Medidas estructura articulo Cai, 2009 usado como quinto estudio. FUENTE:  
Elaboración propia.

| Dimensión                      | Simbología | Longitud (micrómetros) |
|--------------------------------|------------|------------------------|
| Periodo                        | $\Lambda$  | 2                      |
| Espesor tira metálica superior | $h$        | 1,7                    |
| Espesor tira ZnTe              | $d$        | 0,11                   |
| Factor de llenado              | $f$        | 0,85                   |
| Ancho espacio libre (aire)     | $w$        | 0,3                    |
| Espesor sustrato               | -          | 1                      |

A continuación, se muestra la emitancia producida por la nanoestructura con un ángulo de incidencia igual a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $60^\circ$ .

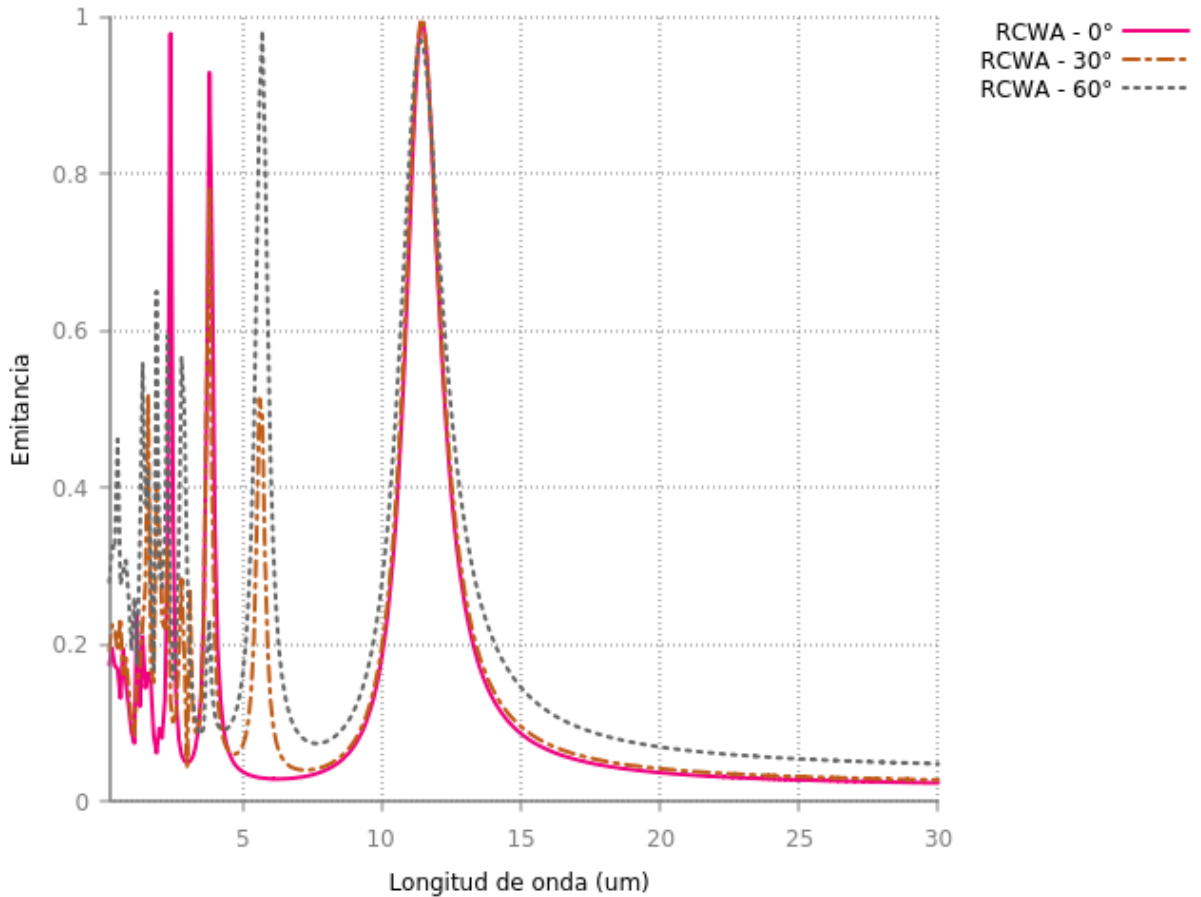


Figura 4-8: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la quinta nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos a partir de la utilización del script en MATLAB para resolver el balance de energía son los siguientes:

- La temperatura de equilibrio es 321K
- La potencia solar absorbida por la nanoestructura es 140 (W/m<sup>2</sup>)
- La potencia de enfriamiento producida por la nanoestructura es 117 (W/m<sup>2</sup>)

#### 4.3.6. SEXTO ESTUDIO

La sexta nanoestructura estudiada corresponde se compone de un grating de aluminio, luego tres capas de aislante SiO<sub>2</sub>/SiC/SiO<sub>2</sub> y finalmente el sustrato de aluminio. Se optó por usar varias capas de aislante para lograr una absorción mayor en la ventana atmosférica, ya que la

## Capítulo 4. Análisis de resultados

interacción entre las distintas capas produce peaks. Las dimensiones de la nanoestructura se muestran en la tabla 4-8. Hay dos capas de dióxido de silicio, pero estas tienen espesores distintos. Esto se hace para que el peak de absorción no ocurra en la misma longitud de onda y de esta forma optimizar la nanoestructura para producir una potencia de enfriamiento mayor.

*Tabla 4.8 Medidas finales de la estructura usada como sexto diseño. FUENTE: Elaboración propia.*

| <b>Dimensión</b>                  | <b>Simbología</b> | <b>Longitud (micrómetros)</b> |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Periodo                           | $\Lambda$         | 7                             |
| Espesor tira metálica superior Al | H                 | 4,725                         |
| Espesor tira SiO <sub>2</sub>     | d <sub>1</sub>    | 0,2                           |
| Espesor tira SiC                  | T                 | 0,25                          |
| Espesor tira SiO <sub>2</sub>     | d <sub>2</sub>    | 0,3                           |
| Factor de llenado                 | F                 | 0,675                         |
| Ancho espacio libre (aire)        | W                 | 1,275                         |
| Espesor sustrato                  | -                 | 1                             |

A continuación, se muestra la emitancia producida por la nanoestructura con un ángulo de incidencia igual a 0°, 30° y 60°.

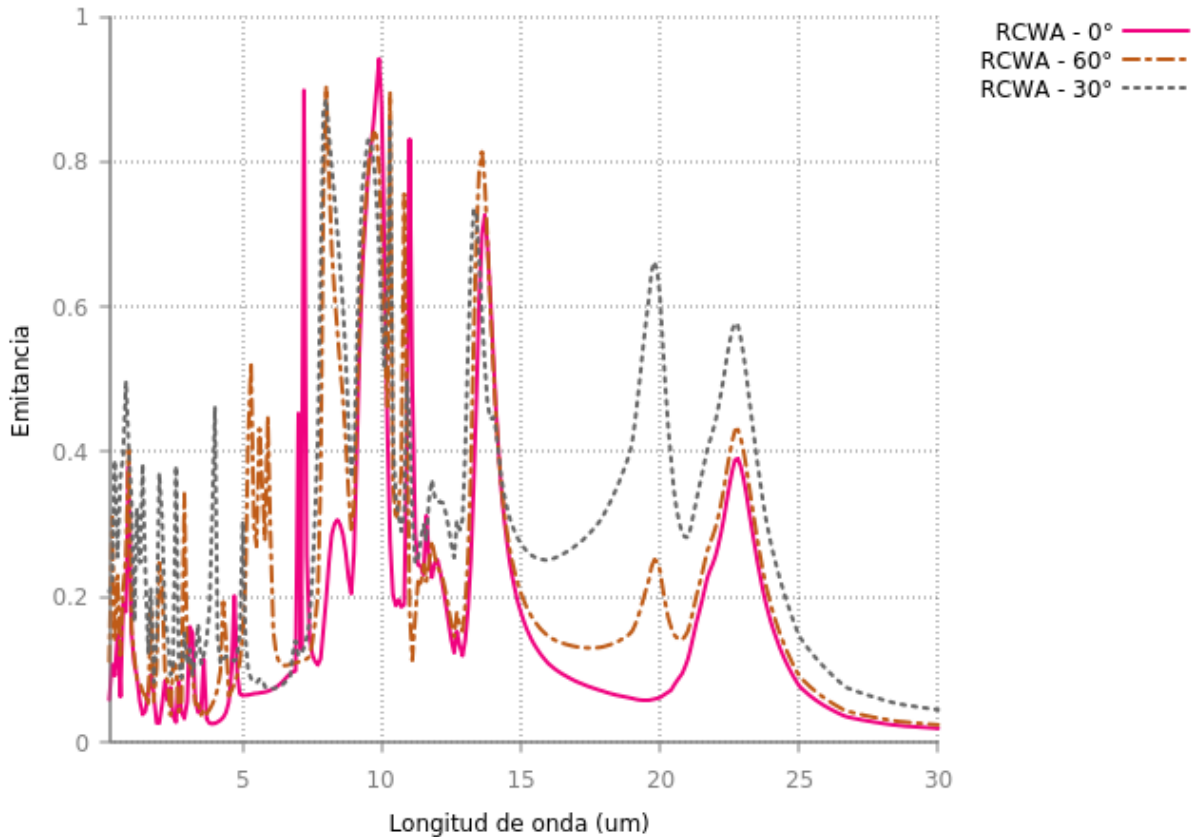


Figura 4-9: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para la sexta nanoestructura estudiada. FUENTE: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos a partir de la utilización del script en MATLAB para resolver el balance de energía son los siguientes:

- La temperatura de equilibrio es 315K
- La potencia solar absorbida por la nanoestructura es  $125 \text{ (W/m}^2\text{)}$
- La potencia de enfriamiento producida por la nanoestructura es  $166 \text{ (W/m}^2\text{)}$

#### 4.2.7. SÉPTIMO ESTUDIO

Corresponde al estudio de una capa de tungsteno de  $100\mu\text{m}$ . El objetivo de analizar una capa de un material es poder compararla con las nanoestructuras mencionadas anteriormente y

## Capítulo 4. Análisis de resultados

ejemplificar el efecto que tiene una nanoestructura usada como enfriador radiativo. El espectro de emisión de la capa de tungsteno se muestra a continuación:

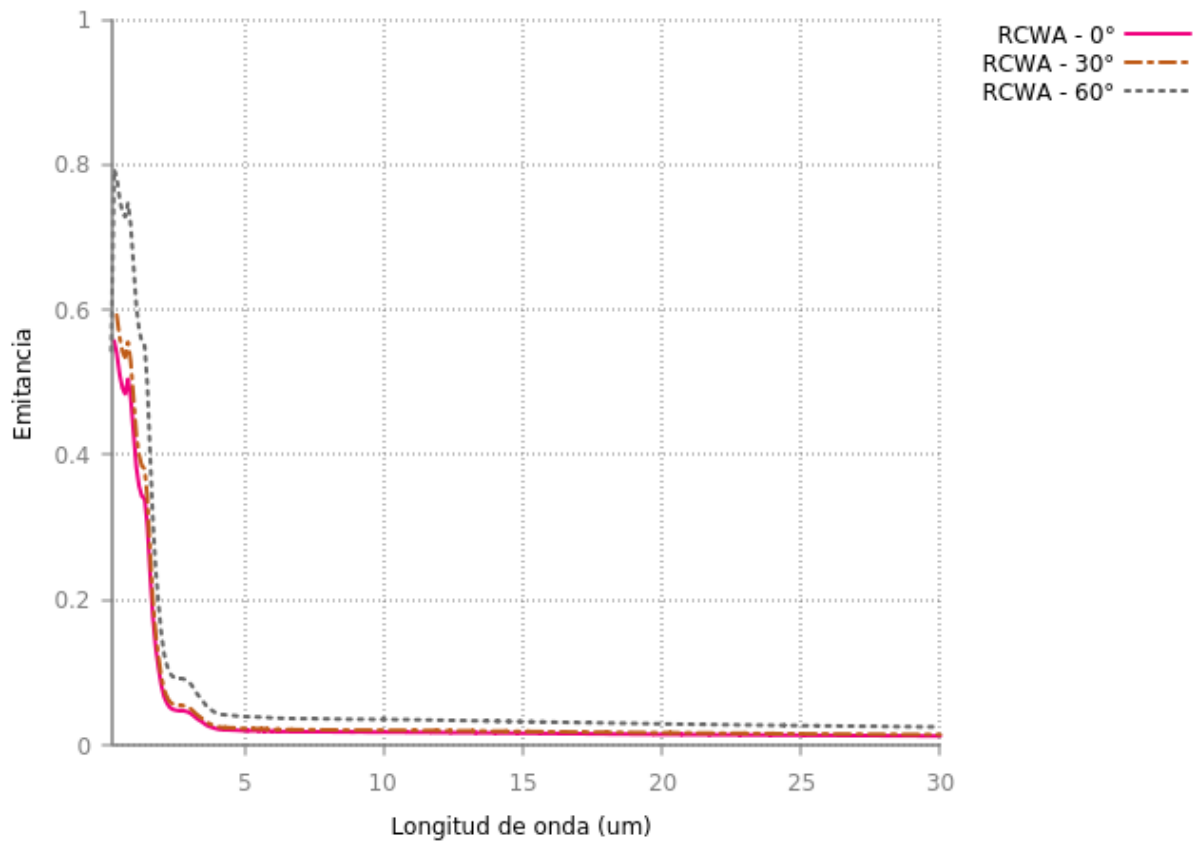


Figura 4-10: Espectro de emisión/absorción con distintos ángulos de incidencia para una capa de tungsteno, usada como séptimo caso de estudio. FUENTE: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos a partir de la utilización del script en MATLAB para resolver el balance de energía son los siguientes:

- La temperatura de equilibrio es 365K
- La potencia solar absorbida por la nanoestructura es 396(W/m<sup>2</sup>)
- La potencia de enfriamiento producida por la nanoestructura es 29 (W/m<sup>2</sup>)

### 4.3. TABLA RESUMEN

A continuación, se presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos en las distintas nanoestructuras. De esta forma se pueden comparar de mejor manera para realizar los análisis.

*Tabla 4.9 Tabla resumen de los resultados obtenidos en todas las pruebas. FUENTE:  
Elaboración propia.*

| <b>Caso de estudio</b> | <b>Composición</b>                                       | <b>Potencia solar absorbida (W/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Potencia enfriamiento del emisor (W/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Temperatura equilibrio emisor (K)</b> |
|------------------------|--|---|---|--|
| <b>Primero</b>         | Estructura W/SiO <sub>2</sub> /W                         | 104,25  | 210,61  | 310                                      |
| <b>Segundo</b>         | Estructura W/SiO <sub>2</sub> /W                         | 551,51  | 371,67  | 355                                      |
| <b>Tercero</b>         | Estructura W/SiO <sub>2</sub> /W                         | 459,98  | 239,99  | 351                                      |
| <b>Cuarto</b>          | Estructura Al/ZnTe/SiC/Al                                | 140,45  | 117,04  | 319                                      |
| <b>Quinto</b>          | Estructura Al/ZnTe/Al                                    | 129,97  | 111,69  | 321                                      |
| <b>Sexto</b>           | Estructura Al/SiO <sub>2</sub> /SiC/SiO <sub>2</sub> /Al | 125,87  | 166,34  | 315                                      |
| <b>Séptimo</b>         | Estructura W   | 396,62  | 29,03   | 365                                      |

### 4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se analizan los resultados obtenidos a lo largo de toda la investigación, considerando los ocho casos de estudio. Primero se aborda el análisis de los espectros de emisión encontrados en cada estructura estudiada, los peaks de emitancia que se hallaron y la influencia de estos en el enfriamiento radiativo. Luego se analiza el uso del circuito LC para lograr simular estructuras en la que se encuentren peaks de absorción en la ventana atmosférica, el circuito LC se utilizó para estudiar la segunda y tercera estructura. Posteriormente se analiza la potencia de enfriamiento de las distintas estructuras, también la temperatura de equilibrio del emisor y la factibilidad de elegir una por sobre otra estructura. Finalmente, se comparan los resultados de los estudios con la última estructura simulada (capa de tungsteno), para reflejar la influencia de un enfriador radiativo en una superficie.

## Capítulo 4. Análisis de resultados

La figura 4-11 muestra el espectro que debería tener un enfriador radiativo ideal (línea roja), debe poder absorber la mayor cantidad de energía en la ventana atmosférica y lo menos posible fuera de esta.

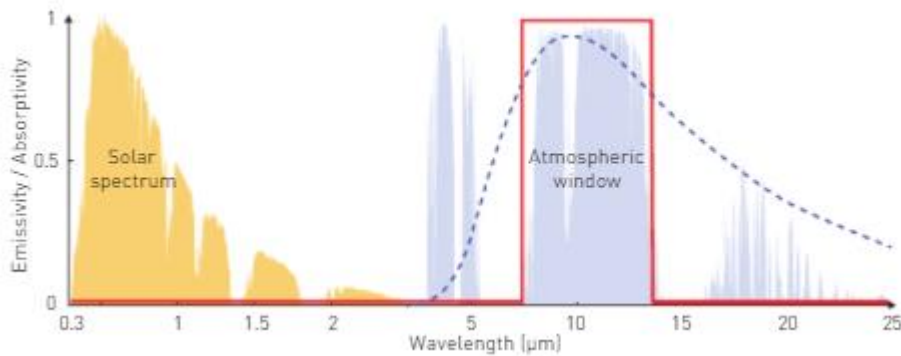


Figura 4-11: Espectro solar (amarillo), ventana atmosférica (azul), espectro emisión cuerpo negro a 300K (línea puntuada), emisión ideal de un enfriador radiativo (línea roja). FUENTE:(Li & Fan, 2019)

### 4.4.1. ESPECTRO DE EMISIÓN

En el capítulo 4.3 se mostraron ocho estructuras y en cada una se muestra una figura en la que se visualiza la emisión producida desde 0,2 hasta 30μm. Además, se muestran tres líneas que permiten visualizar la emisión en distintos ángulos de incidencia (0°, 30° y 60°).

En la primera estructura se observan dos grandes peaks de absorción, uno entre los 11 y 15 μm y otro entre 21 y 26 μm. El primer peak abarca un gran rango de la ventana atmosférica lo que conlleva a que la estructura sea, tentativamente, apta para ser un enfriador radiativo. El segundo peak está fuera de la ventana atmosférica, pero en ese rango de longitud de onda la energía del espectro solar no es gravitante, distinto sería el caso que existiese un peak de absorción a longitudes de onda bajas, en este caso la energía absorbida por la estructura sería considerablemente mayor, considerando la energía de la radiación en el ultravioleta. La temperatura de equilibrio del emisor es de 310K siendo la más baja encontrada entre todos los

## Capítulo 4. Análisis de resultados

casos estudiados e iguala a la temperatura ambiente, es decir, puede mantener la temperatura ambiente de una superficie mientras se encuentra bajo la radiación solar.

La segunda estructura, cuyas dimensiones se encontraron a partir del circuito LC también muestra un peak de absorción en la ventana atmosférica, pero en este caso la absorción es alta a longitudes de onda baja por lo que no es un buen candidato a ser un enfriador radiativo, esto se ve reflejado en la temperatura de equilibrio del emisor que asciende a 355K. En este caso se ve reflejado que, aunque exista una alta emitancia en la ventana atmosférica no es sinónimo de ser un buen enfriador radiativo, ya que se debe analizar el comportamiento de la estructura en todo el espectro solar.

La tercera estructura, cuyas dimensiones se encontraron a partir de circuito LC, variando el espesor del material dieléctrico, al igual que en los anteriores casos muestra un peak de emitancia en la ventana atmosférica, pero también presenta una alta emisión entre 0,2 y 2 $\mu\text{m}$ , un peak a los 2,5 $\mu\text{m}$  y una alta emisión entre 6 y 7 $\mu\text{m}$  lo que, al igual que la segunda estructura, hace que no sea un buen candidato para ser un enfriador radiativo. La temperatura del emisor es 351K y la potencia absorbida es 459,98W/m<sup>2</sup> y la potencia de enfriamiento es 239 W/m<sup>2</sup>.

La cuarta y quinta estructura, cuyas dimensiones y materiales se tomaron desde un artículo (Cai et al., 2019) en el que se proponen dos diseños que tienen peaks de absorción en la ventana atmosférica, a priori, se pueden considerar llamativos para ser enfriadores radiativos ya que cumplen con el requisito de tener una alta emitancia entre 8 y 13  $\mu\text{m}$ .

Al analizar el espectro de emisión de la cuarta estructura sucede lo mismo que en los casos anteriores, existen zonas de alta emitancia fuera de la ventana atmosférica, aunque la temperatura de equilibrio del emisor es menor que en el segundo y tercer modelo estudiado, alcanzando los 319K.

Al analizar el espectro de emisión de la quinta estructura se encuentra que además del peak en la ventana atmosférica también posee zonas de alta absorción fuera de esta. La temperatura de equilibrio del emisor es de 321K siendo mucho mayor que la primera estructura estudiada, esto



## Capítulo 4. Análisis de resultados

nos muestra que se debe analizar todo el espectro de emisión para generar un juicio sobre un posible candidato para diseñar un enfriador radiativo, al igual como ocurrió con las estructuras que se optimizaron a partir del código LC.

El análisis de estas últimas dos estructuras sirve para no dejarse llevar con la gran cantidad de artículos científicos en los que se muestran figuras con peaks de absorción en la ventana atmosférica, en la mayoría de estos casos se analiza la absorción en un rango de longitudes de onda específico (generalmente de 8 a 15 $\mu\text{m}$ ), lo que aleja la perspectiva si se quiere utilizar alguna de esas propuestas como enfriador radiativo.

La sexta estructura que corresponde a un grating de aluminio con tres capas de materiales aislante, mostró ser el segundo mejor enfriador radiativo entre los casos estudiados. La temperatura de equilibrio del emisor es de 315K, siendo solo 5K por sobre la temperatura ambiente impuesta. Los espesores de las distintas capas se eligieron a partir una gran cantidad de pruebas en las que se buscó optimizar las dimensiones. Al ser tantas variables las que se pueden modificar (periodo, longitud del grating, espesores de las distintas capas), no se asegura que la estructura estudiada sea la mejor, lo que deja abierta una posible indagación más exhaustiva en la estructura para optimizarla como enfriador radiativo.

La séptima y última estructura estudiada, que corresponde a una capa de tungsteno muestra que la temperatura de equilibrio del emisor es de 365K, siendo la más alta de todas. El propósito de estudiar una capa metálica es compararla con una estructura que sí funciona como un enfriador radiativo. Todas las otras estructuras, mostraron mejores resultados, aunque algunas no estaban optimizadas para ser enfriadores radiativos.

Al comparar la primera estructura cuya composición es tungsteno/dióxido de silicio/tungsteno y cuya temperatura de equilibrio es 310K con la octava, que corresponde solo a una capa de tungsteno y con una temperatura de equilibrio es 365K, queda en evidencia la gran influencia de la nanoestructura. Esta absorbe menos luz solar que la capa de tungsteno y, además, emite radiación hacia el espacio. Esto ejemplifica que la utilización de una nanoestructura es viable y que las aplicaciones dependen de la optimización de las dimensiones, y de las capas utilizadas.

Se estudiaron distintas nanoestructuras, usando tungsteno y aluminio como capa metálica y dióxido de silicio, telurio de zinc y carburo de silicio como aislante. No se encontró un material ideal para ser utilizado, ya que se obtuvieron nanoestructuras que pueden ser usadas como enfriadores con distintos materiales. Esto nuevamente evidencia que la importancia radica en la distribución de los materiales; no existe una receta ideal, ya que cada estructura produce un espectro de emisión distinto.

### **4.4.2. CIRCUITO LC**

La segunda y tercera estructura, como se mencionó anteriormente, se diseñaron a partir del modelo del circuito LC que permite encontrar el peaks de absorción producidos por polaritones magnéticos. Al comparar estas nanoestructuras con las demás se puede evidenciar que no son las mejores. Como se indica en la literatura (Wang & Zhang, 2012) este método no muestra peaks de absorción producidos por otros tipos de resonancia (plasmon-polariton, Fabri Perot, etc.), por lo que su uso no asegura que la nanoestructura sirva como enfriador radiativo. Lo que se puede destacar es que sirve para agilizar el proceso de diseño, ya que permite probar combinaciones de distintas dimensiones sin tener que simular la estructura. Es un buen método para empezar a probar nanoestructuras.

### **4.4.3. POTENCIA DE ENFRIAMIENTO**

La capa de tungsteno (séptimo caso de estudio) posee una potencia solar absorbida igual a  $396(\text{W}/\text{m}^2)$  y la potencia de enfriamiento del emisor es solo  $29,03(\text{W}/\text{m}^2)$ . La gran mayoría de la energía disipada se debe a la convección ocurrida entre la superficie y el ambiente. Ya que la temperatura de equilibrio ocurre a los 365K, existiendo una diferencia de 55K con la temperatura ambiente. Claramente este material por sí solo no se puede utilizar como enfriador.

Si se compara con el primer caso de estudio (estructura W/SiO<sub>2</sub>/W), cuya potencia solar absorbida es  $104(\text{W}/\text{m}^2)$ , y la potencia de enfriamiento es  $210(\text{W}/\text{m}^2)$ , en este caso la temperatura de equilibrio ocurre justo a la temperatura ambiente y la potencia debido a que la convección es cero. La nanoestructura se muestra como una mejora sustancial para mantener la temperatura de una superficie.

## Capítulo 4. Análisis de resultados

En las estructuras que fueron diseñadas a partir del circuito LC se aprecia que la potencia solar absorbida es considerablemente mayor ( $551\text{W/m}^2$  la segunda estructura y  $459\text{W/m}^2$  la tercera) lo que es provocado por la alta absorción a longitudes de onda bajas. Aunque sea una estructura que, visualizando su emitancia en la ventana atmosférica, es capaz de enfriar radiativamente no es lo suficiente para compensar la radiación absorbida.

En la cuarta y quinta estructura, simuladas a partir de un artículo, se encontró que la potencia solar absorbida es baja ( $140\text{W/m}^2$  la cuarta estructura y  $125\text{W/m}^2$  la tercera) y la potencia de enfriamiento es parecida ( $120\text{ W/m}^2$  aproximadamente), esto refleja la baja temperatura de equilibrio (alrededor de  $10\text{K}$  por sobre la temperatura ambiente). Con estos resultados no se puede afirmar que sirven como enfriadores radiativos ya que se requiere que por lo bajo mantengan la temperatura ambiente, pero definitivamente ambas estructuras se pueden optimizar para disminuir la absorción a bajas longitudes de onda.

La séptima estructura posee una potencia de absorción igual a  $125\text{W/m}^2$  y una potencia de enfriamiento igual a  $165\text{ W/m}^2$ . La temperatura de equilibrio es  $5\text{K}$  por sobre la temperatura ambiente establecida y de igual forma, la nanoestructura, puede ser optimizada como enfriador. En este caso se manejan más variables (dimensiones de cada capa de aislante, dimensión capa metálica, dimensión del grating y periodo) por lo que es un reto optimizarla.

### **4.4.4. RESUMEN HALLAZGOS**

A partir del análisis realizado se muestran una tabla resumen con los principales hallazgos.

Tabla 4.10 Resumen con los resultados y análisis obtenidos. FUENTE. Elaboración propia.

| Tema                     | Hallazgos   |
|--------------------------|---|
| Espectro de emitancia    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Para distinguir a simple vista una estructura que es un buen enfriador radiativo se debe considerar que posea una baja absorción en longitudes de onda baja, una alta absorción dentro de la ventana atmosférica, todo esto con distintos ángulos de incidencia.</li> </ul>  |
| Circuito LC              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite encontrar peaks de absorción producidos.</li> <li>- Es una herramienta útil para diseñar nanoestructuras, ya que se puede simular rápidamente sin la necesidad de obtener el espectro de emisión completo.</li> <li>- Solo muestra peaks de absorción producidos por polaritones magnéticos. Deja fuera información relevante sobre otros modos de resonancia que pueden producir peaks fuera de la ventana atmosférica.</li> <li>- No muestra la emisión fuera de la ventana atmosférica por lo que siempre es necesario simular la estructura para obtener el espectro en un rango mayor (hasta 30<math>\mu</math>m aproximadamente).</li> </ul> |
| Potencia de enfriamiento | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Las distintas nanoestructuras producen distintas potencias de enfriamiento y de absorción solar a partir de la configuración de materiales utilizados y dimensiones.</li> <li>- La optimización en las dimensiones juega un rol fundamental.</li> <li>- Al comparar las distintas nanoestructuras con la capa metálica de tungsteno se ejemplifica que sirven como enfriadores, disminuyendo la temperatura de una superficie sin gastar energía.</li> </ul>   |

## CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado se lograron cumplir los objetivos propuestos al inicio de la investigación. En un principio fue necesario adquirir nuevos conocimientos, principalmente en lo que se refiere a radiación. Lo abarcado a lo largo de las distintas asignaturas de la rama térmica de la carrera sirvió para encausar y acelerar el entendimiento de conceptos. Para entender como la interacción entre la energía proveniente del sol con la materia y como el uso de distintos materiales permite enfriar superficies, fue necesario comprender una serie de artículos científicos, ya que el enfriamiento radiativo es un tema relativamente nuevo y sus aplicaciones aun no son delimitadas. Además, para poder replicar la información obtenida y lograr resultados propios se tuvo que usar softwares hasta ahora desconocidos totalmente como S4, Gnuplot o parcialmente como Matlab. Pero, después de validar resultados se pudo empezar con la prueba exhaustiva de diseños originales o propuestas realizadas por otros investigadores.

El primer objetivo que se propuso fue el estudio del enfriamiento radiativo. Se pudo lograr, entendiendo los conceptos básicos, desde qué es la radiación, pasando por las propiedades radiativas (reflexión, transmisión, absorción), radiación térmica, el espectro solar, que permitió visualizar la ventana atmosférica que se encuentra entre 8 y 13 $\mu\text{m}$ . Con todo esto el enfriamiento radiativo tomó sentido, ya que en un principio es ilógico enfriar una superficie mientras se encuentra bajo el sol. En especial el uso de resonancias producidas por polaritones magnéticos permitió comprender, aunque no exhaustivamente, que la combinación de distintos materiales permite encontrar absorciones altas. Al comprender todo lo anterior se pudo seguir con la investigación, ya que el uso de programas computacionales y la lectura de artículos científicos para validar los resultados que se iban obteniendo tiene un respaldo teórico. Además, permitió analizar de mejor manera las gráficas de los resultados obtenidos y seleccionar los materiales y modelos que se usaron como referencia.

El segundo objetivo, que abarca el estudio y comprensión de programas computacionales, fue necesario establecerlo debido a que fue necesario escribir los códigos para solucionar y simular las estructuras simuladas, es decir, se debió estudiar la documentación del software que permitió obtener las propiedades radiativas, S4. Primero se probó con simulaciones de ejemplo entregadas por el autor y posteriormente se validaron modelos simples. Además, se requería la

## Conclusiones

interpolación de datos para generar la entrada de datos al software S4, de esta forma se optó por usar Matlab ya que la programación es más intuitiva. Finalmente, los resultados obtenidos en S4 corresponden solo a datos, generalmente en un archivo de texto. Para poder visualizar los resultados y mostrar la información que se encontraba con el grado de detalle necesario se usaron scripts en Gnuplot que permitían graficar el archivo de texto y modificar todos los parámetros deseados. Por otro lado, los datos obtenidos en S4 se utilizaban en Matlab para calcular la potencia de enfriamiento producida por la estructura, por lo que fue necesario comprender el uso de distintas plataformas.

El tercer objetivo hace referencia al cálculo de la constante dieléctrica, para lograrlo, en un principio se buscaron en distintas fuentes las propiedades ópticas de los materiales que se iban a utilizar, pero al realizar las primeras simulaciones se encontró que no siempre se podían validar los modelos de referencia. Esto se debía a que las fuentes de información no eran confiables, lo que conllevó una búsqueda exhaustiva de distintas fuentes y un filtro para seleccionar las más utilizadas y validadas. El cumplimiento de este objetivo se ve reflejado, primero, en el anexo 1, en el que se encuentran las gráficas con las constantes calculadas y después en los benchmark mostrados en el capítulo 3, ya que, en el caso de no ser correctas las propiedades, no sería posible obtener resultados iguales a los usados como referencia.

El cuarto objetivo corresponde a validar modelos existentes, el cumplimiento se muestra en el capítulo 3 ya que se explica y muestran a través de gráficas la simulación realizada para replicar dos artículos científicos. Los resultados obtenidos son prácticamente iguales a los referenciados. A lo largo de la investigación se validaron más modelos, esto permitió validar los códigos realizados y permitir estudiar estructuras de las que no se tiene referencia, ya que se establecieron por el uso del circuito LC o por la iteración en el uso las distintas dimensiones en una estructura.

El quinto y último objetivo es el estudio de nanoestructuras que permitan el enfriamiento radiativo, el logro de este se muestra en el capítulo 4, en el que se estudian seis nanoestructuras usadas como enfriadores radiativos y una capa metálica. El cumplimiento de los objetivos anteriores permitió, primero, la obtención del conocimiento necesario para entender lo que posteriormente se simuló con los distintos programas y luego al seleccionar y analizar cual

## Conclusiones

estructura actúa mejor como enfriador radiativo. A partir de los casos de estudio realizados, la primera mostró ser la mejor, ya que su temperatura de equilibrio igualaba la temperatura ambiente aun cuando la estructura se encuentra bajo la incidencia de la radiación solar.

La investigación realizada puede servir como punto de partida para posteriores investigaciones, ya que se tienen los códigos para probar distintas estructuras y las propiedades para probar algunos materiales.

Como mejora de investigación o ampliación de esta se puede encontrar lo siguiente: El enfriador radiativo se estudió solo para su uso en una superficie tipo. En la actualidad su uso más prometedor es en celdas fotovoltaicas, ya que, pudiendo combinar las capas que permiten la conversión de energía solar en eléctrica con las capas que permiten enfriar, se elimina el problema del sobrecalentamiento del panel de forma gratuita y sin calentar el entorno ya que se libera al espacio. En el anexo 2 se encuentra información para iniciar la investigación de celdas fotovoltaicas y generar una posible aplicación. Otra mejora es el uso de estructuras 2D, en los casos estudiados solo se alteraban los espesores de las capas y las dimensiones del grating superficial, pero existen varias propuestas de modelos 2D en las que varía la composición del grating superior, generalmente se utilizan estructuras paralelepípedos en la superficie y con ciertos patrones, esto se hace para abarcar una absorción mayor en la ventana atmosférica al combinar de mejor manera el uso de distintos materiales y dimensiones. Relacionado con lo anterior, el uso de más materiales amplía las estructuras que se pueden proponer, para los casos analizados se utilizó un total de cinco materiales, ya que se pudo validar su uso con los benchmarks realizados, pero si se incluyeran más materiales, la posibilidad de combinar y proponer diseños es más amplia. Finalmente, como mejora a corto plazo se puede buscar la optimización de los modelos estudiados en la presente investigación para lograr enfriar superficies bajo la temperatura ambiente propuesta.

Las limitaciones encontradas a lo largo de la investigación principalmente se deben al uso de propiedades ópticas confiables, aunque un material sea atractivo y se tengan buenas referencias sobre su uso en enfriadores radiativos, no se puede simular su uso sin tener la certeza de que las propiedades reflejan el comportamiento del material. La búsqueda de las propiedades  $n$  y  $k$  implicó una gran cantidad de tiempo y además descartar posibles líneas de investigación, como

## Conclusiones

el uso de perovskitas, al no tener fuentes confiables, o que las propiedades ópticas, que dependen de la longitud de onda, no se encontraran en el rango que se deseaba.

Considerando todo lo anterior se puede establecer que el uso de materiales y la correcta combinación de estos permite lograr algo que a simple lógica no es posible, enfriar una superficie mientras se encuentra bajo la luz solar. Las aplicaciones aún no se delimitan y el estudio más exhaustivo de los materiales y su interacción pueden permitir su uso en distintas partes, como enfriador de viviendas, en accesorios para el ser humano, ya que se puede enfriar cualquier superficie sin la necesidad de gastar energía. El estudio de este tema permite abrir la concepción a nuevas formas de energías renovables que aún no se han explotado en su totalidad.



## REFERENCIAS

- Cai, Y., Huang, Y., Zhu, K., & Wu, H. (2019). Direction-independent dual-band perfect absorption induced by fundamental magnetic polaritons. *Optics Express*, 27(20), A1431. <https://doi.org/10.1364/oe.27.0a1431>
- Catalanotti, S., Cuomo, V., Piro, G., Ruggi, D., Silvestrini, V., & Troise, G. (1975). The radiative cooling of selective surfaces. *Solar Energy*, 17(2), 83–89. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90062-6)
- Cengel, Y. (2011). Transferencia de Calor y Masa. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (4ta edicio, Vol. 1, Issue 9). Mc-GrawHill. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Fleish, D. (2008). *A Student's Guide to Maxwell's Equations* (First Edit). Cambridge University Press.
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2019). *Properties of Sunlight*. Photovoltaics Education Website. [www.pveducation.org](http://www.pveducation.org)
- Incropera, F., & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (4ta edicio). Prentice Hall.
- Jošt, M., Lipovšek, B., Glažar, B., Al-Ashouri, A., Brecl, K., Matič, G., Magomedov, A., Getautis, V., Topič, M., & Albrecht, S. (2020). Perovskite Solar Cells go Outdoors: Field Testing and Temperature Effects on Energy Yield. *Advanced Energy Materials*, 10(25). <https://doi.org/10.1002/aenm.202000454>
- Kreith, F., Bohn, M. S., & Manglik, R. (2012). *Principios de Transferencia de Calor*. CENGAGE LEARNING.
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100(20), 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>
- Liu, V., & Fan, S. (2012). S 4: A free electromagnetic solver for layered periodic structures. *Computer Physics Communications*, 183(10), 2233–2244. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.04.026>
- Löper, P., Stuckelberger, M., Niesen, B., Werner, J., Filipič, M., Moon, S. J., Yum, J. H., Topič, M., De Wolf, S., & Ballif, C. (2015). Complex refractive index spectra of

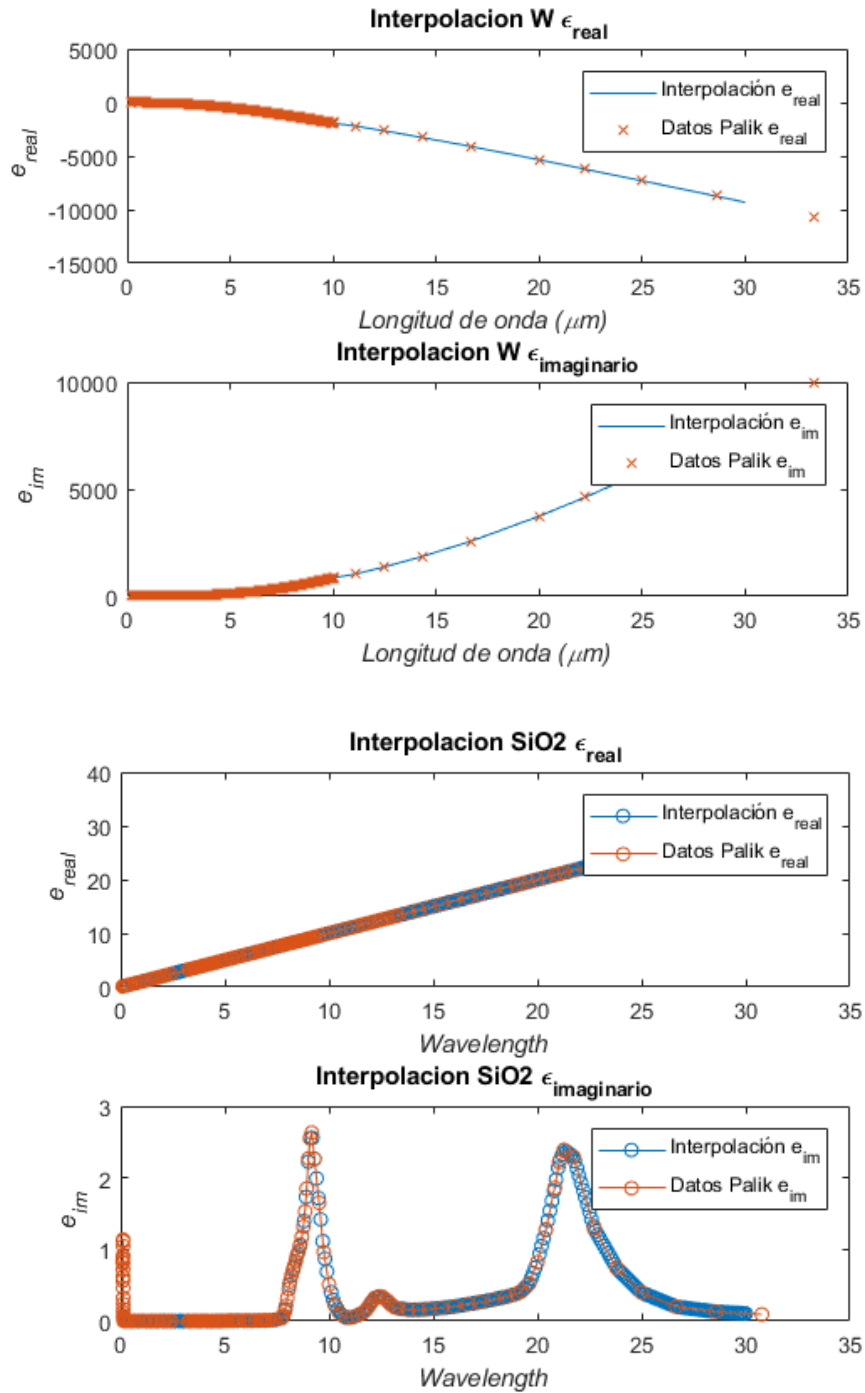
## Referencias

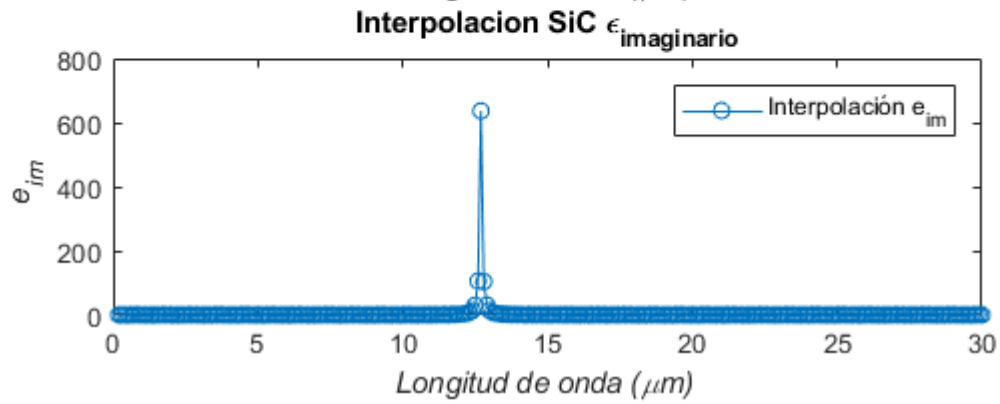
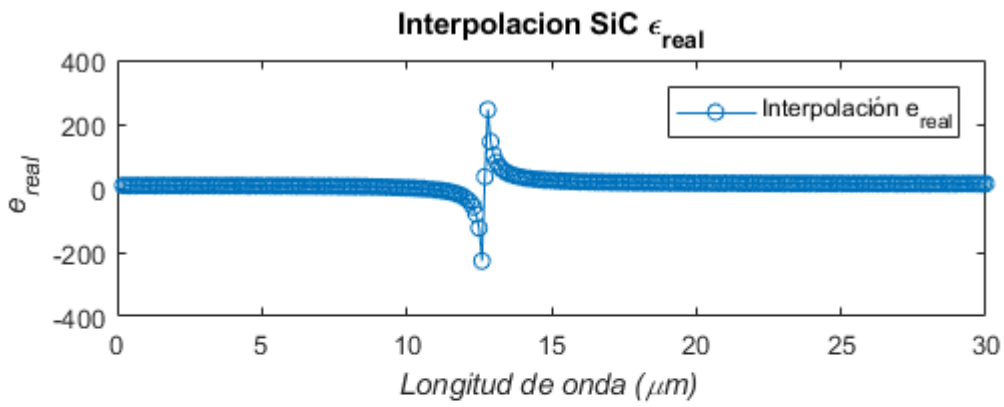
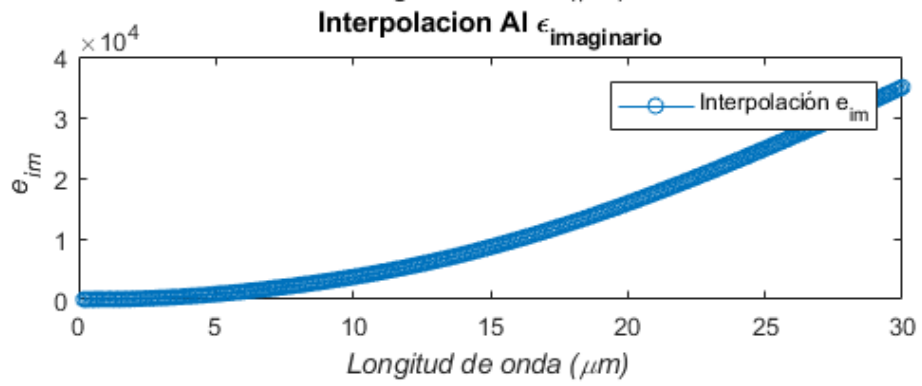
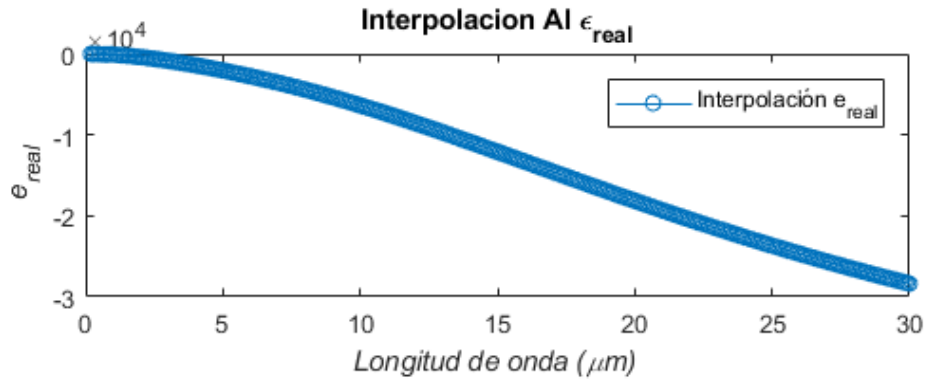
- CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite thin films determined by spectroscopic ellipsometry and spectrophotometry. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 6(1), 66–71.  
<https://doi.org/10.1021/jz502471h>
- Mesquita, I., Andrade, L., & Mendes, A. (2019). Temperature Impact on Perovskite Solar Cells Under Operation. *ChemSusChem*, 12(10), 2186–2194.  
<https://doi.org/10.1002/cssc.201802899>
- Modest, M. (2003). *Radiative Heat Transfer* (Second Ed). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-503163-9.X5000-0>
- Palik, E. D. (1998). book of Optical Constants of Solids Edited by. *Science And Technology*, 3062.
- Planck, M. (1901). Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen Der Physik*, 309(3), 553–563. <https://doi.org/10.1002/andp.19013090310>
- Raman, A. P., Anoma, M. A., Zhu, L., Rephaeli, E., & Fan, S. (2014). Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature*, 515(7528), 540–544. <https://doi.org/10.1038/nature13883>
- Robles, C., & Rodriguez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*, 39, 10.  
<https://www.revistaespacios.com/a18v39n32/a18v39n32p22.pdf>
- Serway, R., & Jewett, J. (2016). *Electricidad Y Magnetismo* (9Ed ed.). CENGAGE LEARNING.
- Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510–519.  
<https://doi.org/10.1063/1.1736034>
- Wang, L. P., & Zhang, Z. M. (2012). Wavelength-selective and diffuse emitter enhanced by magnetic polaritons for thermophotovoltaics. *Applied Physics Letters*, 100(6), 2012–2015. <https://doi.org/10.1063/1.3684874>
- Wenham, S. (2013). Applied Photovoltaics. In *Applied Photovoltaics* (Second Edi).  
<https://doi.org/10.4324/9781849776981>
- Yan, J., & Saunders, B. R. (2014). Third-generation solar cells: A review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells. *RSC Advances*, 4(82), 43286–43314. <https://doi.org/10.1039/c4ra07064j>

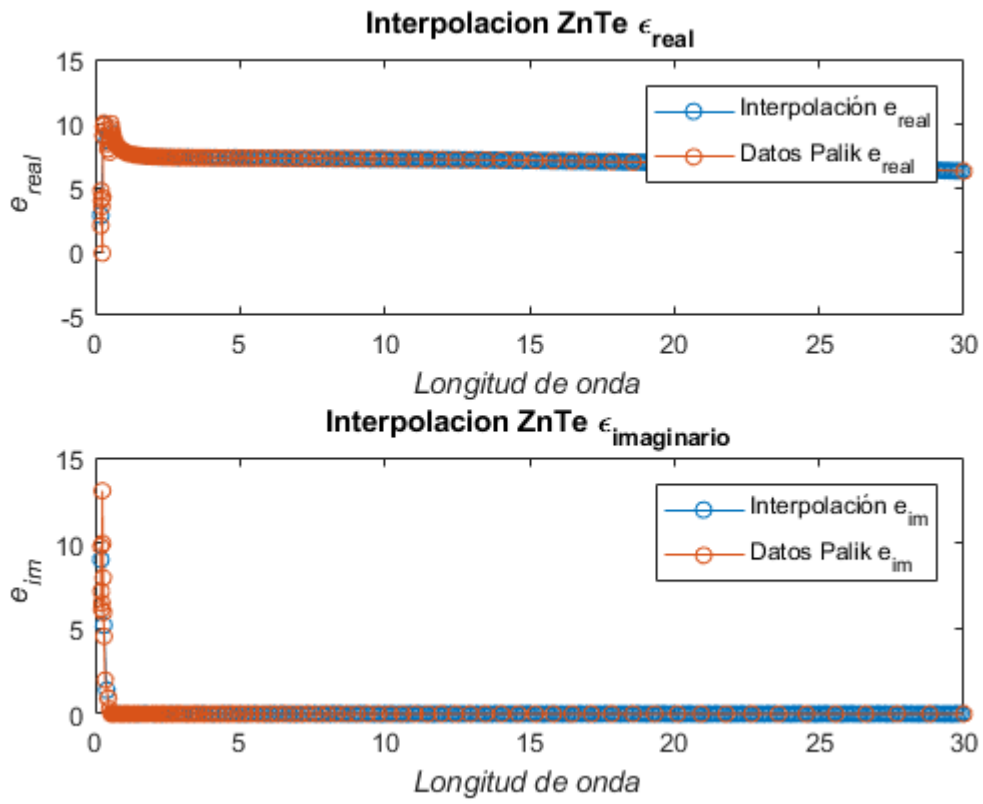
## Referencias

- Yin, X., Yang, R., Tan, G., & Fan, S. (2020). As a Renewable and Sustainable Energy Source. *Science*, 791(November), 786–791.
- Zhang, Z. M. (2020). *Nano / Microscale Heat Transfer* (Second Edi). Springer US.
- Zhang, Z., Yu, Z., Liang, Y., & Xu, T. (2018). Dual-band nearly perfect absorber at visible frequencies. *Optical Materials Express*, 8(2), 463. <https://doi.org/10.1364/ome.8.000463>
- Zhao, Bin, Hu, M., Ao, X., Chen, N., & Pei, G. (2019). Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects. *Applied Energy*, 236(November 2018), 489–513. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.018>
- Zhao, Bo. (2014). *Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) MATLAB Code Tutorial*.
- Zhao, D., Aili, A., Zhai, Y., Xu, S., Tan, G., Yin, X., & Yang, R. (2019). Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications. *Applied Physics Reviews*, 6(2). <https://doi.org/10.1063/1.5087281>
- ZHU, L., RAMAN, A., WANG, K., ANOMA, M., & FAN, S. (2014). Radiative cooling of solar cells: supplementary material. *Opticsinfobase.Org*, c, 100.  
<http://www.opticsinfobase.org/viewmedia.cfm?uri=optica-1-1-32-1>
- Zhu, L., Raman, A., Wang, K. X., Anoma, M. A., & Fan, S. (2014). Radiative cooling of solar cells. *Optica*, 1(1), 32. <https://doi.org/10.1364/optica.1.000032>

## ANEXO 1: INTERPOLACIÓN MATERIALES USADOS







## **ANEXO 2: PANELES FOTOVOLTAICOS**

### **ESTRUCTURA CELDA FOTOVOLTAICA**

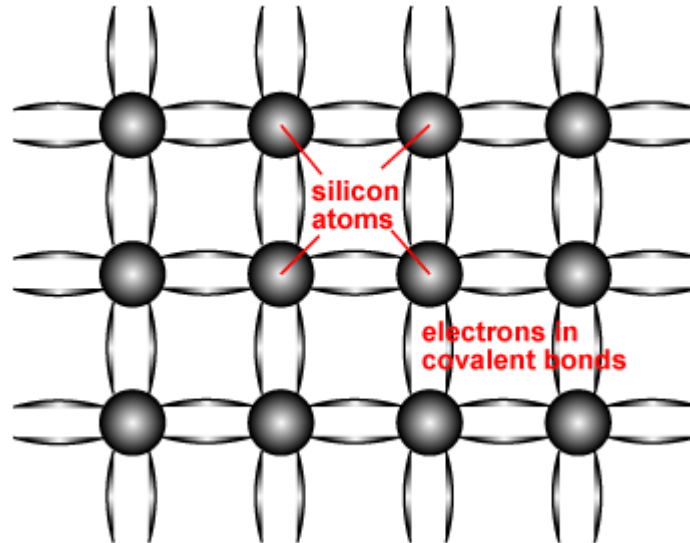
Un panel fotovoltaico está diseñado para aprovechar la luz solar y transformarla en electricidad, su uso puede ser doméstico o industrial. El primer dispositivo fotovoltaico fue usado en 1839 por Edmond Becquerel. Sin embargo, su comprensión y masificación llegó en el siglo XX. Para lograr su uso masivo se necesitó el avance en los estudios de la mecánica cuántica y especialmente de los semiconductores.

Un semiconductor se caracteriza por tener una conductividad eléctrica menor a un conductor, pero mayor a un aislante. La capacidad de cambiar la conductividad de un material añadiendo impurezas ha permitido revolucionar la electrónica.

Las propiedades de cada material semiconductor se relacionan por sus características atómicas, al ser diferentes entre sí permiten a los investigadores seleccionar el material necesario, en este caso para la aplicación en paneles fotovoltaicos.

Generalmente, los materiales semiconductores corresponden al grupo IV de la tabla periódica, aunque también pueden ser una combinación del grupo III y V o del grupo II y VI, el semiconductor más usado en celdas solares es el silicio que pertenece al grupo IV.

En las estructuras de silicio, los átomos se unen mediante enlaces covalentes, posee cuatro electrones de valencia que se comparten con los circundantes formando una estructura regular y periódica en la que cada átomo está rodeado por ocho electrones como se puede ver en la figura a continuación.



*Molécula de silicio. FUENTE: (Honsberg & Bowden, 2019)*

No obstante, los electrones no permanecen fijos en la red cristalina. Cada electrón puede ganar la energía suficiente para liberarse de la red y ser un “electrón libre”, ya que solo en el cero absoluto los electrones se encuentran estáticos. Cuando la temperatura es elevada, como ocurre en aplicaciones fotovoltaicas, los electrones ganan energía para soltarse del enlace, aunque el electrón debe superar una energía mínima para liberarse denominada banda prohibida, no puede estar en un estado intermedio. Si obtiene la suficiente energía se denomina en un estado de alta energía y se mueve libremente, en el caso contrario se denomina en “baja energía” y permanece anclado a la estructura.

Como resumen, los parámetros que más inciden en la elección de un semiconductor.

- **Banda prohibida:** Cantidad mínima de energía de un electrón para liberarse de un enlace y poder participar en la conducción, también determina la energía que se genera. Además, se crea un agujero donde estaba ese electrón y este también es parte de la conducción.



## Anexos

- Número de portadores disponibles para conducir electricidad: Depende de la banda prohibida y de la temperatura del material. Al ser menor la banda, la cantidad de electrones es mayor, de igual forma al aumentar la temperatura.
- Generación y recombinación de estos portadores al ser expuestos a la luz: La recombinación hace referencia a la pérdida de energía de un electrón, ocupando el espacio de un agujero y en cada material la capacidad de recombinación es distinta.

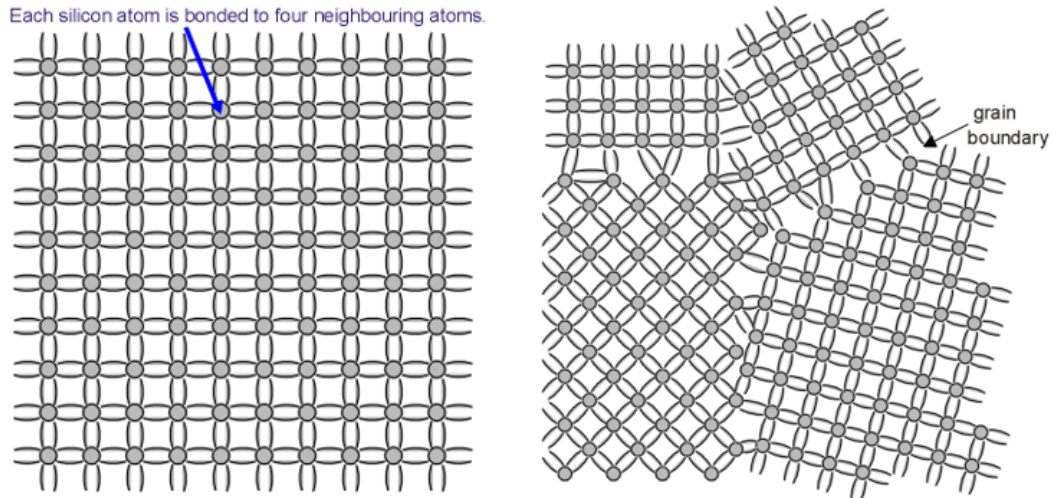
El silicio es el material más utilizado para aplicaciones fotovoltaicas y su fabricación puede ser monocristalina o multicristalina.

Las celdas monocristalinas consisten en una estructura ordenada, lo que conlleva un comportamiento predecible y uniforme, aunque su valor es mayor debido a los mayores requerimientos técnicos en su fabricación.

Por otro lado, las celdas multicristalinas son más baratas debido a su menor costo de fabricación, la calidad es menor y la estructura es más desordenada.

Estas dos dominan el mercado tanto doméstico como industrial.

A continuación, se muestra una figura en la que se compara la composición atómica de cada tipo:



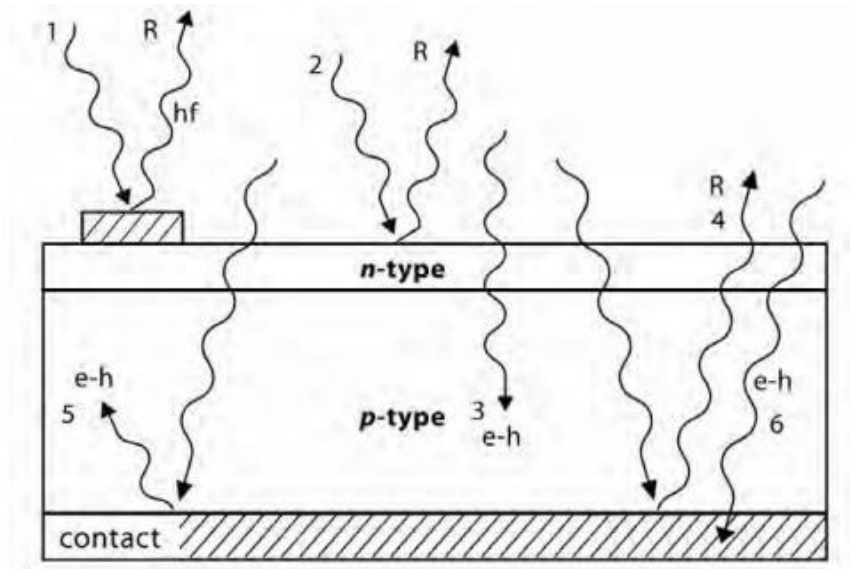
*Silicio cristalino (izquierda) y silicio multicristalino (derecha). FUENTE:(Honsberg & Bowden, 2019)*

## COMPORTAMIENTO DE LA LUZ EN UNA CELDA

Una celda fotovoltaica de silicio (se usa como ejemplo porque es la más común), es un diodo que se forma al unir silicio tipo p (dopado con boro principalmente) y del tipo n (dopado con fosforo). La luz incidente puede comportarse de diferentes formas, como se ve en la figura 2-9. Los comportamientos que se pueden originar y que están numerados en la ilustración son:

1. Reflexión y absorción en el contacto superior
2. Reflexión en la superficie de la celda
3. Absorción deseada
4. Reflexión desde la parte trasera hacia afuera de la celda.
5. Absorción después de la reflexión
6. Absorción en el contacto trasero

Para maximizar la potencia nominal de la celda deben maximizarse los casos 3 y 5.



*Comportamiento de la luz incidente en un panel fotovoltaico. FUENTE:(Wenham, 2013).*

Además, hay dos parámetros limitantes utilizados en las celdas:

3. Corriente de cortocircuito: La corriente máxima a voltaje cero. Depende del área de la celda, el número de fotones disponibles, el espectro de luz incidente, las propiedades ópticas de la celda y la probabilidad de colección de la celda
4. Voltaje de circuito abierto: El voltaje máximo a corriente cero. Aumenta logarítmicamente con el aumento de la luz solar.

Estos parámetros sirven para comparar celdas y su potencial.

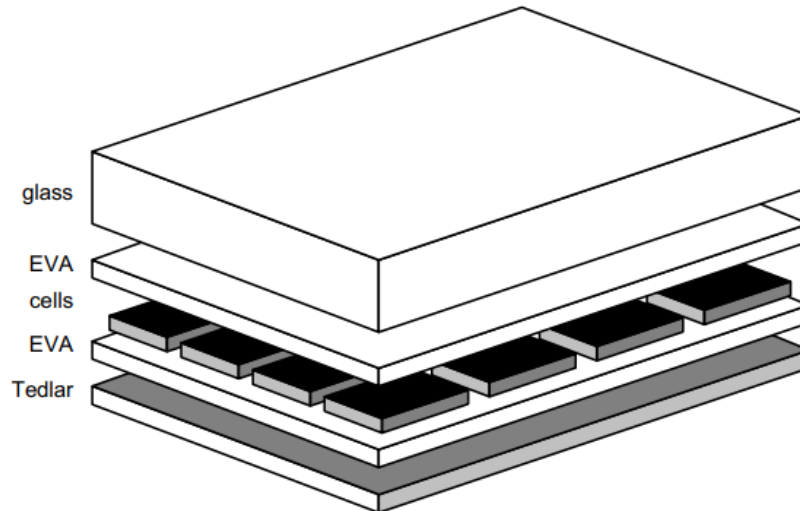
Una celda fotovoltaica se compone de distintas capas, aunque la única que genera la conversión entre radiación y electricidad es la celda o célula.

## **ESTRUCTURA PANEL FOTOVOLTAICO**

Las capas son las siguientes, visto desde la parte superior (Wenham, 2013)

## Anexos

1. Vidrio: Capa que debe ser capaz de soportar las condiciones ambientales como polvo, arena, viento, lluvia, granizos, condensación, humedad, variaciones de temperatura. Debe poder transmitir radiación (en el rango del espectro solar) mientras soporta la radiación ultravioleta. Finalmente, debe ser una superficie dura, que resista la abrasión, que no se manche y que sea fácil de limpiar. Generalmente se utiliza vidrio en esta capa.
2. EVA: Material usado como encapsulante, protege principalmente de la celda, la protege de la entrada de gases, vapores o líquidos.
3. Celda: Es la capa activa de la celda, se conectan en serie muchas celdas pequeñas para formar un panel y es la encargada de suministrar electricidad.
4. EVA: Material encapsulante, está sobre y bajo la celda, protegiéndola en vacío de los peligros atmosféricos que pueden afectarla. La unión entre la celda y el encapsulante es la más crítica.
5. Tedlar: Usado en la capa posterior sirve como barrera contra la humedad.



*Estructura típica de un panel fotovoltaico. FUENTE: (Wenham, 2013)*

En la actualidad las celdas de Silicio son las más usadas ya que su costo de producción es bajo, pero se existe un gran interés en encontrar nuevos materiales y las celdas se encuentran en su tercera generación siendo la primera la de los diodos tipo p-n, la segunda las celdas más delgadas

## Anexos

y flexibles y la tercera con la inclusión de materiales más complejos. Estos son de especial relevancia ya que su eficiencia va aumentando considerablemente y es un desafío lograr su competitividad en el mercado. Las celdas de tercera generación más estudiadas son las celdas de perovskita, celdas de polímeros (fulerenos) y la de polímeros. Si se sigue en la investigación por aumentar la potencia de conversión eléctrica en unos 40 años más se podrían ver reemplazadas las celdas de silicio que actualmente se utilizan (Yan & Saunders, 2014).