



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y  
DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial

## TRABAJO FIN DE GRADO

# MODELADO Y SIMULACIÓN DE ESPACIADORES NANOMÉTRICOS PARA SU APLICACIÓN EN DISPOSITIVOS TPVs DE CAMPO CERCANO

Martin Augusto Reigadas Teran

*Tutor:* Pablo García-Linares Fontes

*Departamento:* Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Física Aplicada

*Cotutor:* Esther López Estrada  
Instituto de Energía Solar

Madrid, Septiembre, 2022



**Título:** Modelado y simulación de espaciadores nanométricos para su aplicación en dispositivos TPVs de campo cercano

**Autor:** Martin Augusto Reigadas Teran

**Tutor:** Pablo García-Linares Fontes

**Cotutor:** Esther López Estrada

## EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día ... de ..... de ... en ....., en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Agradecimientos

Agradezco a .....



# Resumen

Este proyecto se resume en.....

**Palabras clave:** palabraclave1, palabraclave2, palabraclave3.



# Abstract

In this project...

**Keywords:** keyword1, keyword2, keyword3.



# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación del proyecto . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	4
1.3. Estructura del documento . . . . .	5
<b>2. Estado del arte</b>	<b>7</b>
2.1. Termo-fotovoltaica . . . . .	7
2.2. Transmisión de calor . . . . .	10
2.2.1. Convección . . . . .	10
2.2.2. Conducción . . . . .	11
2.2.3. Radiación . . . . .	11
<b>3. Materiales y Herramientas</b>	<b>15</b>
3.1. Materiales . . . . .	15
3.1.1. Nano-espaciador . . . . .	15
3.1.2. Célula . . . . .	15
3.1.3. Emisor . . . . .	16
3.2. Herramientas . . . . .	17
3.2.1. Granta EduPack 2021 R2 . . . . .	17
3.2.2. Refractive Index . . . . .	18
3.2.3. Autodesk Inventor Professional 2021 . . . . .	18
3.2.4. Autodesk CFD . . . . .	18
3.2.5. MATLAB . . . . .	19
3.2.6. Calculadora de campo cercano . . . . .	19
<b>4. Métodos</b>	<b>23</b>
4.1. Criterios de geometría y escala . . . . .	23
4.2. Cálculos de las propiedades de los materiales para las simulaciones . .	23
4.2.1. Área . . . . .	24
4.2.2. Volumen . . . . .	24
4.2.3. Densidad . . . . .	24

4.2.4. Conductividad Térmica . . . . .	24
4.2.5. Calor Específico . . . . .	25
4.2.6. Resistencia de contacto . . . . .	25
4.3. Procedimientos de las simulaciones y extracción de resultados . . . . .	26
4.3.1. Para la radiación de campo cercano . . . . .	26
4.3.2. Para la conducción térmica . . . . .	29
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>35</b>
5.1. Comprobación del procedimiento de extracción de resultados de CFD	35
5.2. Resultados de las simulaciones para una TPV de Si-SiO <sub>2</sub> -Si . . . . .	36
5.2.1. Efectos de la resistencia de contacto sobre la conducción . . . . .	36
5.2.2. Efecto de la porosidad sobre la conducción . . . . .	37
5.2.3. Radiación de campo cercano . . . . .	38
5.2.4. Relación de transmisión por conducción y radiación . . . . .	40
5.3. Resultados de las simulaciones para una TPV de Si-SiO <sub>2</sub> -Ge . . . . .	42
5.4. Resultados de las simulaciones para una TPV de SS-SiO <sub>2</sub> -Ge . . . . .	45
5.5. Resultados de las simulaciones para una TPV de SiC-SiO <sub>2</sub> -Ge . . . . .	48
5.6. Resultados de las simulaciones para una TPV de Si-Si-Ge y SS-Si-Ge	50
5.7. Discusión . . . . .	51
<b>6. Conclusiones</b>	<b>53</b>
6.1. Conclusión . . . . .	53
6.2. Desarrollos futuros . . . . .	53
<b>A. Anexo ...</b>	<b>55</b>
A.1. Lorem ipsum . . . . .	55
<b>Bibliografía</b>	<b>57</b>

# Índice de figuras

1.1. Relación entre demanda total de energía primaria anual . . . . .	1
1.2. Desglose del consumo de energía primaria en España 20 . . . . .	2
1.3. Planta de valorización energética del Centro Las Lomas del Parque Tecnológico de Valdemingómez, donde se aprovecha los gases a alta temperatura para producir vapor de agua en la caldera para mover unas turbinas conectadas a generadores para producir electricidad. <i>Fuente: Ayuntamiento de Madrid</i> . . . . .	3
2.1. Flujo de conversión de la energía térmica en energía eléctrica . . . . .	7
2.2. Relación entre densidad de potencia y eficiencia entre dispositivos nTPVs y nTiPVs . . . . .	9
2.3. Esquemático de la representación geométrica para el flujo entre dos cuerpos separados por vacío . . . . .	13
2.4. Fluxos de radiación monocromática por variación de grosor de emisor y variación de distancia . . . . .	14
3.1. Potencias por unidad de área para una célula de Ge y diferentes materiales de emisor para un rango de longitudes de onda desde aproximadamente $0.2 \mu\text{m}$ hasta $1.8 \mu\text{m}$ (0.7 eV) con distancias de separación de 100nm y 1000nm según las ecuaciones de [10] calculadas a partir de las ecuaciones (2.4) y (2.5). . . . .	16
3.2. Icono de Autodesk Inventor Professional 2021 . . . . .	18
3.3. Icono de Autodesk CFD . . . . .	19
3.4. Icono de MATLAB . . . . .	19
3.5. Pestaña <i>Potencia Radiada</i> de la calculadora de campo cercano . . . . .	20
3.6. (a) Ventana para la selección del rango de las distancias de separación entre el emisor y el receptor. (b) Ventana para la selección de los materiales para el emisor y el receptor. . . . .	21
3.7. Pestaña de la Potencia . . . . .	21
3.8. Pestaña de los datos de n y k de los materiales disponibles . . . . .	22
4.1. (a) Casilla para la selección de la opción de simular un rango de distancias. (b) Casilla para la selección de la opción de simular una combinación de materiales. . . . .	27
4.2. (a) Ventana para la selección del rango de distancias a simular. (b) Ventana para la selección de las combinaciones de materiales a simular, siendo <b>UpFace</b> el emisor y <b>DownFace</b> la célula. . . . .	27

4.3. Indicadores del estado actual del sistema. (a) Indicador del estado <b>Changed</b> o estado de cambio, se activa cuando se produce algún cambio en los datos seleccionados para simular. (b) Indicador del estado <b>Running</b> o corriendo, se activa cuando estando en el estado <b>Changed</b> se hace clic al botón <b>Calculate</b> y corre la simulación. (c) Indicador del estado <b>StdBy</b> , se activa cuando termina la simulación, avisando que está a la espera de algún cambio. . . . .	28
4.4. Preferencias para el cálculo de la potencia . . . . .	28
4.5. (a) Botón de guardar los resultados obtenidos de los cálculos o la simulación, dependiendo de la pestaña que se encuentre el usuario de la calculadora de campo cercano. (b) Botón de guardar todos los resultados obtenidos de los cálculos y simulación. . . . .	28
4.6. Vistas del sistema TPV. (a) Vista de lejos del sistema completo de la TPV. (b) Vista del sistema TPV de cerca desde un borde. (c) Vista del nano-espaciador colocado sobre el centro de una cara de la célula. . . . .	30
4.7. (a) Panel de las herramientas utilizadas para aplicar materiales, condiciones de contorno, lanzar simulaciones, seleccionar el selector de superficies y volúmenes. (b) Paneles de las herramientas utilizadas para la extracción de resultados de las simulaciones de transmisión de calor por conducción. . . . .	31
4.8. (a) Mallado del nano-espaciador de 100nm, con tamaño de malla de 0.01. (b) Mallado del nano-espaciador de 100nm visto de cerca. (c) Mallado del nano-espaciador de 1000nm, con tamaño de malla de 0.1. . . . .	31
4.9. (a) Panel de control de la ventana del Solver.(b) Panel de las propiedades físicas de la ventana del Solver. . . . .	32
4.10. (a) Pestaña de selección y resultados del <b>Wall Calculator</b> .(b) Pestaña de salida del <b>Wall Calculator</b> . . . . .	33
5.1. Efectos de la resistencia de contacto sobre el flujo de calor por conducción . . . . .	36
5.2. Relación de la potencia de la $R_c$ respecto a $\sin R_c$ . . . . .	37
5.3. Efectos de la porosidad del nano-espaciador sobre el flujo de calor por conducción . . . . .	37
5.4. Potencia de radiación monocromática para dos placas gruesas planas de <i>Si</i> separadas diferentes distancias ( $d$ ) en metros. . . . .	38
5.5. (a) Potencia por unidad de área transmitida por radiación por efecto de campo cercano para radiación monocromática de energía mayor a los 1.1 eV. (b) Potencia por unidad de área transmitida por radiación por efecto de campo cercano para radiación monocromática en todo el rango de longitudes de onda disponible. . . . .	39
5.6. Relación de las potencias de radiación y conducción para un sistema TPV de $1cm^2$ y célula de <i>Si</i> . (a) Relación de las potencias para $Eg > 1.1$ eV y si $R_c$ . (b) Relación de las potencias para $Eg > 1.1$ eV y con $R_c$ [17]. . . . .	39
5.7. Potencia por unidad de área de la radiación por campo cercano en el rango de longitudes de onda de energía mayor e igual a 0.7eV. . . . .	40

5.8. Relación de la potencia radiada en un $1\text{ cm}^2$ y conducción por cantidad de espaciadores en el centímetro cuadrado para el rango de $Eg > 0.7\text{ eV}$ sin $r_c$ (a) y con $R_c$ (c), y en todo el rango disponible de longitudes de onda sin (b) y con $R_c$ (d). . . . .	41
5.9. (a) Potencia de conducción con y si resistencia de contacto empírica [17]. (b) Relación de la potencia de conducción del caso con resistencia de contacto respecto a la potencia de conducción sin resistencia de contacto. . . . .	42
5.10. (a) Potencia radiada por campo cercano para diferentes separación entre placas para un emisor de <i>Si</i> a $800^\circ\text{C}$ y una célula de <i>Ge</i> a $25^\circ\text{C}$ . (b) Comparación de la potencia radiada monocromática para una separación de $1000\text{nm}$ entre el sistema <i>Si</i> – <i>Si</i> y <i>Si</i> – <i>Ge</i> . . . . .	42
5.11. Potencias por unidad de área para la radiación de campo cercano para el sistema <i>Si</i> – <i>SiO<sub>2</sub></i> – <i>Ge</i> para diferentes alturas del nano-espaciador . . . . .	43
5.12. Relaciones entre la potencia de conducción para diferentes cantidades de nano-espaciadores y la potencia de radiación en $1\text{cm}^2$ para diferentes distancias de separación o alturas de nano-espaciador . . . . .	44
5.13. (a) Potencias de conducción sin y con resistencias de contacto para un emisor de <i>SS</i> , las resistencias de contacto son de $4 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2\text{K/W}$ para la $R_c$ empírica, $5,5 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2\text{K/W}$ para la $R_c$ cal. max y $2,75 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2\text{K/W}$ para la $R_c$ cal. inter. (b) Relaciones de las potencias con $R_c$ respecto a la potencia conducida sin $R_c$ . . . . .	45
5.14. (a) Potencia radiada monocromática por campo cercano para un emisor de <i>SS</i> y una célula de <i>Ge</i> . (b) Potencia radiada para un rango de longitudes de onda cuya energía es mayor a los $0.7\text{eV}$ ( $\sim 1,8\text{ }\mu\text{m}$ ). . . . .	46
5.15. Relación de las potencias de conducción y radiación para un emisor de <i>SS</i> según el número de nano-espaciadores y la altura de los nano-espaciadores para un emisor y célula de $1\text{ cm}^2$ . . . . .	47
5.16. (a) Potencias de conducción para sin y con el efecto de la $R_c$ empírica, eje izquierdo para el caso sin $R_c$ y eje derecho para el caso con $R_c$ . (b) Relación de la potencia de conducción con $R_c$ respecto a sin $R_c$ . . . . .	48
5.17. . . . .	49
5.18. . . . .	49
5.19. . . . .	50



# Índice de tablas

5.1. Tabla de resultados de las simulaciones de conducción y radiación de campo cercano para diferentes alturas del nano-espaciador. Flujos de calor del TPV $Si - SiO_2 - Si$ para diferentes alturas del nano-espaciador, para los casos sin $R_c$ y con $R_c$ igual a $4 \cdot 10^{-6} m^2 K/W$ [17], y sin $R_c$ pero con las proporciones de las porosidades de [28] para un 25 % y un 50 % . . . . .	40
5.2. Tabla de las potencias de resultado de las simulaciones de transmisión de calor por radiación de campo cercano y conducción para el sistema TPV $Si - SiO_2 - Ge$ . . . . .	43
5.3. Tabla de recopilación de los resultados de las simulaciones de transmisión de calor por conducción y radiación de campo cercano para una TPV de emisor de $SS$ . . . . .	46
5.4. dac . . . . .	50
5.5. nano-espaciador de Si . . . . .	50



# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo no deben faltar los siguientes apartados:

### 1.1. Motivación del proyecto

En los últimos años el consumo de energía primaria en España ha aumentado significativamente de unos 88455 ktep( $\sim 1,03E12 \text{ kWh}$ ) en 1990 a unos 126107 ktep( $\sim 1,43E12 \text{ kWh}$ ) en 2019, que equivale a un aumento del 42 % respecto a su valor en 1990, llegando a ser su valor máximo unos 146891 ktep( $\sim 1,71E12 \text{ kWh}$ ) en 2007.

De 2008 a 2014, como consecuencia de la crisis económica el consumo energético disminuyó hasta unos 117824 ktep ( $\sim 1,37E12 \text{ kWh}$ ) en 2014, recuperándose a partir del 2015, como se puede observar en la figura 1.1.

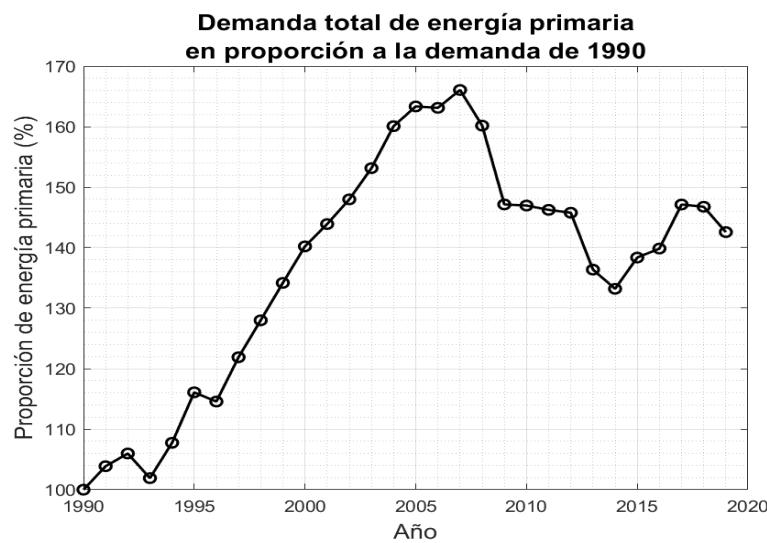


Figura 1.1: Representación gráfica de la relación entre la demanda total de energía primaria anual de 1990 hasta 2019 en España. *Fuente obtención de datos: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico de España.*

Dicha energía se puede dividir en diferentes categorías según el sector que la consume o la fuente de dicha energía. En el 2019, un 44.5 % de la energía primaria

fue consumida de productos petrolíferos y apenas un 14.5 % de renovables (figura 1.2a), y un 23.6 % de la energía final fue consumida por el sector de la industria (figura 1.2b), representando casi una cuarta parte del consumo total de la energía final en España. Desafortunadamente en todos los procesos energéticos, ya sean de producción, transporte o consumo, una parte de la energía siempre es desaprovechada en forma de calor (conocido como calor residual). En 2015, la industria en España consumió aproximadamente 220 TWh de energía, desperdi ciéndose unos 22 TWh según los cálculos de las estimaciones realizadas en [22].

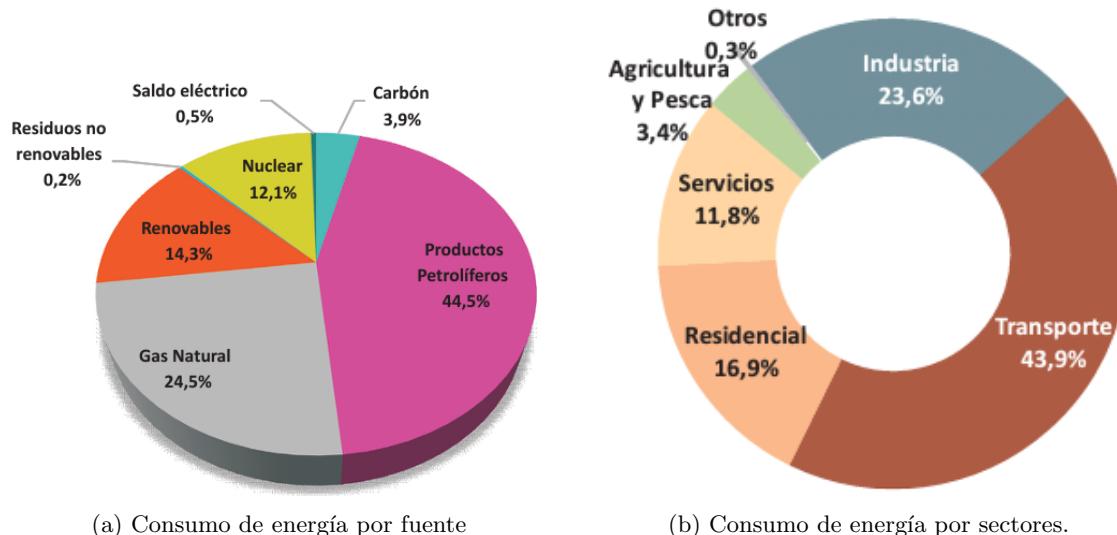


Figura 1.2: Desglose del consumo de energía primaria en España 2019 por fuente de energía(a). Consumo de energía final por sectores en el año 2019 en España(b). *Fuente: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico de España.*

Para recuperar esta energía perdida se han desarrollado instalaciones de recuperación de calor residual, no solo para disminuir los costes sino también para disminuir las emisiones de contaminantes, cumpliendo así parte de los objetivos de desarrollo sostenible. El calor residual se puede aprovechar para obtener electricidad o para calentar un fluido para mejorar la eficiencia del mismo u otro proceso, disminuyendo el consumo de combustible u energía.

El aprovechamiento del calor residual para el calentamiento de otro fluido se utiliza en la industria, por ejemplo, un dispositivo llamado economizador que se usa en calderas para pre-calentar el fluido, mejorando el rendimiento térmico, o en el sector residencial que aprovecha el calor obtenido en el sistema de enfriamiento de algunos sistemas fotovoltaicos para obtener agua caliente.

La obtención de electricidad mediante el aprovechamiento del calor residual puede ser por vía de trabajo mecánico o por conversión directa. Por vía de trabajo mecánico se produce mediante ciclos termodinámicos, principalmente el ciclo de Rankine, el cual mediante un intercambiador de calor se genera vapor de agua que luego hace mover unas turbinas que están conectadas a un generador. La conversión directa se basa en la utilización de dispositivos termoeléctricos, termoíónicos, entre otros.

La conversión termo-eléctrica por vías mecánicas es la más conocida y es altamente utilizada, por ejemplo, las centrales nucleares, los sistemas de ciclos combinados, los sistemas de tratamientos de residuos que necesitan ser incinerados (figura 1.3), entre otros. También se puede aprovechar el calor residual de la generación eléctrica, como es el caso de los cogeneradores.

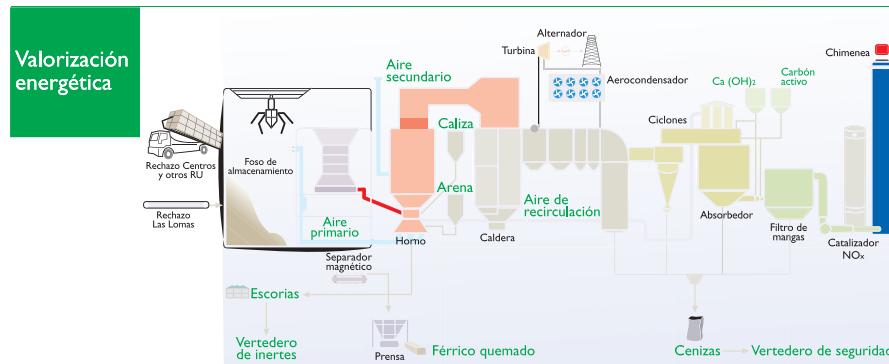


Figura 1.3: Planta de valorización energética del Centro Las Lomas del Parque Tecnológico de Valdemingómez, donde se aprovecha los gases a alta temperatura para producir vapor de agua en la caldera para mover unas turbinas conectadas a generadores para producir electricidad. *Fuente: Ayuntamiento de Madrid*

La principal desventaja de estos sistemas son el uso de partes móviles que tienen que estar en constante mantenimiento por desgaste, el uso de fluidos que complica el control del sistema. Otra desventaja de estos sistemas es que suelen requerir un tamaño mínimo a partir del cual pasan a ser rentables. Con lo cual se reduce el en número de aplicaciones donde pueden ser utilizados. Sin embargo, los dispositivos de estado sólido (termoeléctricos, termiónicos y termofotovoltaicos) son escalables, pudiendo encontrar más aplicaciones donde ser utilizados (a nivel residencial, en aplicaciones espaciales, automoción, etc.).

Los dispositivos termoeléctricos son dispositivos semiconductores, uno tipo n y otro tipo p, que están unidos en sus extremos que cuando se les aplica una diferencia de temperatura entre ambas uniones, se genera una diferencia de potencial, conocido como efecto Seebeck, que se utiliza para generar electricidad. Los materiales que se utilizan para estos dispositivos tienen unas conductividades térmicas bajas, para disminuir las pérdidas por conducción de calor, y aumentar el coeficiente Seebeck del generador termo-eléctrico (TEG) porque a mayor sea esta diferencia, mayor será la diferencia de potencial.

La eficiencia de los TEGs es alrededor del 5% [1], aunque hasta el momento la eficiencia ha llegado como máximo hasta aproximadamente 15% [6], lo cual sigue siendo demasiado baja. Aún con bajas eficiencias los TEG se utilizan para aplicaciones espaciales, recuperación de calor en el transporte, entre otros.

Otros sistemas de obtención de electricidad de una fuente de calor es la generación termoiónica (TIC), que mediante el emisión termoiónica se produce un flujo de electrones entre el emisor metálico a alta temperatura y un receptor a menor

temperatura, separados por el vacío. Al aumentar la temperatura del emisor, los electrones libres se excitan hasta tal punto que la energía es lo suficientemente grande como para que se desprendan del material, la densidad de corriente está determinada por la ley de Richardson, donde  $J = A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-W}{k \cdot T}}$ , siendo J la densidad de corriente, A la constante de Richardson, W la función de trabajo del metal, k la constante de Boltzman y T la temperatura en Kelvin.

Un generador que se puede utilizar en conjunto con el TIC, es un generador termofotovoltaico (TPV) que transforman la radiación electromagnética producida por el emisor a alta temperatura para ser capturada por el receptor, que es una célula fotovoltaica. Los emisores de las TPV no tienen que estar a unas temperaturas tan altas como los TIC, ya que no necesita que se desprendan los electrones. Ambos dispositivos presentan el mismo problema de pérdidas de electrones o fotones por los bordes del convertidor y para disminuir esto se disminuye la separación entre el emisor y el receptor. Cuando las distancias se vuelven nanométricas aumenta la transferencias de fotones por la transferencia de radiación evanescente y/o electrones por la eliminación del efecto de carga de espacio, generando una mayor potencia eléctrica porque la potencia radiada aumenta con respecto a la proporcionada por la ley de Planck (conocido como efecto de campo cercano).

La eficiencia de las células TPV han aumentado con el tiempo hasta llegar aproximadamente a un 40 % con una célula de dos uniones con materiales de bandas de energía entre 1 y 1.4 eV, utilizando un reflector trasero que devuelve la radiación de menor energía a la banda energética directa al emisor, pero solo llegando a obtener una densidad de potencia de  $2.39 \text{ W cm}^{-2}$  [28]. Se pueden obtener potencias eléctricas mayores mediante el uso del efecto de campo cercano.

Los dispositivos que aprovechan los efectos de campo cercano presentan la dificultad de mantener de manera constante las distancias de separación nanométricas a lo largo de grandes superficies (relativo a la distancia de separación), los dispositivos de campo cercano estudiados hasta la fecha presentan áreas muy pequeñas  $< 0.3 \text{ mm}^2$  [16]. Para poder fabricar dispositivos TPV que aprovechan los efectos de campo cercano con un área considerable de  $\sim 1 \text{ cm}^2$ , se requiere el uso nano-espaciadores. Por ejemplo, en [8] usan espaciadores de  $1 \mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  y se observó que al disminuir la distancia de separación la corriente de cortocircuito aumenta.

## 1.2. Objetivos

El objetivo de este estudio es diseñar y simular pilares de dimensiones nanométricas para el aprovechamiento del efecto de campo cercano en un convertidor termofotovoltaico, así como determinar la viabilidad de este sistema.

- Modelar un nano-espaciador dentro de los rangos permitidos de los parámetros de los programas de simulación y modelado 3D.
- Ensamblar los sistemas TPV para diferentes alturas del nano-espaciador para las simulaciones.
- Simular la transferencia de calor por conducción a través de un nano-espaciador

de  $SiO_2$  de un sistema TPV para diferentes alturas del nano-espaciador, diferentes materiales de emisor y diferentes resistencias de contacto entre emisor y el nano-espaciador.

- Simular la transferencia de calor radiada entre el emisor y la célula para diferentes materiales del emisor y para varias distancias de separación, teniendo en cuenta los efectos de campo cercano en la radiación.
- Determinar entre los casos estudiados cuales pueden dar lugar a sistemas de TPV de campo cercano viables.

### 1.3. Estructura del documento

A continuación y para facilitar la lectura del documento, se detalla el contenido de cada capítulo.

- En el **capítulo 1** se realiza una introducción del trabajo con la respectiva motivación y objetivos.
- En el **capítulo 2** se desarrolla el estado de arte, definiendo los apartados más importantes y resaltando las investigaciones con mayor relevancia.
- En el **capítulo 3** se exponen las herramientas y materiales utilizados, así como los criterios de selección.
- En el **capítulo 4** se mencionan los métodos seguidos y los cálculos realizados para el desarrollo del trabajo.
- En el **capítulo 5** se exponen los resultados obtenidos de las simulaciones.
- En el **capítulo 6** se desarrolla la conclusión y se realiza planteamientos para futuros trabajos.



# Capítulo 2

## Estado del arte

En este capítulo se exponen los principales temas de interés para la realización de este trabajo, las investigaciones realizadas sobre la TPV y NF-TPV (termofotovoltaica de campo cercano) y el marco teórico sobre las diferentes maneras que se transmite el calor.

### 2.1. Termo-fotovoltaica

Un generador termo-fotovoltaico(TPV) se basa en la conversión de energía calorífica en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico a través una célula termofotovoltaica sin requerir ninguna parte móvil, conocido este tipo de sistemas de generación como motores pasivos de calor, como se representa de una manera sencilla en la figura 2.1.

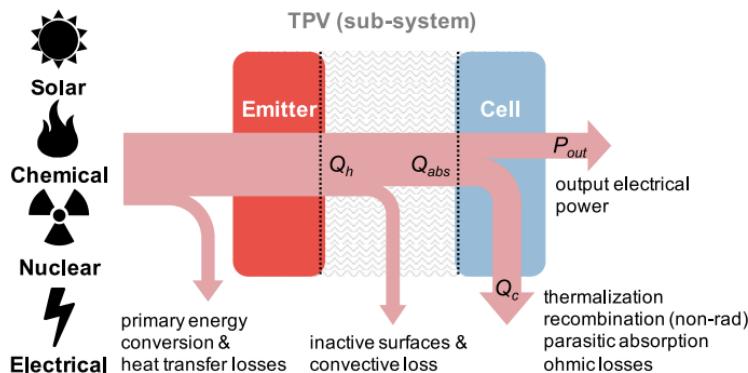


Figura 2.1: Flujo de conversión de la energía térmica en energía eléctrica. *Fuente: [2]*

El emisor se encuentra a una alta temperatura lo cual produce que se transmite el calor en forma de radiación que al llegar a la célula es reflejada, transmitida o absorbida, la porción de radiación absorbida excita a los electrones produciendo un par electrón-hueco sí solo sí la energía del fotón absorbido es mayor que la energía de la banda energética de la célula, al conectar los terminales de la célula a una carga se produce una corriente que alimenta a la carga proporcional a la intensidad lumínica, aquellos fotones con energía menor a la banda energética son suprimidos o reflejados para disminuir el flujo de calor [2].

La termofotovoltaica ha sido un campo de interés para aplicaciones militares, espaciales, generación de electricidad y recuperación de calor residual. Para la milicia de los Estados Unidos de América se han conducido varias investigaciones para la búsqueda de un generador eléctrico silencioso y portátil [14], cumpliéndose en 2004 40 años de investigación sin conseguirse potencias por encima de 500W [13]. En aplicaciones espaciales es de interés por presentar beneficios en rendimiento para misiones cercanas al Sol y misiones en el espacio profundo porque los componentes más sensibles se encuentran resguardados de la dura radiación, siendo posible también el guardar energía en gravedad cero [26]. Para la recuperación de calor residual existe un gran interés porque la conversión de energía térmica a eléctrica es menor del 40 % en las plantas de generación de energía de combustibles fósiles convencionales, produciéndose una gran cantidad de pérdidas en forma de calor [23].

Todas estas áreas de interés ha provocado un aumento de las investigaciones en los sistemas de generación termo-fotovoltaicos, estudiándose la utilización de células multicapas, diferentes materiales de emisor para aumentar la potencia radiada, aplicación de capas finas en el emisor para el aumento de la potencia radiada [11], aplicación de filtros [27] y capas reflectantes para la recuperación de fotones y disminución de calentamiento [7], la combinación con un TIC para aumentar la densidad de potencia y eficiencia total del sistema generador [4, 7], y la disminución del espacio entre emisor y célula para aprovechar los efectos de la radiación de campo cercano [7, 9, 17].

Las investigaciones no se han limitado a estudiar células TPV de una o varias uniones p-n, sino también la utilización de células termofotovoltaicas interbandas en cascada (ICTPV) de banda energéticas comprendidas entre 0.2 y 0.5 eV que resulta en una eficiente colección de portadores foto-generados, donde la eficiencia máxima ( $\eta_{max}$ ) y la diferencia de potencial en vacío ( $V_{OC}$ ) es proporcional a el número de bandas (stages) hasta unos 0.691 V de  $V_{OC}$  y uno 6.2%  $\eta_{max}$ , pero genera una significante cantidad de energía térmica por la densidad de corriente oscura [15]. Esta corriente se consigue disminuir al introducir una barrera entre las capas [20].

Aún quedan por estudiar muchos materiales y disposiciones del emisor y de la célula, algo de alta importancia es el estudio de filtros y capas reflectantes porque permiten la re-utilización de los fotones no absorbidos, aumentando la eficiencia y evitando que se acabe calentando innecesariamente la célula. Las capas traseras reflectantes(BSR), principalmente hechas de oro, reducen las pérdidas de radiación por la absorción de la radiación de energía menor a la banda energética, permitiendo que la radiación vuelva al emisor [24].

Habitualmente estas capas se usan en las TPVs y TICs, como por ejemplo se usan en [7, 9, 19]. Los filtros se utilizan para evitar la transmisión de radiación no deseada la célula, consigiéndose un aumento de la eficiencia del 45 % al 75 %, estos filtros pueden ser de una o múltiples capas que la rugosidad de la interfaz degradada seriamente la eficiencia, lo que se puede mejorar con una poca cantidad de capas [27].

En [5] se estudian diferentes combinaciones de cerámicas para el emisor de una TPV a 2000°C y célula a 400°C, observando los flujos espectrales de calor, la

potencia total y el rendimiento, siendo la máxima potencia por metro cuadrado para el emisor de  $B_4C$  con unos  $7,45 \cdot 10^4 \text{ W m}^{-2}$  pero solo con una eficiencia del 11.74 %, a diferencia del BeO con una potencia de  $3,19 \cdot 10^4 \text{ W m}^{-2}$  y un rendimiento del 24.69 %. Y se observa como el rendimiento disminuye al disminuir la separación entre emisor y célula para luego volver a aumentar.

La razón por la cual se combinan los TICs y las TPVs es para aprovechar tanto los electrones como los fotones radiados, aumentando la densidad de potencia de salida y mejorando el rendimiento de una TPV. Si se disminuye la separación entre el emisor común y la célula por debajo de la micra se pasa a tener efectos de campo cercano, aumentando la potencia producida. En [7] utilizan un dispositivo termofotovoltaico de campo cercano mejorado con termoiónico (nTiPV) con un emisor de Tungsteno con una capa de  $LaB_6$  a unos 2000K, que mejora el rendimiento de una TPV de un 10 % de eficiencia a un 30 % y un aumento de densidad de potencia de unos  $10 \text{ W m}^{-2}$  a unos  $70 \text{ W m}^{-2}$  (figura 2.2), por el uso de una célula sin mallado, disminuyendo la resistencia en serie y las pérdidas por sombras, utilizando un BSR para reflectar los fotones de baja energía.

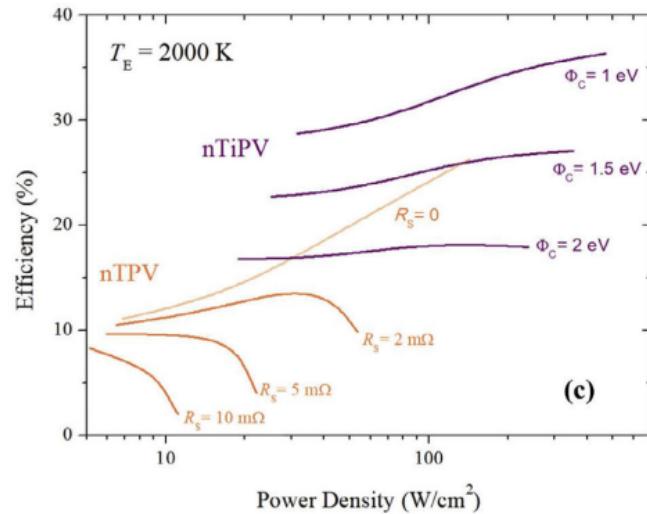


Figura 2.2: Relación entre densidad de potencia y eficiencia entre dispositivos nTPVs y nTiPVs.  
Fuente: [7]

Los dispositivos TPV que aprovechan el efecto de campo cercano se denominan como dispositivos NFTPV, NF-TPV o nTPV, los cuales son capaces de producir más potencia que las TPVs por tener un mayor flujo de calor por radiación. Siendo el aumento de la eficiencia para igualar a la actual de campo lejano de 40 % [19] un objetivo interesante, en [9] se modeló la eficiencia de un NF-TPV basado en InAs con emisor a 700K y radiador de la célula a 300K, alcanzándose unas eficiencia del 17 % siendo la separación de 200nm y notándose que a menores temperaturas y mayores distancias se obtiene menos potencia, y notando que al aumentar la temperatura el pico de potencia se desplaza a menores longitudes de onda.

Dado que los costes de fabricación para el testeo pueden llegar a ser caros se utilizan modelos matemáticos para simular, siendo uno muy útil el presentado

en [10] que proporciona varias ecuaciones para calcular la potencia radiada para varios grosores de emisor y receptor de una sola capa cada uno, siendo el de mayor utilidad el de capa gruesa que proporciona de una manera sencilla el cálculo de la potencia en un rango de longitudes de onda conociendo la permitividad eléctrica compleja de los materiales.

Una ventaja que presenta los NF-TPV es el aumento de la potencia radiada para todas las longitudes de onda, además, dependiendo de la combinación de los materiales utilizados, pueden aparecer frecuencias de resonancia ( $\omega_{res}$ ) que producen un aumento significativo del flujo radiado monocromático a dicha frecuencia, pudiendo aumentar la eficiencia de la NF-TPV si se consigue que la  $\omega_{res}$  coincida con la banda energética del semiconductor. En [11] simulan un sistema nTPV utilizando una lámina fina de SiC y otra gruesa, obteniendo que al aumentar el grosor de la capa disminuye la potencia en la  $\omega_{res}$  pero aumenta para el resto de frecuencias, siendo a partir de los 100nm de grosor la misma potencia radiativa que la lámina gruesa. Para mantener las distancias de separación tan cortas es necesario un mecanismo, siendo lo más sencillo el uso de pilares de algún material cerámico por sus propiedades térmicas, como se presenta en [25] que estudia la transferencia de calor entre dos placas de Si separadas 200nm por vacío y utilizando espaciadores de  $SiO_2$  y prismáticos de base circular de 1  $\mu m$  de diámetro fabricados con fotolitografía ultravioleta, obteniéndose que el coeficiente radiativo de transferencia de calor aumenta con la disminución de la separación entre emisor y célula, y aumenta con la temperatura.

También hay que tomar en cuenta que el coeficiente de transferencia de calor por conducción efectivo que se obtiene cuando se utilizan nano-espaciadores depende principalmente de la resistencia térmica de contacto que se establezcan en cada interfaz. En [17] se estudia la radiación por campo cercano entre dos placas de cuarzo con pilares de pirámides truncadas de  $SiO_2$  que están depositados sobre el substrato inferior, descubriendose que la resistencia de contacto es mucho mayor que la geométrica del pilar, por lo tanto, es de gran importancia para disminuir las pérdidas por conducción.

## 2.2. Transmisión de calor

El calor es una forma de energía que se propaga entre distintos medios de tres formas distintas, por convección, radiación y conducción.

### 2.2.1. Convección

La transmisión de calor por convección se produce por la conducción de la energía cuando el fluido entra en contacto con el sólido y luego el transporte de la energía mediante el movimiento del fluido, pudiendo ser natural o forzada. La diferencia entre la convección natural y la forzada es la fuente de movimiento del fluido, en la convección forzada el movimiento del fluido es producido por una fuente externa, como un ventilador o una bomba, en la convección natural el fluido se mueve por las diferencias en densidades por la variación de la temperatura de

partes del fluido.

No se detalla más sobre este fenómeno de transporte de calor porque no se va a tener en cuenta a lo largo de este trabajo. Ya que supondremos que el sistema a estudiar se encuentra en una cámara al vacío donde hay ausencia de fluido, en este caso, aire.

### 2.2.2. Conducción

La transmisión de calor por conducción se dá a través de uno o varios cuerpos, producido por la diferencia de temperatura entre las caras opuestas del conjunto o cuando dos o más objetos a diferentes temperaturas entran en contacto. De manera genérica la conducción térmica se modela como  $P_{cond} = \Delta T/R$ , siendo  $R$  la resistencia térmica del sistema. Para un solo material, la resistencia térmica se modela como  $R = l/(A \cdot h)$ , donde  $l$  es la longitud del material,  $A$  es la superficie y  $h$  es la conductividad térmica del material. Para varios materiales colocados en serie, es decir, el flujo de calor que los atraviesa es el mismo para todos, la resistencia de conducción se define como la sumatoria de todas las resistencias de cada material ( $R = \sum R_i$ ).

La superficie de contacto entre cada material se le conoce como interfaz, la cual en la realidad no es perfecta y provoca una caída de temperatura la cual se modela como una resistencia térmica llamada resistencia de contacto ( $R_c$ ). La resistencia de contacto depende de muchos parámetros como la rugosidad de cada superficie, la presión, la temperatura, las conductividades térmicas de los materiales involucrados, los tipos de materiales, entre otros, esto provoca que sea muy difícil de obtener un modelo de la misma para una simulación.

En [21] comparan la desviación entre los experimentos y la teoría de la resistencia de contacto entre varios materiales, siguiendo el modelo teórico utilizado para la zona plástica una ecuación simplificada, que para dos aceros inoxidables 304 la diferencia entre experimentación y teoría disminuye con el aumento de la presión.

### 2.2.3. Radiación

La radiación es la transmisión de energía térmica en forma de ondas electromagnéticas o fotones a través del vacío o un medio material proporcional a la temperatura del cuerpo del emisor. Cuando las ondas electromagnéticas inciden sobre la superficie de un material parte de ella es absorbida, otra parte reflejada y el resto se transmite internamente en el material, variando las proporciones de dichas cantidades según el material y la longitud de onda de la radiación. Existe dos flujos de radiación conocidos, el flujo de propagación o campo lejano y el flujo evanesciente o campo cercano que excede los valores predichos por la Ley de Planck del cuerpo negro.

### Radiación propagación o campo lejano

La radiación de campo lejano cumple la ley de Planck sobre la emitancia monocromática de un cuerpo negro ( $E_{\lambda}^{bb}(T)$ ) (ecuación 2.1), cuya integral cumple con la Ley de Stefan Boltzmann (ecuación 2.2) y el valor máximo cumple con la Ley de Wien,  $\lambda_{max} \cdot T = 2,896 \cdot 10^3 \mu m \cdot K$ , donde la temperatura (T) está en grados Kelvin.

$$E_{\lambda}^{bb}(T) = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1} \quad (2.1)$$

$$E^{bb}(T) = \sigma \cdot T^4 \quad \Longleftrightarrow \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad (2.2)$$

Pero las ecuaciones anteriores solo aplica para la radiación total emitida pero no la transferida entre dos superficies, siendo el caso más sencillo el de dos superficies planas, paralelas entre sí y de área infinita o mucho mayor que la distancia que las separa, donde la transferencia de calor entre ambas superficies consideradas como cuerpos grises se puede modelar como:

$$\frac{\Phi}{S} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad (2.3)$$

Donde  $\epsilon_i$  es la emisividad monocromática, es decir, el cociente de la emisividad del cuerpo respecto a la del cuerpo negro, cuyo valor es constante por ser considerados las superficies como cuerpos grises.

Para la radiación de propagación en campo cercano se denota se resuelve de otra manera, que en el caso más sencillo el emisor y el receptor son cuerpos planos y gruesos (figura 2.3), la ecuación que modela el flujo de calor por frecuencia de un emisor (nº1) a un receptor (nº3) separados por el vacío (nº2) es [10]:

$$q_{w,abs}^{prop} = \frac{\Theta(\omega, T_1)}{4\pi^2} \times \int_0^{k_v} k_{\rho} dk_{\rho} \sum_{\gamma=TE,TM} \frac{(1 - |r_{21}^{\gamma}|^2)(1 - |r_{23}^{\gamma}|^2)}{|1 - r_{21}^{\gamma} r_{23}^{\gamma} e^{2ik_z d_c}|^2} \quad (2.4)$$

Donde  $\Theta(\omega, T_i)$  es la energía media de un oscilador de Planck para una frecuencia y temperatura dada,  $r_{i,j}^{\gamma}$  es el coeficiente de reflexión de Fresnel de la interfaz entre el cuerpo i y el cuerpo j en estado polarizado  $\gamma$ , TE son las ondas eléctricas transversales y TM son las ondas magnéticas transversales, i es la constante compleja  $\sqrt{-1}$ ,  $d_c$  es la separación entre las capas y  $k_{\rho}$  es el vector de onda de la onda primaria [12].

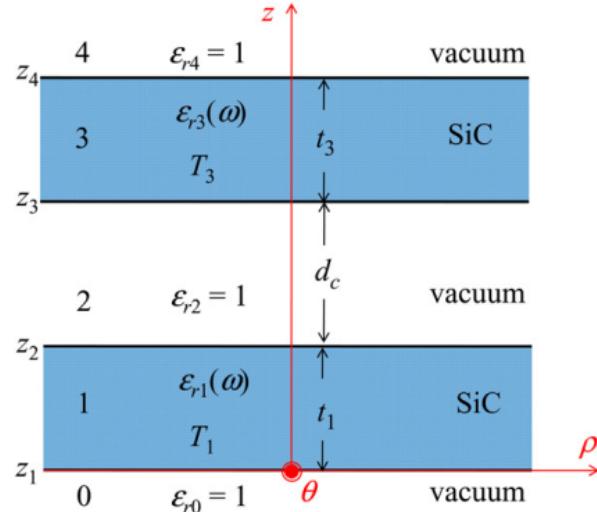


Figura 2.3: Esquemático de la representación geométrica para el flujo entre dos cuerpos separados por vacío. *Fuente: [10]*

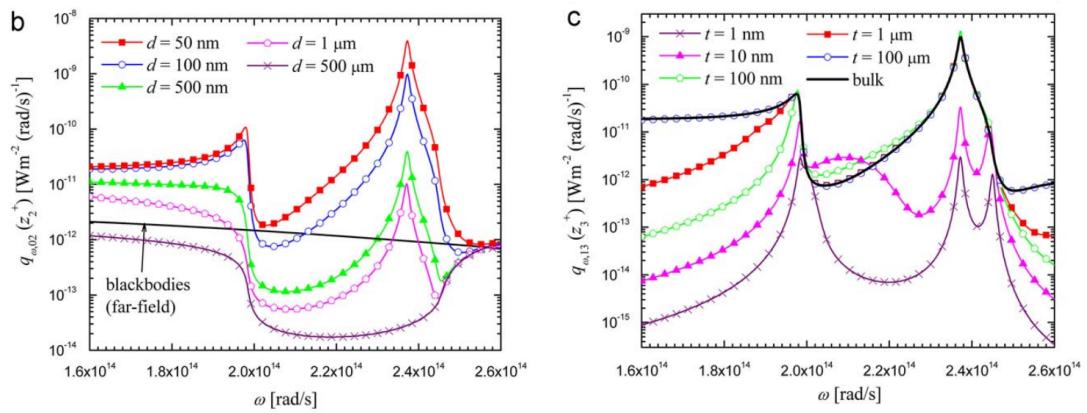
La ecuación 2.4 es para dos placas gruesas separadas por un vacío y rodeadas por vacío, se obtiene de las ecuaciones presentadas en [12], donde se presenta las ecuaciones para la radiación de campo cercano de sistemas multicapa y un método numérico para solucionar las ecuaciones.

#### Radiación evanescente o campo cercano

La radiación evanescente se transmite distancias muy pequeñas, introduciéndose un algoritmo general para el análisis de un sistema unidimensional multi-capa basado en las funciones de dyadic Green y la amplitud para cada capa es calculada con una matriz de dispersión [12], obteniéndose para el caso de dos capas gruesas separadas por vacío una distancia  $d_c$ , el flujo de la radiación evanescente [10] como :

$$q_{\omega,abs}^{evan} = \frac{\Theta(\omega, T_1)}{\pi^2} \times \int_{k_v}^{\infty} k_v dk_{\rho} e^{-2k''_{z2}d_c} \sum_{\gamma=TE,TM} \frac{Im(r_{21}^{\gamma}) Im(r_{23}^{\gamma})}{|1 - r_{21}^{\gamma} r_{23}^{\gamma} e^{2ik_{z2}d_c}|^2} \quad (2.5)$$

Siendo  $Im(r_{i,j}^{\gamma})$  el término imaginario del coeficiente Fresnel de la interfaz entre el cuerpo i y el cuerpo j en estado polarizado  $\gamma$ . La componente  $e^{-2k''_{z2}d_c}$  representa de manera explícita la caída exponencial del flujo con la distancia de separación. Una mejor representación del efecto de la radiación evanescente se puede observar en la figura 2.4a, donde a partir de cierta distancia de separación se supera el flujo de un cuerpo negro. Y se observa en la figura 2.4b como a partir de las  $100\mu\text{m}$  de grosor del emisor se puede considerar como una placa gruesa [12].



(a) flujo de radiación monocromática variando la distancia de separación d (b) flujo de radiación monocromática variando el grosor (t) del emisor

Figura 2.4: (a) Flujo de la radiación monocromática entre dos capas gruesas de cBN a 300K y 0K separadas por vacío a una distancia  $d$ , y comparados con las predicciones de dos cuerpos negros en el régimen del campo lejano. (b) Flujo de la radiación monocromática entre un emisor de grosor ( $t$ ) variable a 300K y un receptor grueso a 0K, ambos de cBN y separados por una distancia de 100nm en el vacío. *Fuente: [12]*

## Capítulo 3

# Materiales y Herramientas

En este capítulo se exponen los materiales utilizados para cada componente del sistema, las herramientas utilizadas para el modelado 3D del nano-espaciador, simulación de la transmisión de calor por conducción y simulación de transmisión de calor por radiación por campo cercano, y los motivos de uso de dichos materiales y herramientas.

### 3.1. Materiales

Se listan y desarrolla los materiales utilizados para simular cada uno de los componentes del sistema y los criterios seguidos para su eleccións.

#### 3.1.1. Nano-espaciador

Suponemos que los nano-espaciadores son de Dióxido de Silicio ( $SiO_2$ ) [3], un material que ha sido utilizado en varias ocasiones en sistemas de campo cercano de TPVs o TEC por ser un material cerámico con una baja conductividad térmica, buena resistencia ante choques de calor y alta fuerza de compresión. La conductividad térmica es menor a 10 W/m°C en el rango de temperatura de trabajo, entre 25 a 800°C.

A su vez se considera el  $SiO_2$  con tres porosidades distintas, la primera es con una porosidad del 0 %, segundo con una porosidad del 25 % y tercero con una porosidad del 50 %, calculando la nueva conductividad térmica para los casos de porosidad distinta al 0 % según el modelo CP en [28].

#### 3.1.2. Célula

Suponemos inicialmente que las células son de Silicio (Si), para llevar a cabo unos cálculos preliminares utilizando un material ampliamente conocido y utilizado en la fabricación de células fotovoltaicas. En el resto de simulaciones se utiliza Germanio (Ge), que es un semiconductor como el Si pero que es capaz de absorber una mayor cantidad de radiación por tener una banda energética (Band Gap) de 0.66eV a 300K, a diferencia del Si que es unos 1.11eV a 300K. La capacidad de absorber más radiación es importante en la termofotovoltaica porque la mayor

cantidad de radiación es infrarroja.

También se utiliza el Ge por ser el material de las células termofotovoltaicas a disposición en el Instituto de Energía Solar (IES).

### 3.1.3. Emisor

Para simular el emisor supondremos varios materiales: Silicio, Acero inoxidable 304L (SS) y Carburo de Silicio (SiC). Se utilizó Si para las pruebas de simulación iniciales para tener un punto de partida, para luego pasar al SS por ser un material que se utiliza mucho en la industria, incluyendo al transporte, y por último el SiC que es una cerámica que ha sido utilizada para el aumento de potencia de radiación en campo cercano [11].

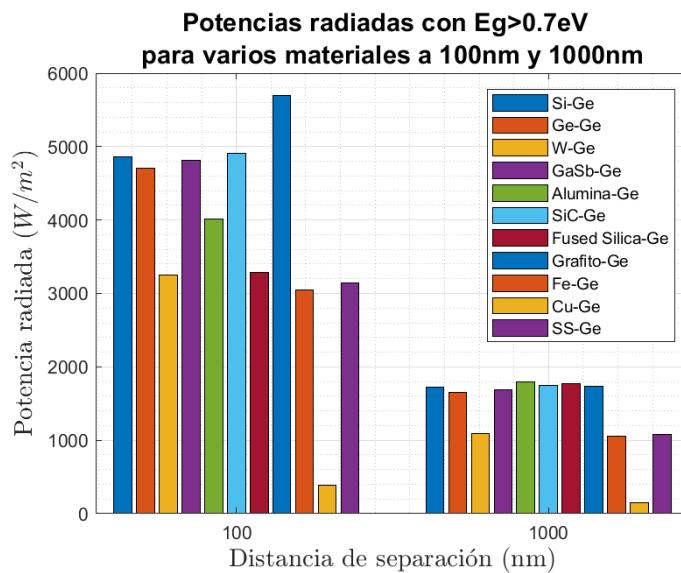


Figura 3.1: Potencias por unidad de área para una célula de Ge y diferentes materiales de emisor para un rango de longitudes de onda desde aproximadamente  $0.2 \mu m$  hasta  $1.8 \mu m$  (0.7 eV) con distancias de separación de 100nm y 1000nm según las ecuaciones de [10] calculadas a partir de las ecuaciones (2.4) y (2.5).

También se analizaron otros materiales adicionales que finalmente fueron descartados por ser muy caros, o proporcionar una baja potencia radiada (figura 3.1), etc. Dichos materiales son los siguientes:

- **Antimonio de Galio (GaSb):** Semiconductor con punto de fusión de  $710^{\circ}C$  que es menor a los  $800^{\circ}C$  que se encuentra el emisor, por lo cual no se puede utilizar porque empezará a pasar a estado líquido antes de llegar a la temperatura deseada.
- **Grafito:** es un material relativamente barato con una buena conductividad térmica, alto punto de fusión, pero es muy blando respecto al  $SiO_2$ , tiene como dureza máxima unos 50 HV (dureza Vickers) en comparación a la dureza del  $SiO_2$  de unos 500 HV, por lo cual cuando se aplique presión a los dispositivos el nano-espaciador se hará paso por el emisor.

- **Tungsteno (W):** El coste del material es medio, como máximo unos 56.4€/kg, su dureza Vickers es de unos 350 HV que es adecuada por no ser tan inferior a la del  $SiO_2$ , su conductividad térmica es más alta que la del nano-espaciador pero la potencia radiativa en campo cercano es baja, más cercana a la del acero.
- **Alumina ( $Al_2O_3$ ):** Es un material muy caro, aproximadamente 16000€/kg o más, disminuyendo considerablemente la viabilidad del sistema.

## 3.2. Herramientas

Los herramientas o programas utilizados durante el desarrollo del trabajo son variados y por diferentes motivos, a continuación se da una breve descripción y se explican los motivos de la utilización de cada programa.

Para la obtención de las propiedades ópticas y térmicas de los materiales se utilizan Granta EduPack 2021 R2, la página web Refractive Index y el resto de datos de los materiales que no se encuentren en dichas herramientas se obtienen de artículos de investigación. Para el modelado 3D se utiliza Autodesk Inventor 2021, para las simulaciones de la transmisión de calor por conducción se utiliza Autodesk CFD 2021, para la transmisión de calor por radiación se utiliza un script de Matlab que resuelve las ecuaciones (2.4) y (2.5) a partir de las propiedades ópticas (n-k datos) de los materiales implementado en la calculadora de campo cercano, y para el análisis de datos se utiliza MATLAB.

Unas herramientas a destacar son TexStudio y TexnicCenter utilizadas para la redacción de este trabajo por la facilidad que presenta el escribir ecuaciones, actualizaciones de figuras y la menor necesidad de recursos que Word. También hay que destacar el uso de Git para el control de versiones del documento.

### 3.2.1. Granta EduPack 2021 R2

Programa desarrollado por la empresa Ansys que contiene varias bases de datos que recopila información sobre distintos materiales, teniendo un fácil acceso a la información básica de los mismos a través de una interfaz gráfica (GUI) y estando organizadas de manera específica para cada base de datos. Este programa está disponible en la versión de Windows 10 del escritorio remoto de la UPM.

La base de datos utilizada es la *Level 3* de las avanzadas porque recopila los datos de todos los materiales necesarios, en la mayoría de los casos incluye la variación de algunas propiedades respecto a la temperatura, siendo principalmente necesaria la conductividad térmica del material respecto a la temperatura.

Dado la gran cantidad de datos a disposición y la facilidad de obtención de los datos de los materiales, especialmente los datos que están disponibles con la variación de la temperatura, se utiliza este programa.

### 3.2.2. Refractive Index

Esta página web (<https://refractiveindex.info>) recopila de artículos científicos los índices de refracción ( $n$ ) e índices de extinción ( $k$ ) de diferentes materiales en diferentes rangos de longitudes de onda, teniendo a disposición hipervínculos a los artículos de donde se extrajo los datos y la opción de descargar dichos datos.

Los motivos de su utilización son la facilidad para la obtención de los índices de refracción y extinción, necesarios para los cálculos del flujo térmico de radiación por campo cercano, y la disponibilidad de los artículos utilizados para contrastar los valores presentados.

### 3.2.3. Autodesk Inventor Professional 2021

Es un software de Diseño 3D Asistido por Ordenador (CAD 3D) que ofrece herramientas para el diseño de piezas, ensamblajes, mecanismos, documentación y simulación de los sistemas. También permite el utilizar herramientas de entorno añadidas para simulaciones más complejas, el fácil acoplamiento para el uso de otros programas de Autodesk y el uso de parámetros en el diseño y modelado de las piezas.



Figura 3.2: Icono de Autodesk Inventor Professional 2021

Se utiliza el programa para el modelado 3D de los nano-espaciadores, el emisor, la célula y el sistema TPV completo. Los motivos de utilización del programa son:

- Licencia estudiantil facilitada por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- Menor consumo de recursos que otros programas de modelado 3D.
- No necesita una conexión constante a internet para su uso.
- Acoplamiento con Autodesk CFD, permitiendo el lanzar modelos de Inventor a CFD.

### 3.2.4. Autodesk CFD

Es un software desarrollado por Autodesk que se usa para crear simulaciones computacional de la dinámica de fluidos para la predicción del comportamiento complejo de fluidos (líquidos y gases), el programa también simula la transmisión de calor por conducción en sólidos, convección en fluidos y de radiación.



Figura 3.3: Icono de Autodesk CFD

Se utiliza el programa para las simulaciones de transmisión de calor por conducción en vez de el entorno Nastran de Inventor por las siguientes razones:

- Utilización de escalas pequeñas de los parámetros de los materiales.
- Fácil control del mallado.
- Control de los pasos de la simulación, la frecuencia de guardado de datos y el número de iteraciones.
- Fácil obtención de los datos de los flujos de calor y las temperaturas del espacio en formato CSV.

### 3.2.5. MATLAB

MATLAB es un programa o plataforma de programación de *MathWorks* que permite desarrollar cálculos numéricos, desarrollar algoritmos, analizar datos y crear modelos matemáticos de sistemas para cálculo o simulaciones utilizando su propio lenguaje de programación. A su vez, MATLAB proporciona una tienda de paquetes donde los usuarios puede subir aplicaciones desarrolladas en MATLAB que permiten aprovechar aún más los recursos del sistema y facilitar el trabajo, ya sea analizar datos, obtener modelos matemáticos, entre otros.

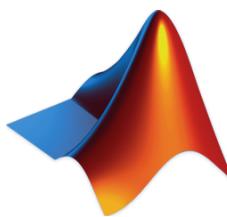


Figura 3.4: Icono de MATLAB

Se utiliza MATLAB para el análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones de transmisión de calor por conducción y radiación, para realizar gráficas, para realizar cálculos y para desarrollar la aplicación de la calculadora de campo cercano. El principal motivo de usar MATLAB es para calcular la transmisión de calor en condiciones de campo cercano.

### 3.2.6. Calculadora de campo cercano

Para las simulaciones de transmisión de calor por radiación de campo cercano entre dos placas paralelas de área infinita se utiliza un código escrito en

MATLAB que ya estaba implementado y que cumple con las ecuaciones de campo cercano para dos placas planas gruesas (ecuaciones (2.4) y (2.5)). A partir de dicho código se desarrolla una aplicación en el App Designer de MATLAB que facilita el proceso, porque mejora la interfaz de usuario y disminuye los tiempos de simulación al realizar los cálculos con hilos (Parallel Processing Toolbox), permitiendo así realizar combinaciones de materiales y distancias de manera sencilla.

Los motivos que impulsaron para desarrollar la aplicación son el simplificar el proceso de simular la radiación por campo cercano para diferentes combinaciones de materiales y distancia de separación, y la obtención de la potencia total para el rango de longitudes de onda deseadas para todas las combinaciones.

La aplicación se divide en tres pestañas *Potencia Radiada*, *Potencia* y *Materiales*. En cuanto se abre la aplicación se presenta abierta la pestaña de *Potencia Radiada* (figura 3.5), donde se seleccionan los materiales del emisor y el receptor, las distancias de separación de los cuerpos y la temperatura del emisor en grados Kelvin, ya que la del receptor es fija a 300K. También muestra la gráfica de los resultados obtenidos de la simulación para cualquier combinación excepto cuando se eligen varios materiales en un rango de distancias porque todavía no está implementado para este caso de dos rangos.

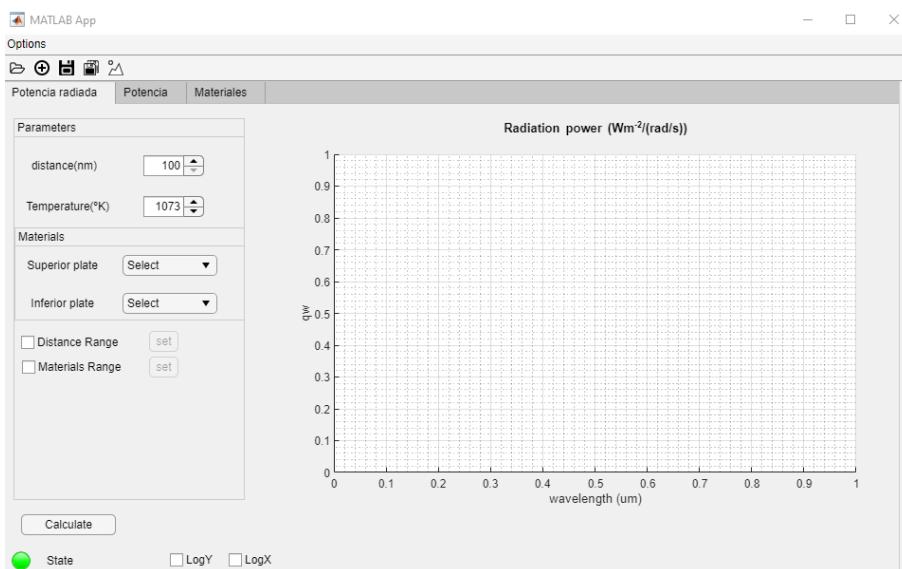
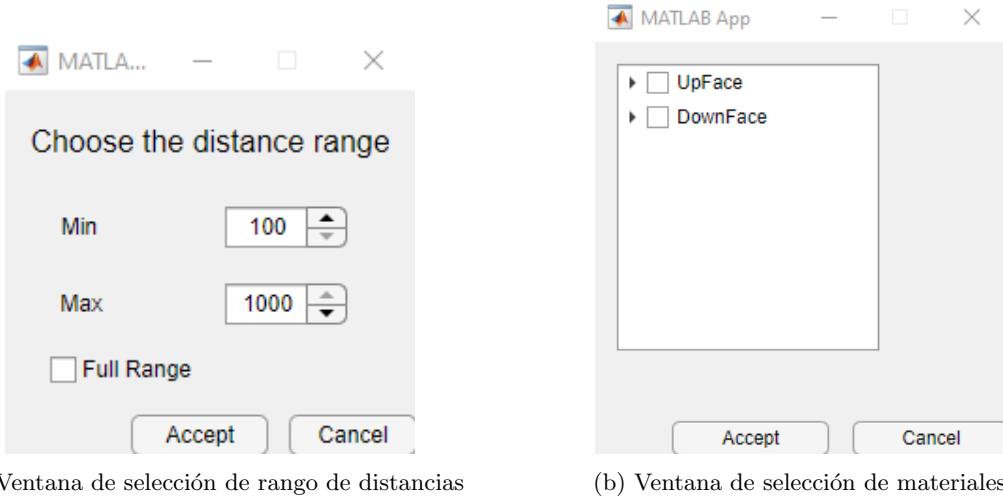


Figura 3.5: Pestaña *Potencia Radiada* de la calculadora de campo cercano

Para la selección del rango de los materiales se abre una nueva ventana de una GUI donde se utiliza dos árboles de casillas de selección para los materiales del emisor y el receptor del sistema de transmisión de calor por radiación de campo cercano (figura 3.6b). Para la selección del rango de distancias se abre una nueva ventana de una GUI donde se selecciona en múltiplos de 100 el valor máximo y el valor mínimo del rango de distancias a simular, las distancias máxima y mínima son 1000nm y 100nm respectivamente (figura 3.6a). Antes de realizar los cálculos se realiza una interpolación lineal de los valores de  $n$  y  $k$  de los materiales para que coincidan los puntos para cada longitud de onda.



(a) Ventana de selección de rango de distancias

(b) Ventana de selección de materiales

Figura 3.6: (a) Ventana para la selección del rango de las distancias de separación entre el emisor y el receptor. (b) Ventana para la selección de los materiales para el emisor y el receptor.

La pestaña de *Potencia* (figura 3.7) contiene una calculadora para pasar de electrón-voltios a longitud de onda y viceversa, unos campos para controlar el rango de longitudes de onda para realizar la integral de la potencia radiada monocromática y una gráfica para mostrar los resultados obtenidos de integrar. La integral se realiza por el método del trapezoide. Los resultados obtenidos de la potencia integrada (figura 3.7), los de la radiaciónpectral o ambos se pueden guardar en un archivo excel.

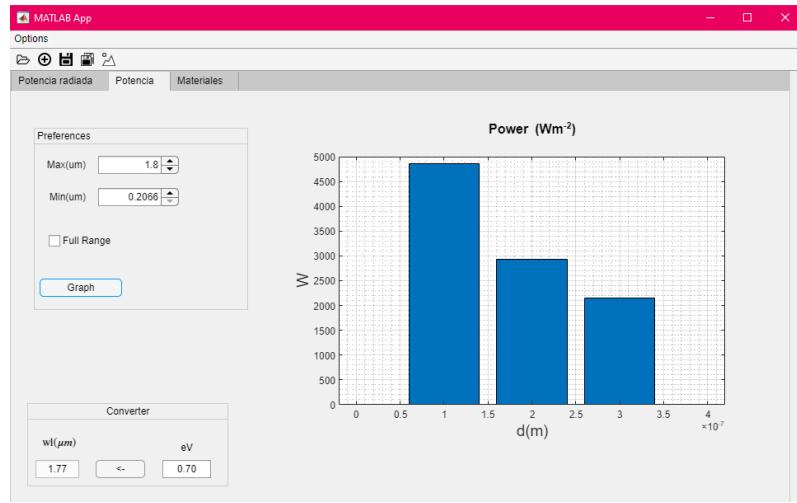
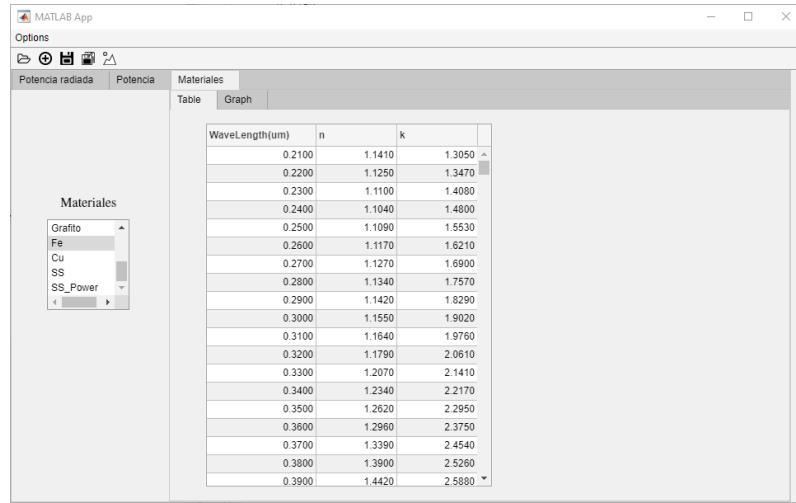


Figura 3.7: Pestaña de la Potencia

La pestaña de *Materiales* se usa para observar en una tabla o gráfica, según la pestaña interna seleccionada, los valores de *n* y *k* del material seleccionado en la lista de la izquierda, como se puede observar en la figura 3.8.



The screenshot shows a MATLAB application window with the title 'MATLAB App'. The 'Materiales' tab is active. On the left, a dropdown menu shows 'Grafito' at the top, followed by 'Fe' (which is highlighted in gray), 'Cu', 'Ss', and 'SS\_Power'. The main area contains a table with three columns: 'WaveLength(um)', 'n', and 'k'. The table data is as follows:

WaveLength(um)	n	k
0.2100	1.1410	1.3050
0.2200	1.1250	1.3470
0.2300	1.1100	1.4080
0.2400	1.1040	1.4800
0.2500	1.1090	1.5530
0.2600	1.1170	1.6210
0.2700	1.1270	1.6900
0.2800	1.1340	1.7570
0.2900	1.1420	1.8290
0.3000	1.1550	1.9020
0.3100	1.1640	1.9760
0.3200	1.1790	2.0610
0.3300	1.2070	2.1410
0.3400	1.2340	2.2170
0.3500	1.2620	2.2950
0.3600	1.2960	2.3750
0.3700	1.3390	2.4540
0.3800	1.3900	2.5260
0.3900	1.4420	2.5880

Figura 3.8: Pestaña de los datos de n y k de los materiales disponibles

Para obtener una mejor fidelidad de los resultados de la simulaciones se limita el rango de los datos dentro de las longitudes de onda que comparten todos los materiales del conjunto que se va a simular.

Cabe destacar que la aplicación sigue en fase de desarrollo y todavía no se ha terminado de agregar todas las funcionalidades deseadas, y arreglar los bugs que todavía tiene.

# Capítulo 4

## Métodos

En este capítulo se detallan los criterios seguidos para la elección de la geometría de los espaciadores y su escala, los cálculos realizados para la obtención de las propiedades de los materiales utilizados en las simulaciones de transmisión de calor por conducción según la escala utilizada en el modelado 3D del nano-espaciador, los procedimientos seguidos para realizar las simulaciones y el procedimiento seguido para la extracción de los datos de la simulación de CFD.

### 4.1. Criterios de geometría y escala

La base del nano-espaciador es cuadrada por ser la más sencilla de fabricar por deposición catódica y para realizar cálculos por ser sus ecuaciones de área y volumen la más sencilla de los polígonos regulares cerrados. El lado de la base del nano-espaciador son de  $3\mu m$  por ser la unidad mínima que se es capaz de depositar en la célula para disminuir las pérdidas por conducción.

Para el modelado 3D en Inventor se toma como distancia mínima el milímetro, correspondiente a 100nm de la realidad que es la distancia mínima de todos componentes del sistema, para el caso de altura mínima del nano-espaciador a simular.

### 4.2. Cálculos de las propiedades de los materiales para las simulaciones

Para obtener los nuevos parámetros de distancias, áreas y volúmenes del modelo 3D del nano-espaciador se procede a obtener las relaciones de escala entre el modelo y la realidad. También se obtienen las relaciones de las propiedades más significativas de los materiales de la realidad y las simulaciones de transmisión de calor por conducción, siendo la principal propiedad la conductividad térmica. Otras propiedades que se toman en cuenta son la densidad y el calor específico, teniendo que destacar la resistencia de contacto por unidad de área entre el nano-espaciador y el emisor.

Para diferenciar la realidad del modelo 3D o del modelo a simular se utilizará el apostrofe después de la variable correspondiente, por ejemplo, para la

longitud real se usa  $L$  y para la longitud en el modelo 3D se usa  $L'$ .

La relación de longitudes entre el modelo 3D y la realidad es:

$$L'/L = 1\text{mm}/100\text{nm} = 10^4 \quad (4.1)$$

#### 4.2.1. Área

La sección de los nano-espaciadores es un cuadrado cuya fórmula de área es  $A = L^2$ , donde  $A$  es el área y  $L$  el lado del cuadrado, siendo la relación de las áreas la siguiente:

$$\frac{A'}{A} = \left(\frac{L'}{L}\right)^2 = 10^8 \quad (4.2)$$

#### 4.2.2. Volumen

El volumen de un prisma de base cuadrada se expresa como  $V = A \cdot L$ , donde  $L$  es la altura del prisma.

$$\frac{V'}{V} = \frac{A' \cdot L'}{A \cdot L} = \frac{A'}{A} \cdot \frac{L'}{L} \implies \frac{V'}{V} = 10^{12} \quad (4.3)$$

El volumen de cada nano-espaciador en el modelo será  $10^{12}$  veces el volumen original.

#### 4.2.3. Densidad

La masa de cada elemento es igual entre el modelo( $M'$ ) y la realidad( $M$ ), por lo tanto la densidad varía.

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{M'/V'}{M/V} = \frac{M'}{M} \cdot \frac{V}{V'} \implies \frac{\rho'}{\rho} = 10^{-12} \quad (4.4)$$

La densidad de cada elemento en el modelo será  $10^{-12}$  veces la densidad de la realidad.

#### 4.2.4. Conductividad Térmica

La resistencia térmica de los materiales del modelo de simulación se mantiene igual a la de la realidad, por lo tanto, la conductividad térmica de los materiales en el modelo son distintas a la realidad. Sabiendo que la fórmula de la resistencia térmica de conducción es  $R = 1/k \cdot L/A$ , donde  $k$  es la conductividad térmica,  $L$  la longitud y  $A$  es la sección, se puede obtener la relación de las conductividades térmicas del modelo de simulación respecto a la realidad.

$$\begin{aligned} \frac{R}{R'} &= \frac{1/k}{1/k'} \cdot \frac{L/A}{L'/A'} = \frac{k'}{k} \cdot \frac{L}{L'} \cdot \frac{A'}{A} = 1 \\ \frac{k'}{k} &= \frac{L'}{L} \cdot \frac{A}{A'} = \frac{10^4}{10^8} \implies \frac{k'}{k} = 10^{-4} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Para el caso del nano-espaciador de  $SiO_2$  que puede presentar diferentes porosidades para el material, se multiplica la conductividad térmica por la conductividad térmica normalizada para dicha porosidad [28].

#### 4.2.5. Calor Específico

El calor específico de los materiales del modelo de simulación es el mismo que el de la realidad porque el calor específico se define como la cantidad de calor necesaria que hay que suministrar a una unidad de masa para elevar su temperatura en una unidad, como la masa del modelo de simulación es igual a la de la realidad, la cantidad de energía necesaria para elevar una unidad de temperatura va a ser igual al del modelo de simulación respecto a la realidad, por lo tanto, el calor específico se mantiene igual al de la realidad.

#### 4.2.6. Resistencia de contacto

La resistencia de contacto ( $R_c$ ) es difícil de modelar matemáticamente en una ecuación ya que depende de muchas variables, como la temperatura, presión, entre otros. La resistencia térmica producida por la resistencia de contacto es  $R_{th} = R_c/A$ , donde  $A$  es la superficie de contacto, por lo tanto se ve afectado por la diferencia de escala entre el modelo de simulación y la realidad.

$$\begin{aligned} \frac{R'_{th}}{R_{th}} &= \frac{R'_c}{R_c} \cdot \frac{A}{A'} = 1 \\ \frac{R'_{th}}{R_{th}} &= \frac{R'_c}{R_c} \cdot \frac{A}{A'} = 1 \implies \frac{R'_c}{R_c} = \frac{A'}{A} = 10^8 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Para los casos que la resistencia de contacto es presentada como conductancia de contacto según un modelo matemático [21], según la ecuación de Cooper reducida por Yovanovich (ecuación (4.7a)).

$$\frac{P}{H_c} = \left[ \frac{P}{c_1 (1,62\sigma/m)^{c_2}} \right]^{\frac{1}{2+0,071c_2}} \quad (4.7a)$$

$$\frac{h_c\sigma}{k_s m} = 1,25 \left( \frac{P}{H_c} \right)^{0,95} \quad (4.7b)$$

Donde  $c_1$  es 10.6 GPa,  $c_2$  es -0.40,  $\sigma$  es la combinación RMS de la rugosidad de ambas superficies de los materiales con  $\sigma_i$  siendo la rugosidad de la superficie  $i$  (ecuación (4.8a)),  $m$  es la combinación RMS de la media absoluta de la pendiente de la rugosidad con  $m_i$  siendo la media de la pendiente absoluta de la rugosidad de la superficie  $i$  (ecuación (4.8b)),  $H_c$  es la micro-dureza Vickers del material más duro y  $P$  es la presión aplicada [21].

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (4.8a)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (4.8b)$$

Las ecuaciones son para la conductancia de contacto ( $h_c$ ) entre dos aceros inoxidables 304(SS304), entonces para tener una mejor idea como la resistencia de contacto afecta a la conducción de calor se supone que el nano-espaciador de  $SiO_2$  es liso, por ende, su  $m_i$  y su  $\sigma_i$  son nulas. Por lo tanto, se calcula la relación de las ecuaciones para el caso de los dos aceros y para el caso de SS- $SiO_2$ .

Como se puede observar en las ecuaciones 4.7, el valor de  $\sigma$  y  $m$  se presentan siempre relacionados como  $\sigma/m$ , y se cumple que  $\sigma/m = \sigma'/m'$  porque al suponer que el caso de dos aceros tienen idénticas  $m_i$  y  $\sigma_i$ , la relación  $\sigma/m$  queda como  $\sigma_i/m_i$ , que resulta ser la misma relación para el caso de SS- $SiO_2$ .

$$\frac{\sigma}{m} = \frac{\sqrt{\sigma_{SS}^2 + \sigma_{SS}'^2}}{\sqrt{m_{SS}^2 + m_{SS}'^2}} = \frac{\sigma_{SS}\sqrt{2}}{m_{SS}\sqrt{2}} = \frac{\sigma_{SS}}{m_{SS}}$$

$$\frac{\sigma'}{m'} = \frac{\sqrt{\sigma_{SS}'^2 + 0^2}}{\sqrt{m_{SS}'^2 + 0^2}} = \frac{\sigma_{SS}}{m_{SS}}$$

Por lo tanto, considerando que  $c_1$  y  $c_2$  no varían con el cambio de material la relación de  $h'_c$  respecto a  $h_c$  se obtiene relacionando la ecuación (4.7b) del modelo a simular con la realidad.

$$Cte = 1,25 \frac{m}{\sigma} \cdot \left( \frac{P}{H_c} \right)^{0,95}$$

$$h_c = k_s \cdot Cte \quad k_s = 2 \cdot \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}$$

Donde  $Cte$  es una constante que es igual para el caso de los aceros y el caso SS- $SiO_2$ . El valor de  $k_s$  para el caso de los aceros es  $k_{SS}$ , siendo  $k_{SS}$  la conductividad térmica del acero inoxidable 304.

$$\frac{h'_c}{h_c} = \frac{k'_s}{k_s} \cdot \frac{Cte}{Cte} = \frac{2 \cdot \frac{k_{SS} \cdot k_{SiO_2}}{k_{SS} + k_{SiO_2}}}{k_{SS}}$$

$$\frac{h'_c}{h_c} = 2 \cdot \frac{k_{SiO_2}}{k_{SS} + k_{SiO_2}} \quad (4.9)$$

Para este trabajo los datos utilizados de las conductividades térmicas de los materiales para la relación de las conductancias de contacto son a temperatura ambiente, el valor de  $k_{SiO_2}$  es  $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  y el valor de  $k_{SS}$  es de  $15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , quedando la relación de conductancias de contacto como  $h'_c/h_c = 0,1818$ .

### 4.3. Procedimientos de las simulaciones y extracción de resultados

A continuación se describen los procedimientos seguidos en este trabajo para la realización de la simulación de la transmisión de calor por radiación de campo cercano, la simulación de la transmisión de calor por conducción y la extracción de los datos de las simulaciones.

#### 4.3.1. Para la radiación de campo cercano

Hay cuatro casos de simulaciones de transmisión de campo cercano que se puede realizar, para este trabajo se realizó una simulación de la combinación de varios materiales con un rango completo de distancias. Para realización de las simulaciones de transmisión de calor por campo cercano de este trabajo, obteniéndose la potencia radiada y la potencia, se siguen los siguientes pasos:

1. Abrir la aplicación de la Calculadora de campo cercano.
2. Seleccionar la cajetilla de **Materials Range** (figura 4.1b).
3. Seleccionar la cajetilla de **Distance Range** (figura 4.1a).



Figura 4.1: (a) Casilla para la selección de la opción de simular un rango de distancias. (b) Casilla para la selección de la opción de simular una combinación de materiales.

4. Hacer clic en el **set** de **Materials Range**.
5. Seleccionar los materiales para el emisor (UpFace) y la célula (DownFace), y hacer clic en aceptar (figura 4.2b).
6. Hacer clic en el **set** de **Distance Range**.
7. Seleccionar el rango de distancias a simular de 100 a 1000 o seleccionar la casilla **Full Range** y hacer clic en aceptar (figura 4.2a).

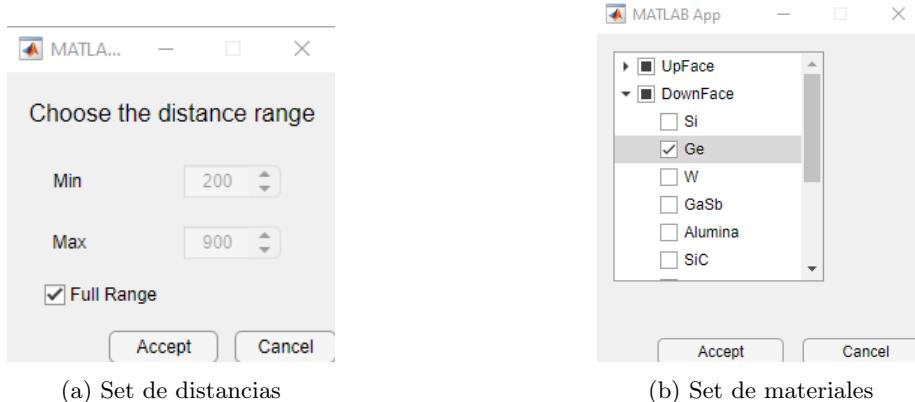


Figura 4.2: (a) Ventana para la selección del rango de distancias a simular. (b) Ventana para la selección de las combinaciones de materiales a simular, siendo **UpFace** el emisor y **DownFace** la célula.

8. Asegurar que la temperatura del emisor sea la deseada.
9. Hacer clic en el botón **Calculate** para lanzar la simulación.
10. Esperar que el indicador de estado pase de *Running...*, color rojo del indicador (figura 4.3b), a *StdBy*, color verde del indicador (figura 4.3c), es decir, esperar que termine la simulación.

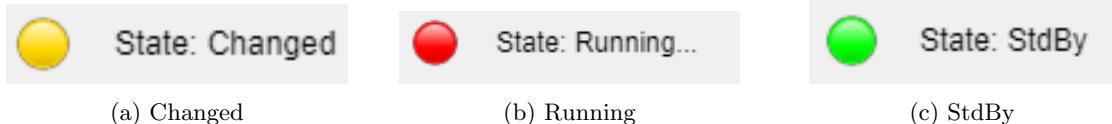


Figura 4.3: Indicadores del estado actual del sistema. (a) Indicador del estado **Changed** o estado de cambio, se activa cuando se produce algún cambio en los datos seleccionados para simular. (b) Indicador del estado **Running** o corriendo, se activa cuando estando en el estado **Changed** se hace clic al botón **Calculate** y corre la simulación. (c) Indicador del estado **StdBy**, se activa cuando termina la simulación, avisando que está a la espera de algún cambio.

11. Ir a la pestaña de **Potencia**.
12. Introducir el rango de longitudes de onda para calcular la potencia por unidad de área, siendo elegido desde el mínimo hasta  $1.8 \mu m$  que es el rango de longitudes de onda que absorbe la célula de Ge (figura 4.4).
13. Hacer clic en el botón **Graph** para calcular y graficar las potencias (figura 4.4).

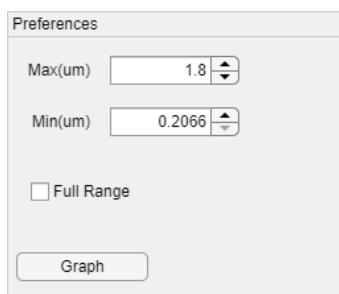


Figura 4.4: Preferencias para el cálculo de la potencia

El procedimiento seguido en este trabajo se encuentra detallado paso a paso en el Apéndice xxxx. Para la extracción de los datos obtenidos de potencia por unidad de área se hace clic sobre el botón de **guardar** (figura 4.5a) estando en la pestaña **Potencia**, para guardar la potencia radiada se hace clic del botón de **guardar** estando en la pestaña de **Potencia Radiada** y para guardar todos los datos se hace clic sobre el botón de **guardar todos** (figura 4.5b).

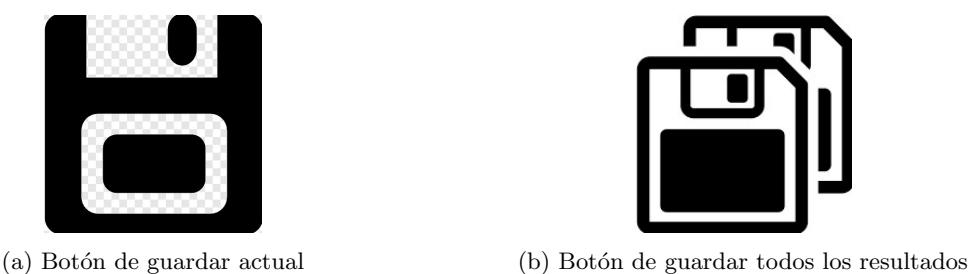


Figura 4.5: (a) Botón de guardar los resultados obtenidos de los cálculos o la simulación, dependiendo de la pestaña que se encuentre el usuario de la calculadora de campo cercano. (b) Botón de guardar todos los resultados obtenidos de los cálculos y simulación.

#### 4.3.2. Para la conducción térmica

Las simulaciones de transmisión de calor por conducción se realizaron todas en CFD, existiendo unos 10 casos para cada combinación de materiales y resistencias de contacto, para cada uno de ellos se sigue un mismo conjunto de pasos.

Primero hay que crear el modelo 3D de cada componente del sistema TPV a simular, siendo cada uno de ellos es un prisma de sección cuadrada. El nano-espaciador tiene de base un cuadrado de lado  $3 \mu m$  y de altura variable  $h$ , el emisor y la célula tiene el mismo modelo 3D, con base cuadrada de 1mm de lado con 0.2mm de altura. Para el cálculo de las longitudes del modelo 3D se utiliza la ecuación (4.1).

##### Procedimiento modelado 3D

El procedimiento seguido para la obtención de los modelos 3D en Inventor y la creación del modelo de simulación inicial para cada altura del nano-espaciador es:

1. Crear las bases cuadradas con la longitud de lado respectiva, 10m para emisor o célula y 3cm para el nano-espaciador en la escala del modelo 3D en Inventor.
2. Extrudir el prisma la longitud correspondiente, 2m para el emisor/célula y  $h_0$  para el nano-espaciador, siendo  $h$  un valor inicial cualquier en el rango de 1mm a 10mm.
3. Crear un ensamblaje de emisor-espaciador-célula, estando la base del nano-espaciador en el centro de las bases de los otros dos componentes (figura 4.6).
  - a) Agregar el nano-espaciador y los dos prismas de 10m de lado.
  - b) Renombrar los prismas de 10m de lado, una siendo emisor y la otra célula, para así diferenciarlas.
  - c) Obtener el centro de la cara superior de la célula, mediante un dibujo con dos rectas secantes que van de una esquina a otra (figura 4.6c).
  - d) Aplicar una restricción con la opción **Mate** de separación nula entre la cara inferior del nano-espaciador con el centro de la cara superior de la célula, es decir, las caras entran en contacto si la distancia de separación es nula (figura 4.6c).
  - e) Aplicar una restricción **Mate** de separación nula entre la cara inferior del emisor y la cara superior del nano-espaciador.
  - f) Aplicar una restricción **Flush** de separación nula a una cara lateral del emisor y una cara lateral de la célula.
  - g) Repetir el paso anterior para las caras conjuntas, siendo el resultado final el de la figura 4.6a.

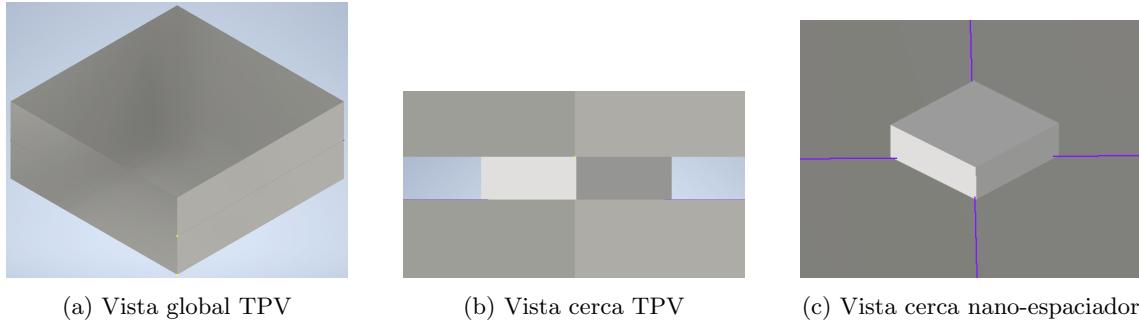


Figura 4.6: Vistas del sistema TPV. (a) Vista de lejos del sistema completo de la TPV. (b) Vista del sistema TPV de cerca desde un borde. (c) Vista del nano-espaciador colocado sobre el centro de una cara de la célula.

4. Guardar el ensamblaje.
5. Usar el **Active Model Assessment Tool**, que se encuentra en la pestaña de simulaciones, para generar el modelo o estudio de simulación de CFD.
6. Al abrirse CFD hacer clic en *Transfer to Set Up*, dar un nombre y lanzar.
7. Guardar el modelo o estudio de CFD .
8. Ir al ensamblaje en Inventor.
9. Hacer clic derecho sobre el ícono del objeto correspondiente al nano-espaciador en el panel **model** y hacer clic en editar.
10. Hacer clic derecho sobre la extrusión y seleccionar la opción de editar característica (**Edit Feature**).
11. Modificar la altura del nano-espaciador y al terminar hacer clic en **Return** .
12. Repetir desde el paso 5 al 11, excepto en la última iteración que es hasta el paso 7, incluido.

#### Procedimiento simulación CFD

El procedimiento a seguir para cada modelo de la simulación de transmisión de calor por conducción en CFD es el siguiente:

1. Abrir el modelo o estudio correspondiente de simulación en CFD.
2. Seleccionar el emisor y cambiar el material por defecto por el que se va a simular a escala.
3. Seleccionar el entorno del material del emisor como variable.
4. Seleccionar la célula y cambiar el material por defecto por el que se va a simular a escala.
5. Seleccionar el entorno del material de la célula como variable.
6. Hacer zoom sobre el nano-espaciador, seleccionarlo y cambiar el material por defecto por el *SiO<sub>2</sub>* a escala.

7. Seleccionar el entorno del material del nano-espaciador como variable.

**8. En el caso que la resistencia de contacto no sea nula:**

- a) Esconder el emisor.
- b) Seleccionar el selector de superficies.
- c) Seleccionar la superficie superior del nano-espaciador, es decir, la superficie que hace contacto con el emisor.
- d) Cambiar el material por defecto por la resistencia de contacto a escala.
- e) Seleccionar el selector de volúmenes.
- f) Mostrar el emisor.



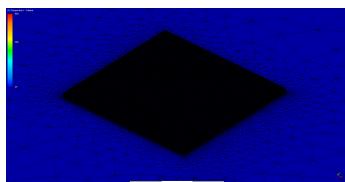
(a) Panel principal



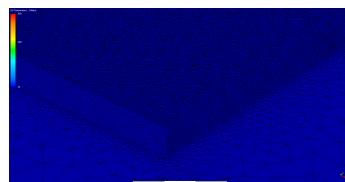
(b) Panel de resultados

Figura 4.7: (a) Panel de las herramientas utilizadas para aplicar materiales, condiciones de contorno, lanzar simulaciones, seleccionar el selector de superficies y volúmenes. (b) Paneles de las herramientas utilizadas para la extracción de resultados de las simulaciones de transmisión de calor por conducción.

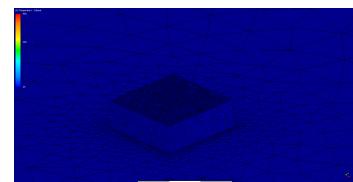
9. Seleccionar la cara superior del emisor y agregar como condición de contorno una temperatura constante de 800°C.
10. Seleccionar la cara inferior de la célula y agregar como condición de contorno una temperatura constante de 25°C.
11. Seleccionar la función de mallado.
12. Aplicar un mallado de tamaño de 0.01 o más al nano-espaciador, el valor del mallado varía según la altura del nano-espaciador, aumentando al aumentar la altura del nano-espaciador (figura 4.8).
13. Aplicar un mallado de tamaño entre 40 y 60 a los demás componentes de la TPV.



(a) Mallado del nano-espaciador de 100nm



(b) Mallado del nano-espaciador de 100nm de cerca



(c) Mallado del nano-espaciador de 1000nm

Figura 4.8: (a) Mallado del nano-espaciador de 100nm, con tamaño de malla de 0.01. (b) Mallado del nano-espaciador de 100nm visto de cerca. (c) Mallado del nano-espaciador de 1000nm, con tamaño de malla de 0.1.

14. Hacer clic en **Solve** (figura 4.7a).

15. Seleccionar en la pestaña **Physics** la casilla de **Heat transfer** (4.9b) .

16. Ir a la pestaña **Control** (figura 4.9a).
17. Poner el guardado de los resultados de la simulación a la mitad del número de iteraciones.
18. Hacer unas 10 a 14 iteraciones asegurándose que continua desde la iteración cero.
19. Correr la simulación dando click al botón de **Solve** dentro de la ventana del lanzar la simulación.

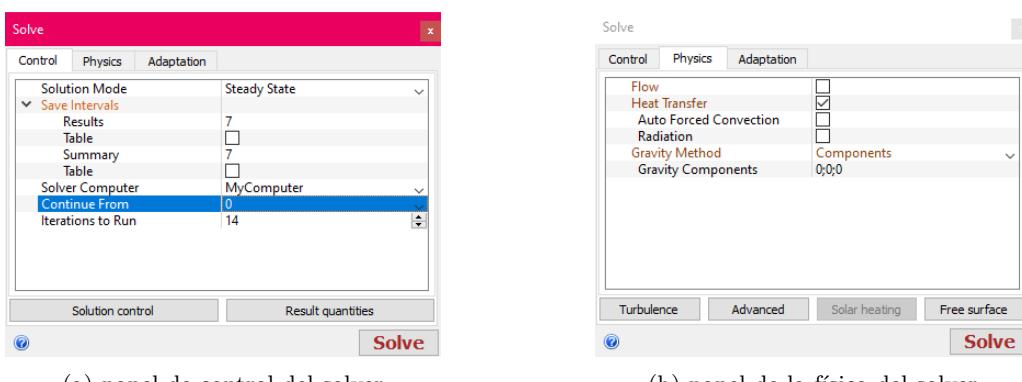
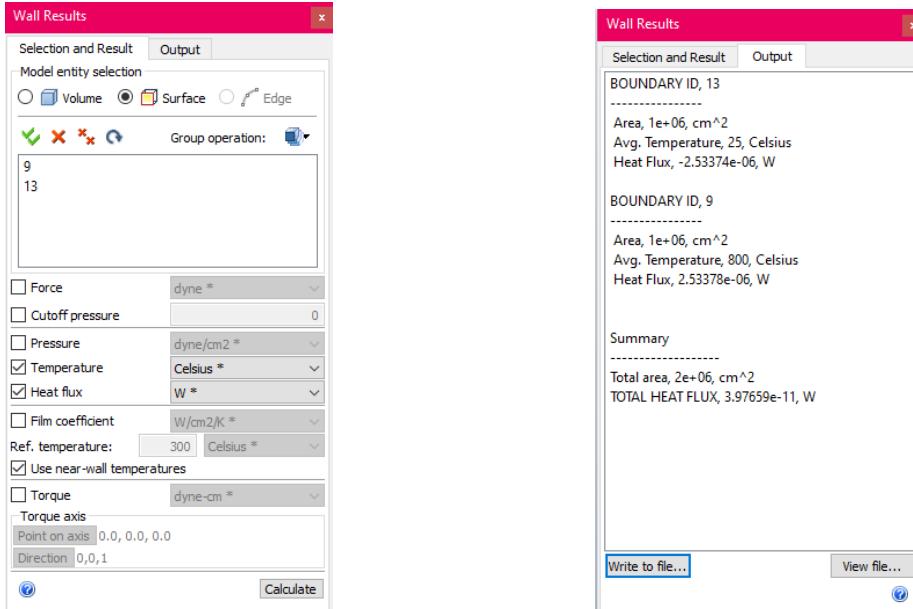


Figura 4.9: (a) Panel de control de la ventana del Solver.(b) Panel de las propiedades físicas de la ventana del Solver.

20. Esperar a que la simulación termine. Un mensaje aparecerá en la ventana de salidas de que la simulación ha finalizado.
21. **Extraer los datos de la simulación en un archivo CSV.**
  - a) Abrir la herramienta **Wall Calculator** con un clic (figura 4.7b).
  - b) Seleccionar las casillas de potencia y temperatura.
  - c) Seleccionar la opción de superficie del **Model entity selection**.
  - d) Seleccionar la superficie superior del emisor y la inferior de la célula, aparecerá los números correspondientes a dichas superficies en el **Wall Calculator** (figura 4.10a).
  - e) Hacer clic en **Calculate**, esto nos llevará a la pestaña de **Output**.
  - f) Hacer clic en **Write to file** y guardar el archivo de salida que contiene las potencias y temperaturas medias de las superficies seleccionadas (figura 4.10b).



(a) Pestaña de selección y resultados.

(b) Pestaña de salida.

Figura 4.10: (a) Pestaña de selección y resultados del **Wall Calculator**. (b) Pestaña de salida del **Wall Calculator**.

22. Repetir los pasos anteriores para cada combinación de materiales y resistencias de contacto sin tener que volver a introducir las condiciones de contorno o volver a configurar el mallado.
23. Repetir los pasos anteriores para cada altura del nano-espaciador.



## Capítulo 5

# Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de transmisión de calor por conducción de un sistema TPV de un nano-espaciador y radiación por campo cercano entre dos placas paralelas a 800°C el emisor y 25°C la célula. A su vez se representa las relaciones entre la potencia radiada vs la potencia conducida por cantidad de espaciadores y por distancia de separación en un sistema de emisor y célula de 1cm<sup>2</sup>.

- Primero se comprueba si el procedimiento de extracción de datos de la simulación de transmisión de calor por conducción en CFD es adecuado y no presenta un error relativo significativo respecto a la teoría.
- Se presentan los resultados de las simulaciones de transmisión de calor por conducción y por radiación de campo cercano para diferentes combinaciones de materiales de emisor y célula, y la relación entre ambas simulaciones.
- Se estudia el número mínimo de espaciadores necesarios para soportar la carga de los emisores.
- Por último, se presentan los resultados de usar un nano-espaciador de *Si* en vez de *SiO<sub>2</sub>* para emisores de *Si* y *SS*.

### 5.1. Comprobación del procedimiento de extracción de resultados de CFD

El procedimiento de extracción de resultados de CFD está definido en el punto 21 del capítulo 4 y para su comprobación se procede a realizar una simulación en CFD donde el emisor y la célula son de *Si* y el nano-espaciador de *SiO<sub>2</sub>* con las características constantes a 25°C, con la base cuadrada de 1 mm<sup>2</sup> y la altura del nano-espaciador a unos 1000nm, todo con la escalas correspondientes aplicadas.

La conductividad térmica ( $\sigma$ ) del *Si* es 182.977 W/m°C y la del *SiO<sub>2</sub>* es 1.30067 W/m°C ambas a 25°C. De la simulación se extrae que el flujo de calor del sistema y la temperatura media máxima y mínima de las superficies de contacto del nano-espaciador con los otros componentes del sistema.

La temperatura media máxima del nano-espaciador es 792.601°C, la temperatura

media mínima del nano-espaciador es  $32.3903^\circ\text{C}$  y el flujo de calor es  $0.00889793\text{ W}$ . Con los resultados de las temperaturas medias del nano-espaciador se obtiene un flujo de calor teórico de  $0.00889905\text{ W}$ , obteniéndose un error relativo aproximado del 0.0126 %, por lo tanto el procedimiento es apropiado para la obtención de los resultados de las simulaciones de transmisión de calor por conducción.

## 5.2. Resultados de las simulaciones para una TPV de Si-SiO<sub>2</sub>-Si

A continuación se estudian los efectos de la resistencia de contacto y la porosidad sobre un sistema sencillo compuesto por un emisor de *Si* de  $1\text{ mm}$  lado y  $0.2\text{ mm}$  de altura con la cara superior a  $800^\circ\text{C}$ , un nano-espaciador de  $3\text{ }\mu\text{m}$  de lado y una célula de *Si* de las mismas dimensiones que el emisor con la cara inferior a  $25^\circ\text{C}$ .

### 5.2.1. Efectos de la resistencia de contacto sobre la conducción

La resistencia de contacto usada es de unos  $4 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2\text{K/W}$  [17] que es aplicada a la superficie superior del nano-espaciador que entra en contacto con la superficie inferior del emisor, solo se considera en dicha superficie porque el nano-espaciador será depositado sobre la superficie de la célula en la fase de fabricación.

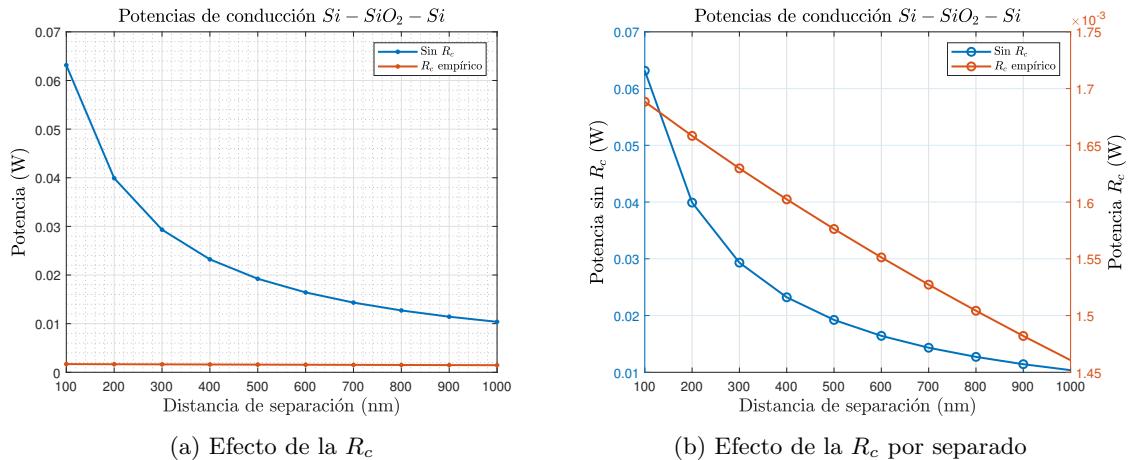
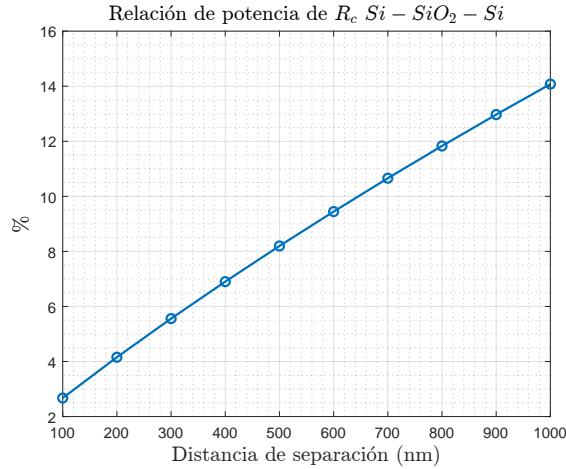


Figura 5.1: Gráficas de los efectos de la porosidad y de la resistencia de contacto sobre el flujo de calor por conducción. (a,b) Comparación de la potencia conducida de un nano-espaciador sin  $R_c$  y con  $R_c$  en un mismo eje (a) y en dos ejes (b)

Para un área de  $9\mu\text{m}^2$  la resistencia de contacto total es aproximadamente de  $444,44 \cdot 10^3\text{ K/W}$  comparada con los  $85,43 \cdot 10^3\text{ K/W}$  de la mayor resistencia que presenta el nano-espaciador con  $1000\text{nm}$  de altura a  $25^\circ\text{C}$  es al menos 5 veces más grande, por lo cual, como se observa en las figuras 5.1a y 5.1b la resistencia de contacto constante domina sobre la resistencia del nano-espaciador dando así la forma aproximada de una recta porque la mayor caída de temperatura se dá en la superficie de contacto, evitando que aumente la temperatura del nano-espaciador variando menos su resistencia térmica, por ende, dependerá principalmente de la altura del nano-espaciador.

Figura 5.2: Relación de la potencia de la  $R_c$  respecto a sin  $R_c$ 

La disminución de flujo de calor por conducción es significativa para todos los casos, siendo la potencia de conducción con  $R_c$  variando aproximadamente entre un 3 % y un 14 % de la potencia sin  $R_c$ , lo que implica una disminución de conducción de unos 97 % y 85 %.

Hay que tomar en cuenta que la resistencia de contacto en la realidad no es constante con la temperatura a diferencia de las simulaciones en CFD donde la  $R_c$  es constante, pero sirve para tener una primera idea de su importancia en la eliminación de la transferencia de calor por conducción.

### 5.2.2. Efecto de la porosidad sobre la conducción

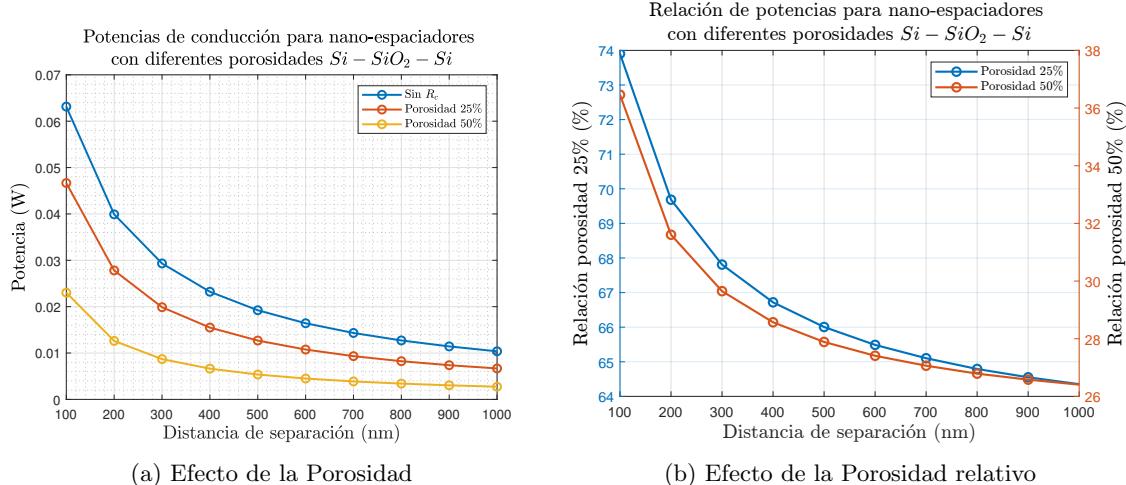


Figura 5.3: Gráficas de los efectos de la resistencia de contacto sobre el flujo de calor por conducción. (a) Efecto del grado de porosidad del  $SiO_2$  sobre el flujo de calor por conducción para unos 0 %, 25 % y 50 %. (b) Relación de los efectos de la porosidad en la transmisión de calor por conducción respecto a la porosidad del 0 %.

Para diferentes porosidades la conductividad térmica varía, disminuyendo con el aumento del grado de porosidad [28], por este motivo la potencia de conducción

disminuye para todas las alturas de nano-espaciador. La relación o conductividad térmica normalizada para una porosidad del 25 % y 50 % son respectivamente 0.64 y 0.25 veces la conductividad térmica del material [28].

Como se puede observar en las figuras 5.1a y 5.1b las relaciones de potencia no se cumplen completamente porque la temperatura en todo el nano-espaciador no es la misma lo que produce que la conductividad térmica a lo largo del espaciador sea distinta. Por tal motivo, al disminuir la altura del nano-espaciador aumenta la relación porque aumenta el gradiente de temperatura.

Utilizando la aplicación **Curve Fitting** de MATLAB se obtiene un modelo matemático que relaciona la potencia de conducción respecto a la altura del nano-espaciador ( $d$ ) y la porosidad del material del nano-espaciador ( $\rho$ ), como se muestra en la ecuación (5.1) donde  $d$  es en nanómetros.

$$P(d, \rho) = \frac{16,47 \cdot \rho - 11,03}{d - 106,80 \cdot \rho + 74,68} \quad (5.1)$$

### 5.2.3. Radiación de campo cercano

Para la radiación por campo cercano se utiliza la **calculadora de campo cercano** para dos placas gruesas de *Si* para varias separaciones entre ellas. La radiación monocromática o potencia de radiación monocromática aumenta con la disminución de la distancia de separación como lo indica el componente exponencial en la ecuación (2.5) de [10], como se puede observar en la figura 5.4.

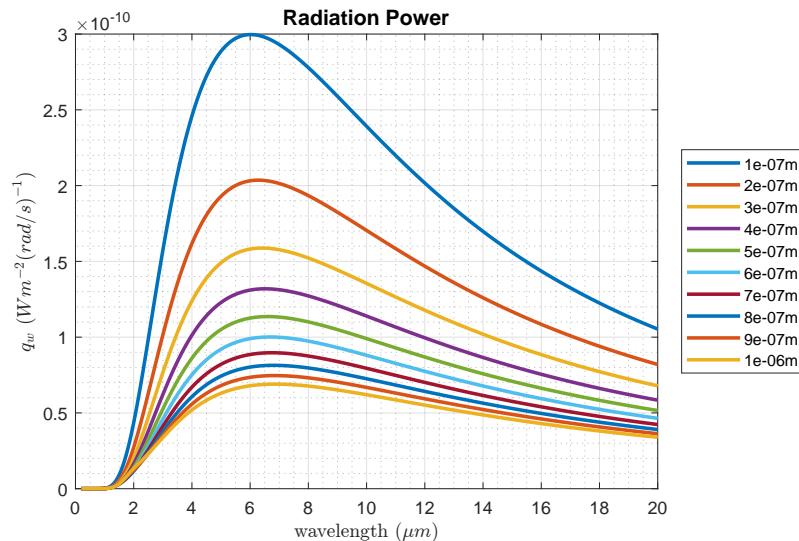


Figura 5.4: Potencia de radiación monocromática para dos placas gruesas planas de *Si* separadas diferentes distancias ( $d$ ) en metros.

Realizando la integral de la potencia monocromática en el rango de longitudes de onda con energías mayores a 1.1 eV, energía de banda del *Si*, se obtiene en promedio potencias del orden de  $60 \text{ W/m}^2$  (figura 5.5a) a diferencia de todo el rango disponible, hasta las  $\sim 20 \mu\text{m}$ , cuyo orden es de  $10^4 \text{ W/m}^2$  (figura 5.5b), desaprovechándose una gran cantidad de energía.

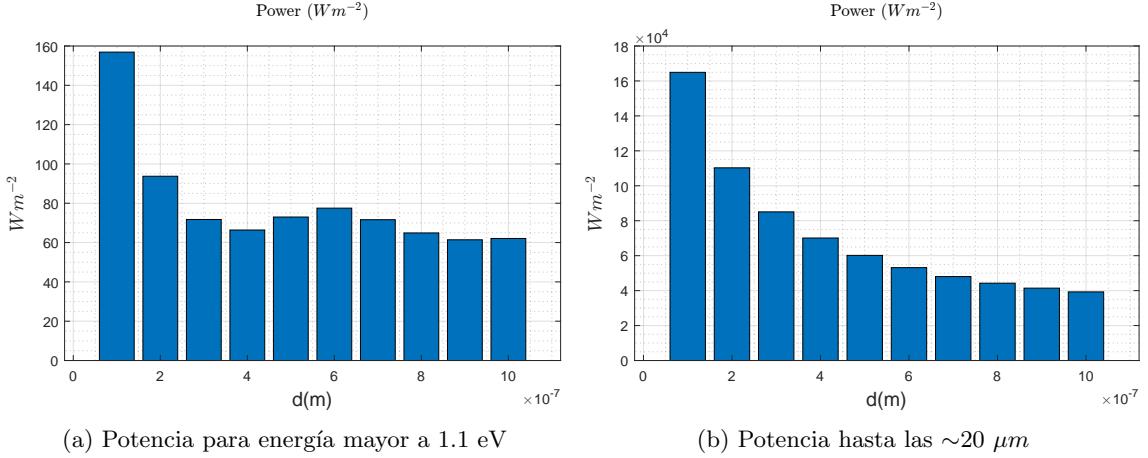


Figura 5.5: (a) Potencia por unidad de área transmitida por radiación por efecto de campo cercano para radiación monocromática de energía mayor a los 1.1 eV. (b) Potencia por unidad de área transmitida por radiación por efecto de campo cercano para radiación monocromática en todo el rango de longitudes de onda disponible.

Las potencias obtenidas para el rango de longitudes de onda mayor a la banda energética del *Si* son muy pequeñas (figura 5.5a), produciendo que no sea viable este sistema porque las pérdidas por conducción son demasiado grandes para 10 nano-espaciadores o más en el mejor caso con resistencia de contacto (figura 5.6b).

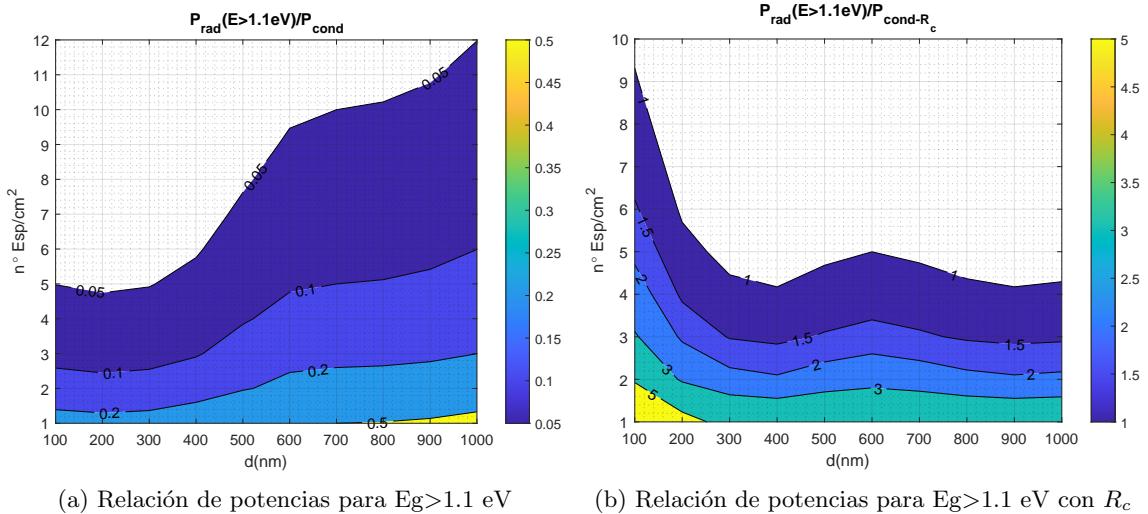


Figura 5.6: Relación de las potencias de radiación y conducción para un sistema TPV de  $1cm^2$  y célula de *Si*. (a) Relación de las potencias para  $Eg > 1.1$  eV y si  $R_c$ . (b) Relación de las potencias para  $Eg > 1.1$  eV y con  $R_c$  [17].

Por lo tanto se procede a calcular la potencia por unidad de área de la radiación en el rango de longitudes de onda de energías mayor e igual a 0.7 eV (banda energética del *Ge*), utilizándose estos nuevos resultados para el resto de comparaciones para así tener una primera referencia de como será el sistema TPV en la realidad.

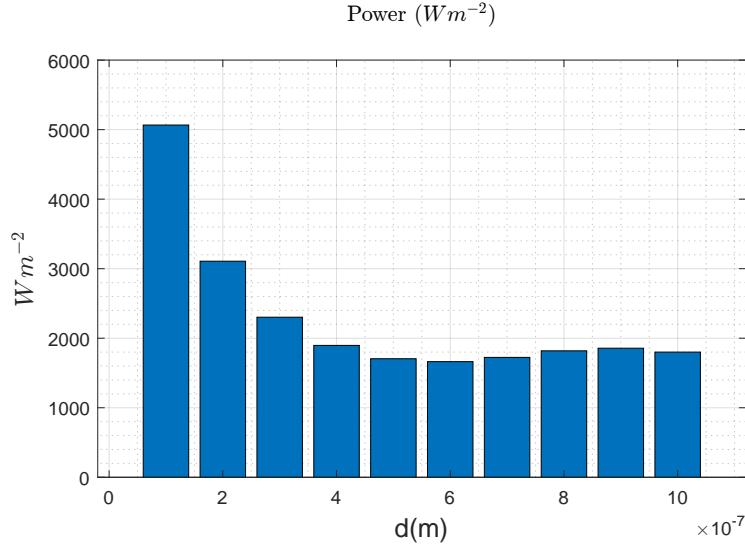


Figura 5.7: Potencia por unidad de área de la radiación por campo cercano en el rango de longitudes de onda de energía mayor e igual a 0.7eV.

Como se puede observar en la figura 5.7 al aumentar el rango de integración o disminuir la banda energética, aumenta la potencia que llega por radiación, lo que produce el aumento de energía que se puede convertir en electricidad.

#### 5.2.4. Relación de transmisión por conducción y radiación

Para tener una primera mejor idea de los valores numéricos de los resultados obtenidos de las simulaciones de transmisión de calor por conducción y radiación de campo cercano se recolectan en la tabla 5.1, estando en notación científica y con los decimales necesarios para una clara diferenciación de los resultados con el cambio de la distancia de separación entre emisor y célula.

Dist. (nm)	Potencias según como se transmite el calor					
	Conducción (W/nº nano-espaciadores)				Radiación (W/m²)	
	$P_{Normal}$	$P_{R_c-Empirico}$	$P_{Porosidad25}$	$P_{Porosidad50}$	$P_{Eg>0,7eV}$	$P_{full}$
100	6,31E-02	1,69E-03	4,67E-02	2,30E-02	5,07E+03	1,65E+05
200	3,99E-02	1,66E-03	2,78E-02	1,26E-02	3,11E+03	1,10E+05
300	2,93E-02	1,63E-03	1,99E-02	8,69E-03	2,30E+03	8,51E+04
400	2,32E-02	1,60E-03	1,55E-02	6,63E-03	1,90E+03	7,01E+04
500	1,92E-02	1,58E-03	1,27E-02	5,36E-03	1,70E+03	6,02E+04
600	1,64E-02	1,55E-03	1,08E-02	4,50E-03	1,66E+03	5,32E+04
700	1,43E-02	1,53E-03	9,33E-03	3,88E-03	1,72E+03	4,80E+04
800	1,27E-02	1,50E-03	8,24E-03	3,41E-03	1,82E+03	4,43E+04
900	1,14E-02	1,48E-03	7,38E-03	3,04E-03	1,86E+03	4,14E+04
1000	1,04E-02	1,46E-03	6,68E-03	2,74E-03	1,80E+03	3,93E+04

Tabla 5.1: Tabla de resultados de las simulaciones de conducción y radiación de campo cercano para diferentes alturas del nano-espaciador. Flujos de calor del TPV  $Si - SiO_2 - Si$  para diferentes alturas del nano-espaciador, para los casos sin  $R_c$  y con  $R_c$  igual a  $4 \cdot 10^{-6} m^2 K/W$  [17], y sin  $R_c$  pero con las proporciones de las porosidades de [28] para un 25 % y un 50 %.

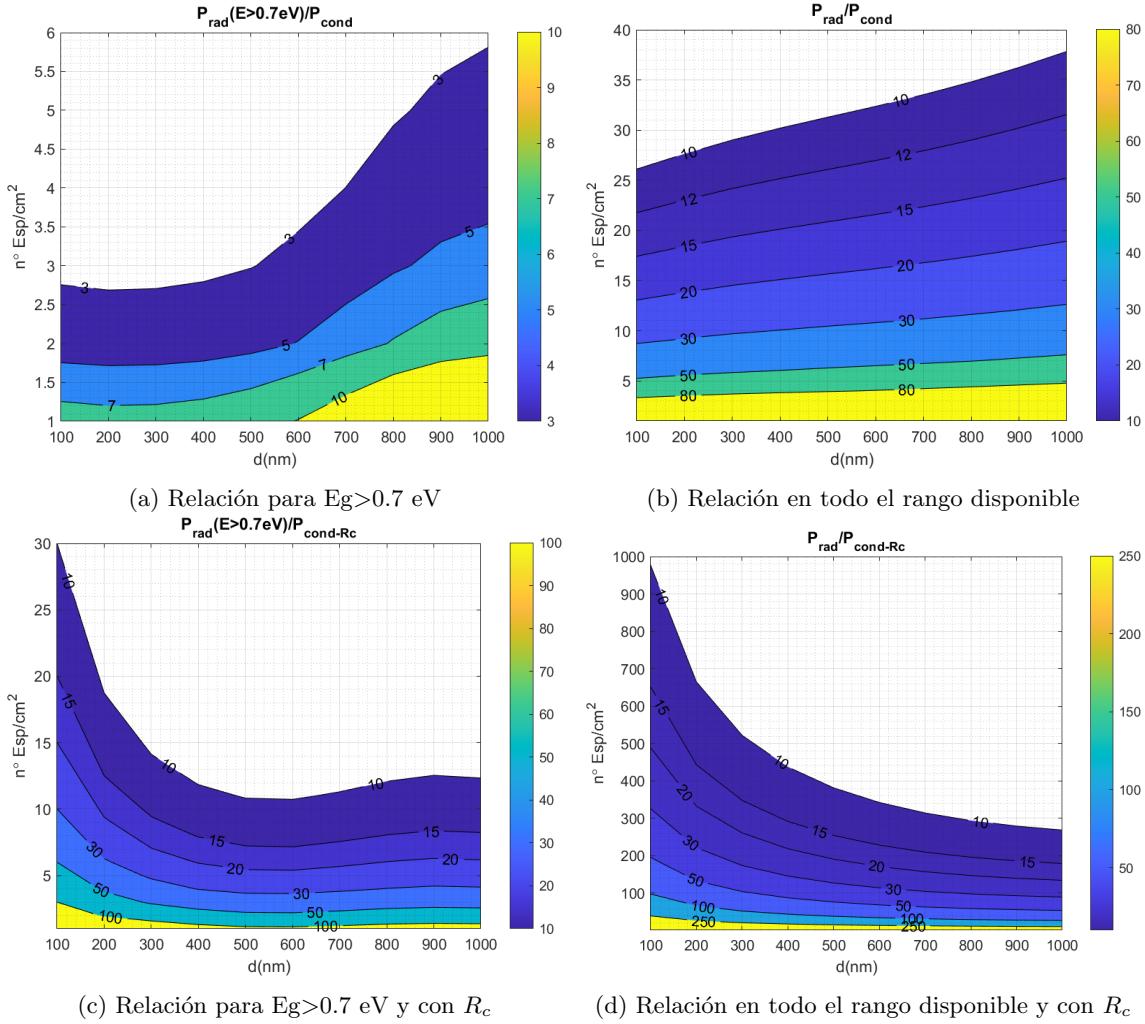


Figura 5.8: Relación de la potencia radiada en un  $1 \text{ cm}^2$  y conducción por cantidad de espaciadores en el centímetro cuadrado para el rango de  $E_g > 0.7 \text{ eV}$  sin  $r_c$  (a) y con  $R_c$  (c), y en todo el rango disponible de longitudes de onda sin (b) y con  $R_c$  (d).

La cantidad de nano-espaciadores necesarios para varias relaciones entre la potencia conducida con y sin  $R_c$  y la potencia radiada por campo cercano se representan en las figuras 5.8. Se observa como el efecto de la resistencia de contacto aumenta favorablemente el número de espaciadores necesarios para relaciones mayores de 10 y se observa como al aumentar la cantidad de radiación que se utiliza en la célula, aumenta el número de espaciadores que se pueden colocar para separar ambas placas, lo que implica que se puede mantener más estable la distancia de separación entre el emisor y la célula.

Para los casos con  $R_c$  se pasa de unos 30 nano-espaciadores a unos 1000 nano-espaciadores máximos y como mínimo se pasa de unos  $\sim 10$  a más de 250 nano-espaciadores para una relación de 10.

### 5.3. Resultados de las simulaciones para una TPV de Si-SiO<sub>2</sub>-Ge

Ahora se procede a estudiar un caso más realista del sistema TPV con una célula de *Ge* cuya banda energética es de 0.7 eV. Cuyos resultados de conducción son muy parecidos al caso de célula de *Si*, siendo su relación de potencia (figura 5.9b) un poco mayor.

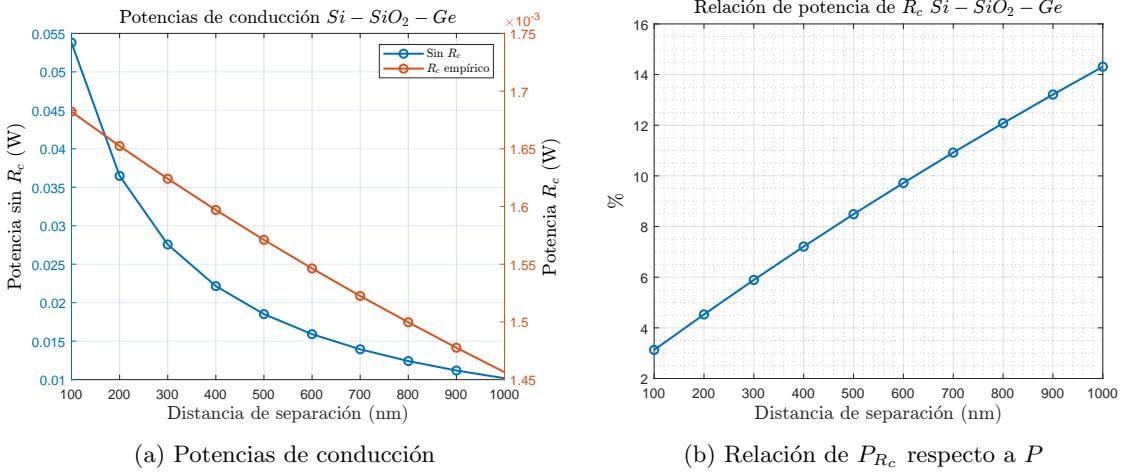


Figura 5.9: (a) Potencia de conducción con y si resistencia de contacto empírica [17]. (b) Relación de la potencia de conducción del caso con resistencia de contacto respecto a la potencia de conducción sin resistencia de contacto.

De las simulaciones de radiación de campo cercano se obtienen también resultados muy parecidos a los obtenidos en el caso de la célula de *Si* (figura 5.10b), solo mostrándose hasta los  $\sim 14\mu\text{m}$  de longitud de onda, donde se observa como al disminuir la distancia de separación aumenta la potencia de radiación monocromática (figura 5.10a).

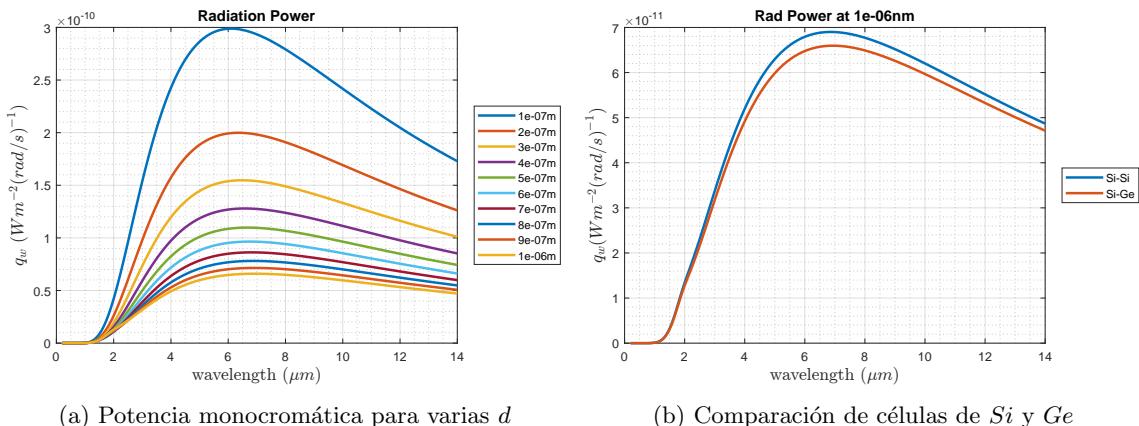


Figura 5.10: (a) Potencia radiada por campo cercano para diferentes separación entre placas para un emisor de *Si* a 800°C y una célula de *Ge* a 25°C. (b) Comparación de la potencia radiada monocromática para una separación de 1000nm entre el sistema *Si* - *Si* y *Si* - *Ge*.

Para la obtención de las potencias de radiación se procede a realizar la integral en el rango de longitudes de onda cuya energía es mayor a los 0.7 eV, obteniéndose

potencias alrededor de los  $10^3 \text{ W/m}^2$  (figura 5.11a). Para todo el rango disponible de longitudes de onda se obtiene alrededor de los  $10^4 \text{ W/m}^2$  con un máximo de  $\sim 1.5 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$  (figura 5.11b y tabla reftab:SiSiO2Ge).

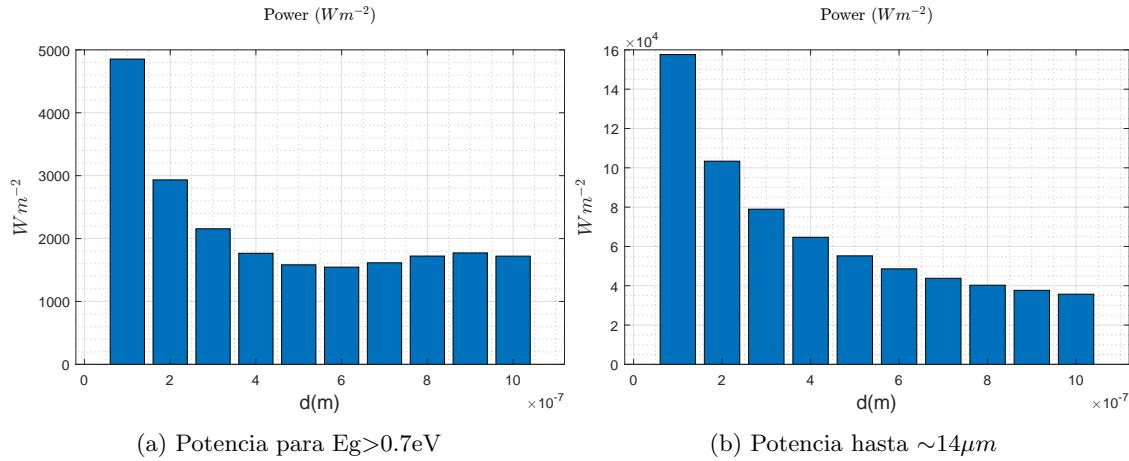


Figura 5.11: Potencias por unidad de área para la radiación de campo cercano para el sistema  $\text{Si} - \text{SiO}_2 - \text{Ge}$  para diferentes alturas del nano-espaciador. (a) Potencias en el rango de todas las longitudes de onda de energía mayor a 0.7 eV. (b) Potencias en todo el rango disponible de longitudes de onda, hasta las  $\sim 14 \mu\text{m}$ .

Para facilitar la revisión de los resultados obtenidos de las simulaciones se agrupan en la tabla 5.2, donde se presentan en notación científica para facilitar la observación de la magnitud de los resultados.

	Potencias según transmisión del calor			
	Conducción ( $\text{W/n}^0 \text{ esp.}$ )		Radiación ( $\text{W/m}^2$ )	
Dist. (nm)	$P_{\text{Normal}}$	$P_{R_c - \text{Empirico}}$	$P_{E_g > 0.7 \text{ eV}}$	$P_{full}$
100	5,38E-02	1,68E-03	4,87E+03	1,54E+05
200	3,65E-02	1,65E-03	2,94E+03	1,01E+05
300	2,76E-02	1,62E-03	2,16E+03	7,71E+04
400	2,22E-02	1,60E-03	1,77E+03	6,31E+04
500	1,85E-02	1,57E-03	1,59E+03	5,38E+04
600	1,59E-02	1,55E-03	1,55E+03	4,74E+04
700	1,39E-02	1,52E-03	1,62E+03	4,27E+04
800	1,24E-02	1,50E-03	1,73E+03	3,93E+04
900	1,12E-02	1,48E-03	1,78E+03	3,67E+04
1000	1,02E-02	1,46E-03	1,73E+03	3,49E+04

Tabla 5.2: Tabla de las potencias de resultado de las simulaciones de transmisión de calor por radiación de campo cercano y conducción para el sistema TPV  $\text{Si} - \text{SiO}_2 - \text{Ge}$ .

Hay que tener en cuenta que para un centímetro cuadrado las columnas de la transmisión de calor por radiación de la tabla 5.2 se ven multiplicadas por  $10^{-4}$ , por lo tanto, la potencia de radiación con  $E_g > 0.7 \text{ eV}$  en un centímetro cuadrado es solamente  $\sim 10$  mayor que la potencia conducida sin resistencia de contacto para un nano-espaciador, pero  $\sim 100$  veces mayor que la potencia conducida con resistencia de contacto.

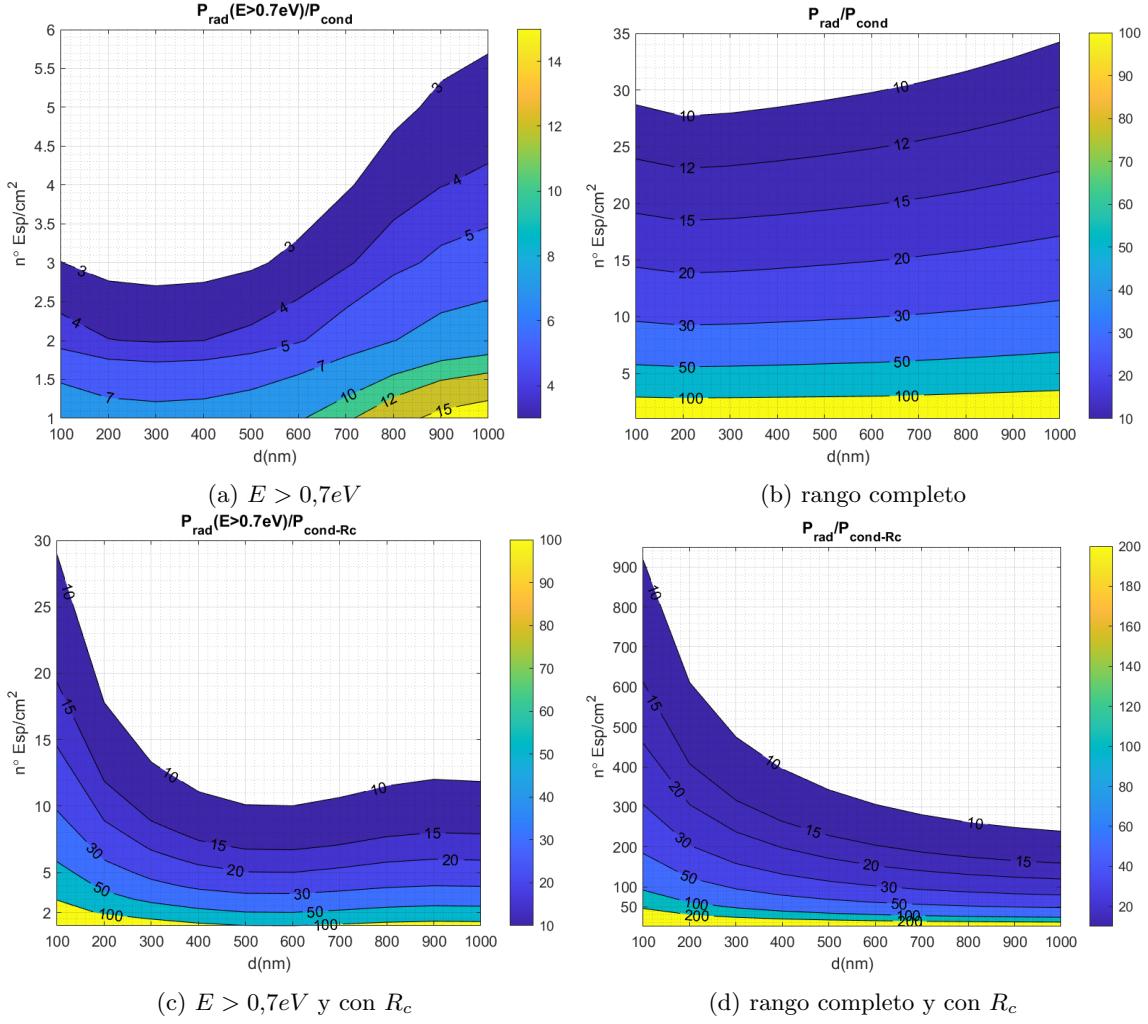


Figura 5.12: Relaciones entre la potencia de conducción para diferentes cantidades de nano-espaciadores y la potencia de radiación en  $1\text{cm}^2$  para diferentes distancias de separación o alturas de nano-espaciador. (a) Relación de las potencias sin resistencia de contacto y la radiación en un rango de energía mayor a  $0.7\text{eV}$ . (b) Relación de las potencias sin resistencia de contacto y la radiación en todo el rango disponible. (c) Relación de las potencias con resistencia de contacto [17] y la radiación en un rango de energía mayor a  $0.7\text{eV}$ . (d) Relación de las potencias con resistencia de contacto [17] y la radiación en todo el rango disponible.

Como se observa en las figuras 5.12 la resistencia de contacto tiene un efecto muy favorable sobre el sistema TPV aumentando la relación entre las potencias y el número de espaciadores que se pueden utilizar para separar el emisor y la célula. También afecta a la forma de la curva de relaciones, cambiando el sentido del incremento de los números de espaciadores a una relación de 10 por cada distancia de separación porque cuando no existe resistencia de contacto la resistencia del nano-espaciador depende principalmente de su altura (figuras 5.12a y 5.12b) y cuando existe resistencia de contacto el flujo de calor por conducción es tan pequeño respecto al de radiación que se puede considerar casi una recta y depende principalmente de la radiación por campo cercano (figuras 5.12c y 5.12d).

## 5.4. Resultados de las simulaciones para una TPV de SS-SiO<sub>2</sub>-Ge

Un caso importante a estudiar es cuando el emisor es de acero inoxidable (SS) para la recuperación de calor residual porque en la industria se utiliza mucho el acero inoxidable como material para calderas, tuberías, entre otros componentes o máquinas que alcanzan altas temperaturas y que tienen que ser enfriadas mediante un intercambiador de calor que se conectan a turbinas de vapor para recuperar parte de la energía, presentando el problema de trabajar con fluidos y partes móviles que necesitan mantenimiento.

Para las simulaciones de transmisión de calor por conducción se estudian los efectos de resistencias de contacto aún mayores, obtenidas las conductancias de contacto entre dos trozos de acero 304 y mediante las ecuaciones (4.9) y (4.6) se obtienen las resistencia de contacto para una presión de  $\sim 1$  GPa por ser un valor con menor error respecto al modelo matemático [21], siendo dicho valor aproximadamente unos  $1000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

La nueva resistencia de contacto calculada es  $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  y se toma un valor intermedio entre dicha resistencia de contacto y la resistencia de contacto empírica de  $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  [17] para obtener en mayor detalle los efectos de la resistencia de contacto sobre el flujo de calor por conducción, siendo el valor de dicha resistencia de contacto calculada intermedia unos  $\sim 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ .

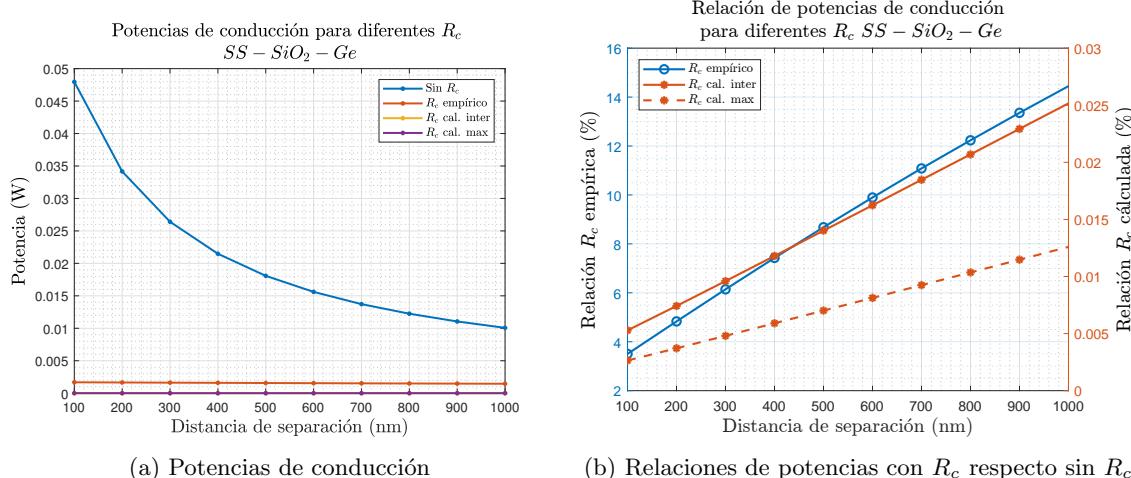


Figura 5.13: (a) Potencias de conducción sin y con resistencias de contacto para un emisor de SS, las resistencias de contacto son de  $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  para la  $R_c$  empírica,  $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  para la  $R_c$  cal. max y  $2,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  para la  $R_c$  cal. inter. (b) Relaciones de las potencias con  $R_c$  respecto a la potencia conducida sin  $R_c$ .

Al aumentar la resistencia de contacto disminuye el flujo de calor por conducción porque aumenta la resistencia térmica total como se puede observar en la figura 5.13a donde las resistencias de contacto calculadas son tan pequeñas que casi no se ven. Para tener una mejor visualización de los efectos de las resistencias de contacto se calcula la relación de cada una respecto a la potencia conducida sin resistencia de contacto, obteniéndose a como es de esperar que para las resistencias de contacto

calculadas, es decir, las de mayor valor, la relación es muy pequeña menos de un 0.03 %, a diferencia de la  $R_c$  empírica que comparada con las relaciones de los casos de TPV  $Si - SiO_2 - Ge$  es un poco mayor, superando el 3 % como mínimo y aproximadamente uno 14.5 %.

Dada la alta complejidad de la variación de la resistencia de contacto no se obtiene un modelo matemático que relaciona la potencia de conducción por resistencia de contacto y por altura de nano-espaciador.

Para la simulación de radiación de campo cercano solo se considera los resultados en el rango de energía mayor a 0.7eV o  $\sim 1.8 \mu m$  porque los datos de el índice de refracción  $n$  y índice de extinción  $k$  llegan hasta los  $1.2 \mu m$  [18], realizando una extrapolación lineal hasta los  $1.8 \mu m$  para poder obtener las potencias de radiación para diferentes distancias de separación.

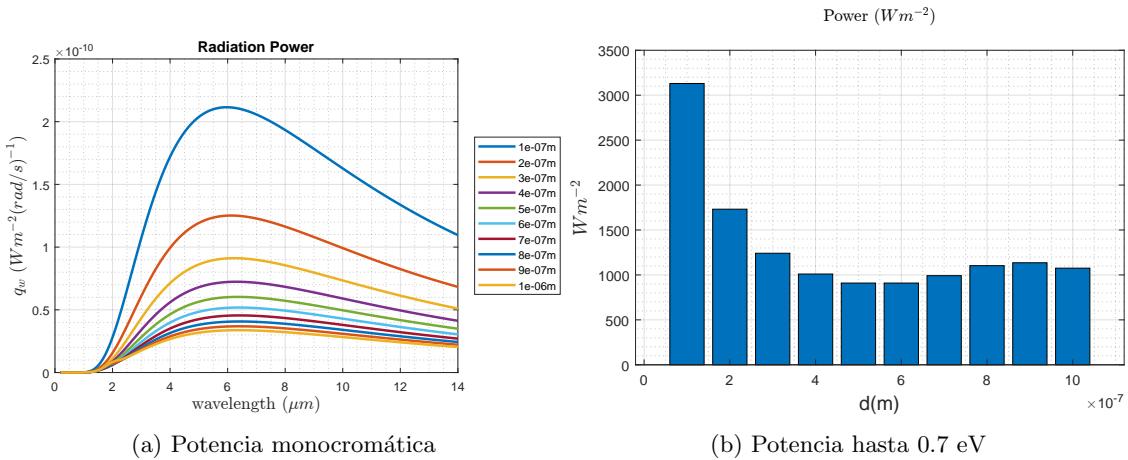


Figura 5.14: (a) Potencia radiada monocromática por campo cercano para un emisor de  $SS$  y una célula de  $Ge$ . (b) Potencia radiada para un rango de longitudes de onda cuya energía es mayor a los 0.7eV ( $\sim 1.8 \mu m$ ).

Las potencias por unidad de área se encuentran en general en el rango de los miles de  $W/m^2$ , siendo inferior a la del  $Si$  pero no por un factor de magnitud.

	Potencias según transmisión del calor				
	Conducción ( $W/n^0$ esp.)			Radiación ( $W/m^2$ )	
Dist. (nm)	$P_{Normal}$	$P_{R_c-Cal.Max}$	$P_{R_c-Cal.Inter}$	$P_{R_c-Empirico}$	$P_{Eg>0,7eV}$
100	4,80E-02	1,26815E-06	2,53438E-06	1,68E-03	3,13E+03
200	3,42E-02	1,26813E-06	2,53431E-06	1,65E-03	1,73E+03
300	2,64E-02	1,26811E-06	2,53424E-06	1,62E-03	1,24E+03
400	2,15E-02	1,26809E-06	2,53417E-06	1,60E-03	1,01E+03
500	1,81E-02	1,26808E-06	2,53410E-06	1,57E-03	9,11E+02
600	1,56E-02	1,26806E-06	2,53403E-06	1,54E-03	9,10E+02
700	1,37E-02	1,26804E-06	2,53396E-06	1,52E-03	9,93E+02
800	1,22E-02	1,26802E-06	2,53388E-06	1,50E-03	1,10E+03
900	1,11E-02	1,26800E-06	2,53381E-06	1,48E-03	1,14E+03
1000	1,01E-02	1,26799E-06	2,53374E-06	1,45E-03	1,08E+03

Tabla 5.3: Tabla de recopilación de los resultados de las simulaciones de transmisión de calor por conducción y radiación de campo cercano para una TPV de emisor de  $SS$ .

Se recopilan los resultados de las simulaciones en la tabla 5.3 y se observa que para un centímetro cuadrado de superficie de radiación las potencias se encuentran en el rango de los 0.1 W, no siendo suficientemente mayor para que para un nano-espaciador la relación de las potencias para todas las distancias sea  $\sim 10$  (figura 5.15a), pero para los casos con resistencia de contacto sí que se cumple.

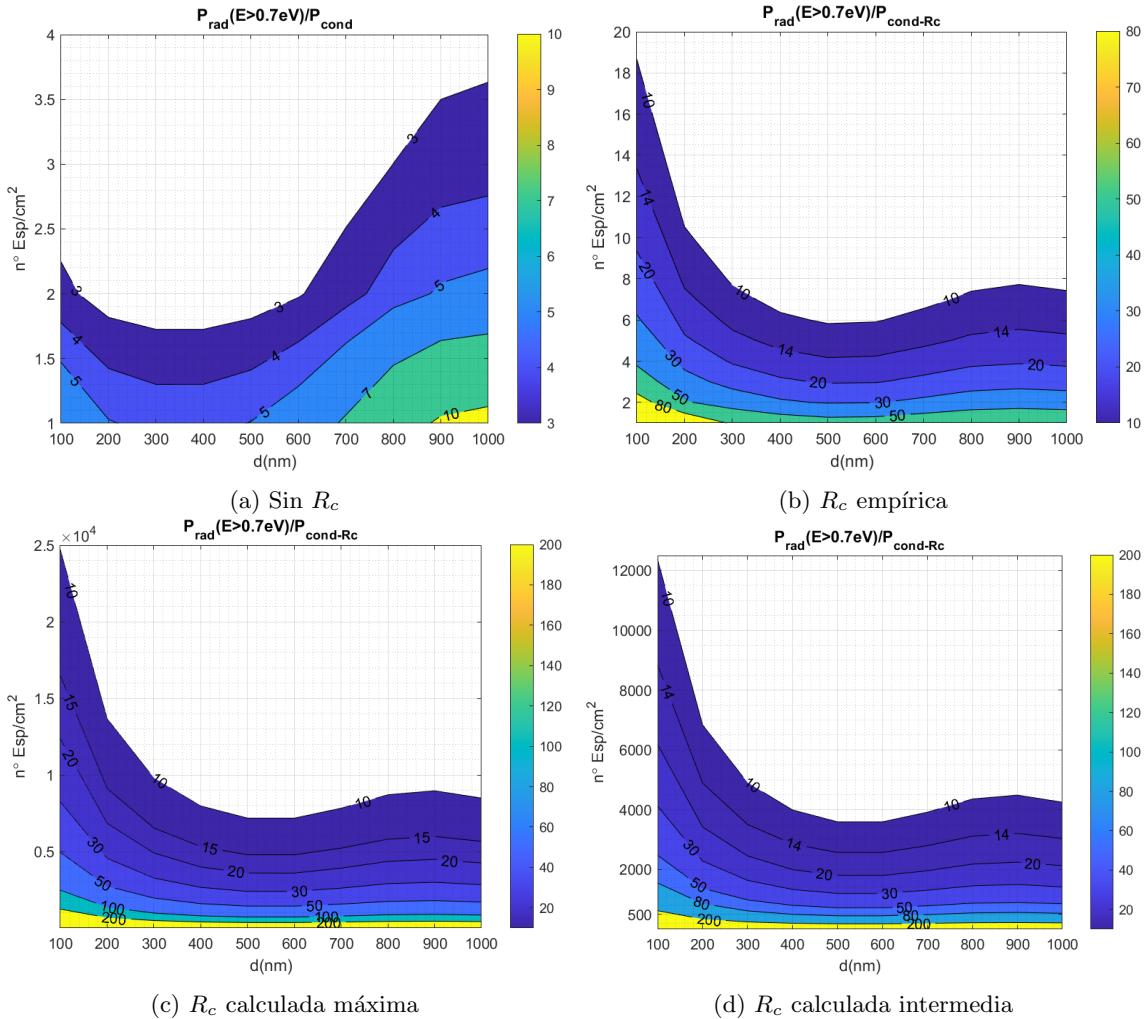


Figura 5.15: Relación de las potencias de conducción y radiación para un emisor de *SS* según el número de nano-espaciadores y la altura de los nano-espaciadores para un emisor y célula de 1  $\text{cm}^2$ . (a) Relación de potencias sin  $R_c$ . (b) Relación de potencias con  $R_c$  empírica [17]. (c) Relación de potencias con  $R_c$  calculada máxima. (d) Relación de potencias con  $R_c$  calculada intermedia.

Para el caso que la  $R_c$  empírica la cantidad máxima de nano-espaciadores para una relación de  $\sim 10$  entre las potencias no supera los 20 nano-espaciadores (figura 5.15b), a diferencia del TPV con emisor de *Si* que casi llega a los 30 nano-espaciadores (figura 5.12c).

Para el resto de casos de  $R_c$  la cantidad de nano-espaciadores para tener una relación de mínimo 10 supera la cantidad de mil, lo que implica que al disminuir el número de nano-espaciadores aumenta considerablemente la relación entre las potencias de conducción y radiación, siendo aproximadamente unos 2500 y 1000 nano-espaciadores para la  $R_c$  máxima y la  $R_c$  intermedia, respectivamente.

## 5.5. Resultados de las simulaciones para una TPV de SiC-SiO<sub>2</sub>-Ge

Se procede a estudiar el caso para un emisor de Carburo de Silicio (*SiC*) por ser una material con mayor conductividad térmica a 800°C que para un emisor de *Si* y *SS*, cuyas conductividades térmicas a 800°C ronda entre los 26 y 30 W/(m<sup>2</sup>K) a diferencia del *SiC* que ronda los 60 W/(m<sup>2</sup>K). Además el *SiC* tiene un punto de fusión mayor que el *Si* y el *SS*, siendo una característica del material de gran utilidad para su uso en baterías que almacenan la energía en forma de calor.

A su vez el *SiC* ha sido usado en [11], que mediante una capa fina de *SiC* depositada en el emisor se aumentó de flujo de calor por radiación de campo cercano entre el emisor y el receptor de *SiC*.

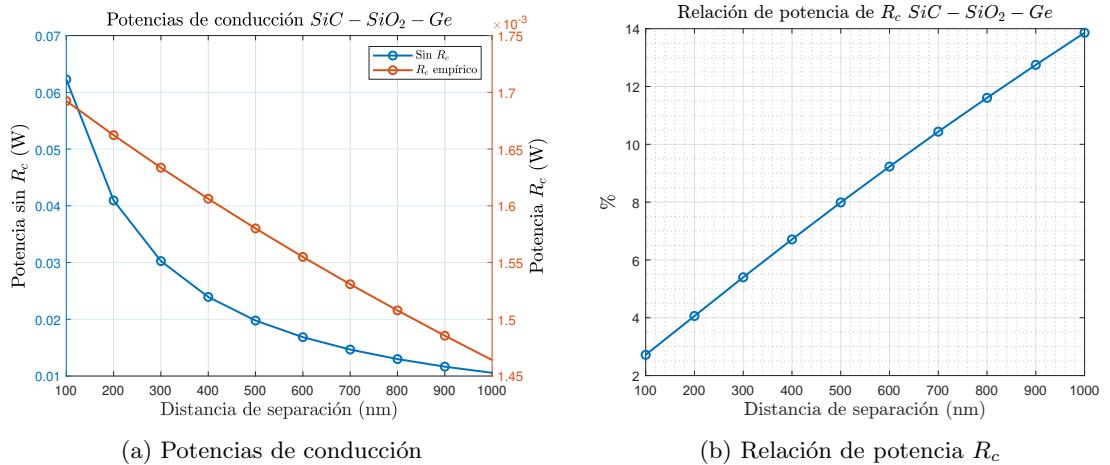


Figura 5.16: (a) Potencias de conducción para sin y con el efecto de la  $R_c$  empírica, eje izquierdo para el caso sin  $R_c$  y eje derecho para el caso con  $R_c$ . (b) Relación de la potencia de conducción con  $R_c$  respecto a sin  $R_c$ .

Se realizan las simulaciones de transmisión de calor por conducción, obteniéndose resultados similares a los casos anteriores porque la mayor cantidad de caída de temperatura se produce en el nano-espaciador por tener una baja conductividad térmica respecto al emisor y la célula. Algo que si se nota es que la potencia máxima es  $\sim 0,85 \cdot 10^{-2}$  W mayor que para el emisor de *Si* pero la relación entre las potencias con  $R_c$  respecto a sin  $R_c$  es menor, no superando el 14 % como valor máximo a los 1000nm.

Para las simulaciones de transmisión de calor por radiación de campo cercano se obtienen curvas de potencias monocromáticas por unidad de área muy parecidas a las del emisor de *Si* para las longitudes de onda más pequeñas o de alta energía, obteniéndose valores de potencia por unidad de área similares.

relleno

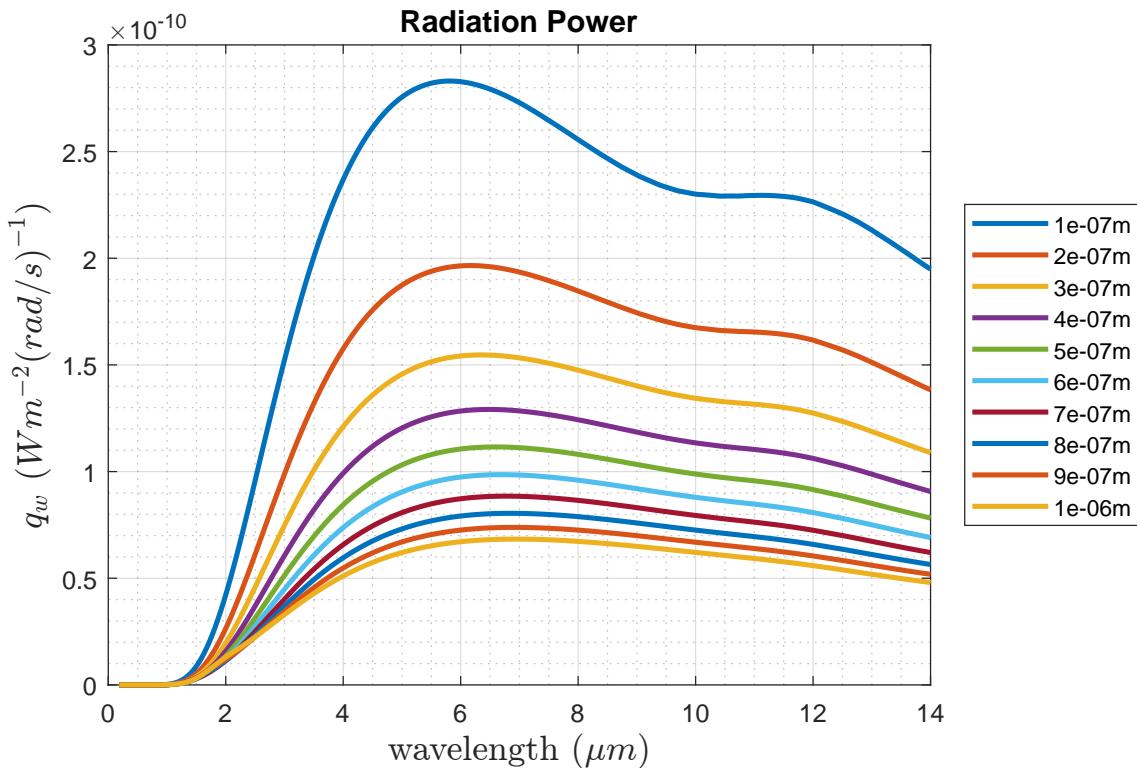


Figura 5.17

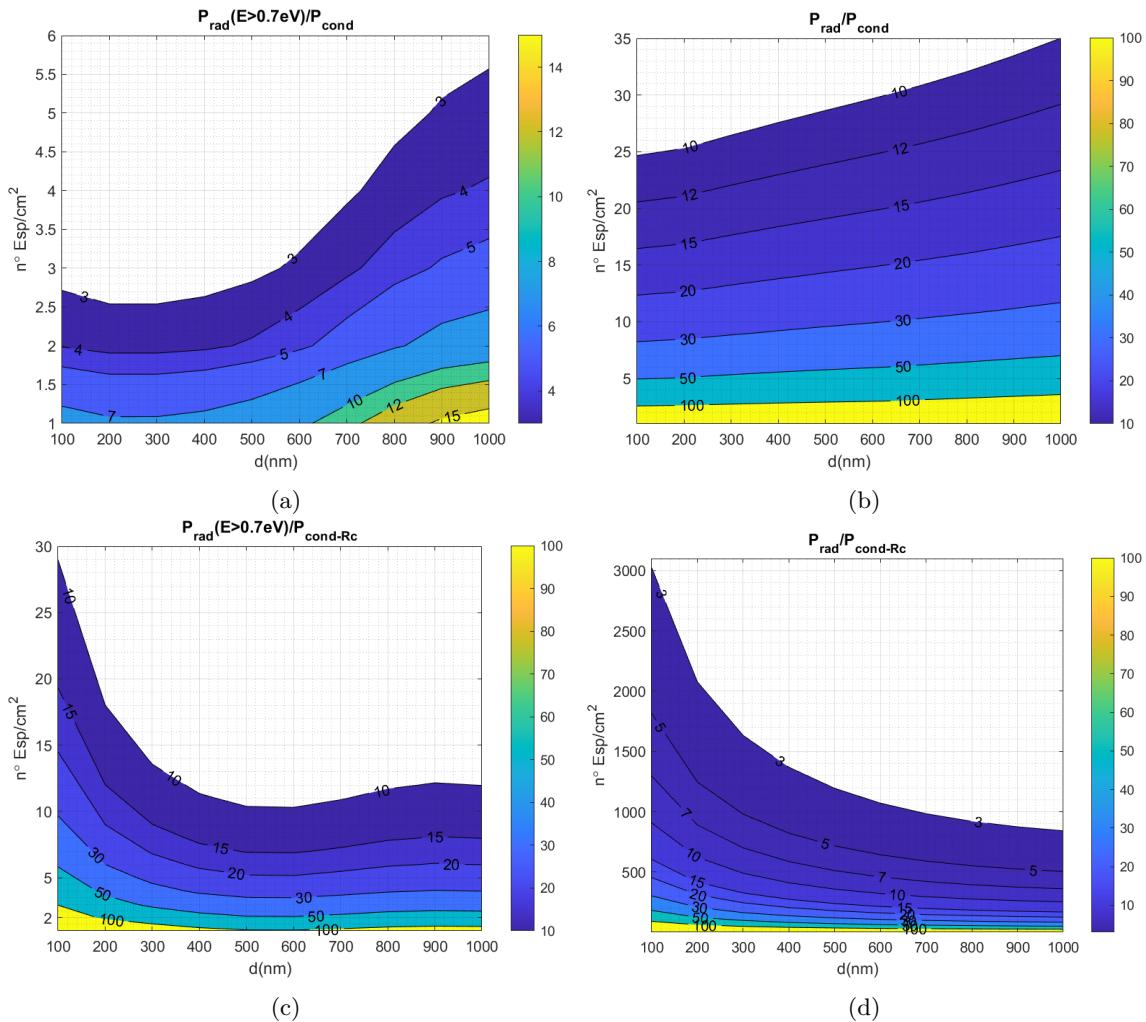


Figura 5.18

	Potencias según transmisión del calor			
	Conducción (W/nº esp.)		Radiación (W/m²)	
Dist. (nm)	$P_{Normal}$	$P_{R_c-Empirico}$	$P_{Eg>0,7eV}$	$P_{full}$
100	6,23E-02	1,69E-03	4,90E+03	1,50E+05
200	4,09E-02	1,66E-03	3,00E+03	1,01E+05
300	3,03E-02	1,63E-03	2,21E+03	7,80E+04
400	2,39E-02	1,61E-03	1,82E+03	6,43E+04
500	1,98E-02	1,58E-03	1,64E+03	5,52E+04
600	1,68E-02	1,55E-03	1,60E+03	4,87E+04
700	1,47E-02	1,53E-03	1,67E+03	4,40E+04
800	1,30E-02	1,51E-03	1,76E+03	4,06E+04
900	1,17E-02	1,49E-03	1,81E+03	3,80E+04
1000	1,06E-02	1,46E-03	1,75E+03	3,61E+04

Tabla 5.4: dac

## 5.6. Resultados de las simulaciones para una TPV de Si-Si-Ge y SS-Si-Ge

dnm	Prcpaper	Prc_SS
100	0,0017136	0,00171126
200	0,0017135	0,00171117
300	0,00171336	0,00171103
400	0,00171322	0,00171089
500	0,00171304	0,00171072
600	0,00171282	0,0017105
700	0,00171257	0,00171025
800	0,0017125	0,00171019
900	0,0017122	0,00170989
1000	0,00171208	0,00170978

Tabla 5.5: nano-espaciador de Si

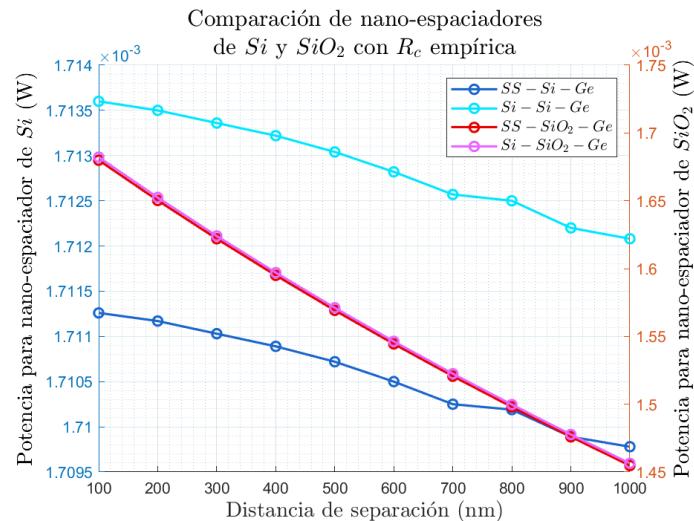


Figura 5.19

**5.7. Discusión**



# **Capítulo 6**

# **Conclusiones**

Se presentan a continuación las conclusiones...

## **6.1. Conclusión**

Una vez finalizado el proyecto...

## **6.2. Desarrollos futuros**

Un posible desarrollo...



# Apéndice A

## Anexo ...

En este apéndice...

### A.1. Lorem ipsum

  Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Maecenas ornare erat nisl, a laoreet purus pellentesque id. Duis laoreet ipsum posuere est hendrerit, quis ornare nisi iaculis. Quisque imperdiet gravida egestas. Maecenas in mauris felis. Quisque quis imperdiet enim. Curabitur dignissim eget nisi lobortis placerat. Donec et magna rutrum, tempor magna a, consectetur tortor. Donec faucibus sodales sem, eu iaculis leo eleifend id. Nam semper lectus nisl, sed molestie erat pharetra quis. Quisque vestibulum metus elit, id interdum ligula dignissim a.

  Praesent eu velit ac lectus tristique tristique vitae et tellus. Mauris dignissim feugiat orci, vitae luctus dolor finibus ut. Ut congue bibendum lectus, vitae congue ligula. Donec commodo, lacus ac iaculis scelerisque, nunc purus finibus diam, at lacinia sem justo non quam. Aenean tempor urna vitae quam pretium porta. Sed in lacinia ipsum. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Integer ut tristique est. Nam vitae interdum ligula, ac sodales dolor. Nulla mollis bibendum urna, sit amet interdum est aliquet at. Sed sagittis mi vel tellus posuere, eu rutrum arcu tristique.

  Vestibulum aliquet orci pharetra justo auctor, pharetra viverra felis finibus. Ut ac gravida quam. Donec egestas turpis nisi, nec elementum orci feugiat at. In hac habitasse platea dictumst. Praesent mollis sem in felis feugiat, dapibus finibus metus scelerisque. Aliquam ultricies ante quis nibh laoreet, ac aliquam justo maximus. Etiam rhoncus pharetra imperdiet.

  Nullam at libero quis augue tristique luctus eget placerat lorem. Donec pretium, dui scelerisque dapibus feugiat, ex lacus auctor ipsum, in ultricies odio justo in eros. Proin sodales velit non accumsan tempor. Mauris at consectetur est. Donec aliquam porttitor tortor, id malesuada nunc euismod vel. Ut id ullamcorper turpis, nec feugiat sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Morbi aliquam tempus tortor, et gravida lectus iaculis non. Interdum et malesuada fames ac ante ipsum primis in faucibus. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Integer non maximus felis. Nullam ac tempor augue. Vestibulum in efficitur mauris. Sed in nulla ultrices, pharetra ligula et, blandit nunc. Quisque dictum magna eget diam maximus, ac pulvinar nisi tempor. Pellentesque quis feugiat elit.

Integer euismod in urna id placerat. Etiam urna elit, tempor et turpis venenatis, volutpat viverra lacus. In luctus arcu sit amet lectus rutrum, id ultricies mi pellen-tesque. Nulla bibendum, orci in elementum aliquam, mi purus sollicitudin orci, quis ornare nulla arcu placerat urna. Integer consequat, risus ac elementum pellentesque, nulla est lobortis justo, sed mattis nibh ligula nec velit. Integer sem mauris, luctus vitae venenatis a, tincidunt egestas purus. In et lectus semper, dapibus massa sed, ultrices nisi. Ut sit amet dolor porta, accumsan lectus ut, semper tellus. Praesent velit odio, facilisis quis sodales vel, molestie at risus. In sollicitudin mauris risus, ullamcorper ullamcorper ligula commodo sed. Ut libero tortor, rhoncus ut sagittis quis, fringilla nec nunc. Ut efficitur nisi id leo feugiat ultrices. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Sed at malesuada arcu.

Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Sed consectetur, justo nec scelerisque accumsan, leo erat dictum odio, id feugiat nibh felis vel ipsum. Duis urna ante, commodo vitae neque varius, congue egestas turpis. Donec condimentum ullamcorper dapibus. Nulla sed sapien eu diam commodo finibus. Nulla fringilla lectus vitae augue rutrum volutpat. Nulla in accumsan orci. Suspendisse eget diam massa.

# Bibliografía

- [1] V. Adalid. A review on thermoelectric devices. *The Journal of Undergraduate Research at the University of Illinois at Chicago*, 9, 08 2016.
- [2] Tobias Burger, Caroline Sempere, Bosun Roy-Layinde, and Andrej Lenert. Present efficiencies and future opportunities in thermophotovoltaics. *Joule*, 4(8):1660–1680, 2020.
- [3] David G. Cahill. Thermal conductivity measurement from 30 to 750 k: the 3w method. *Review of Scientific Instruments*, 61(2):802–808, 1990.
- [4] Matthew Campbell, Thomas Celenza, Felix Schmitt, Jared Schwede, and Igor Bargatin. Progress toward high power output in thermionic energy converters. *Advanced Science*, 8, 05 2021.
- [5] Fangqi Chen, Xiaojie Liu, Yanpei Tian, Jon Goldsby, and Yi Zheng. Refractory all-ceramic thermal emitter for high-temperature near-field thermophotovoltaics. *Energies*, 15(5), 2022.
- [6] Zinovi Dashevsky, Albert Jarashneli, Yaakov Unigovski, Bohdan Dzunzda, Feng Gao, and Roni Z. Shneck. Development of a high performance gas thermoelectric generator (teg) with possible use of waste heat. *Energies*, 15(11), 2022.
- [7] A. Datas and R. Vaillon. Thermionic-enhanced near-field thermophotovoltaics for medium-grade heat sources. *Applied Physics Letters*, 114(13):133501, 2019.
- [8] R. S. DiMatteo, P. Greiff, S. L. Finberg, K. A. Young-Waithe, H. K. H. Choy, M. M. Masaki, and C. G. Fonstad. Micron-gap thermophotovoltaics (mtpv). *AIP Conference Proceedings*, 653(1):232–240, 2003.
- [9] Gavin P. Forcade, Christopher E. Valdivia, Shengyuan Lu, Sean Molesky, Alejandro W. Rodriguez, Jacob J. Krich, Raphael St-Gelais, and Karin Hinzer. Modeling efficiency of inas-based near-field thermophotovoltaic devices. In *2021 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)*, pages 53–54, 2021.
- [10] Mathieu Francoeur, M Pinar Mengüç, and Rodolphe Vaillon. Spectral tuning of near-field radiative heat flux between two thin silicon carbide films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(7):075501, feb 2010.
- [11] Mathieu Francoeur, M. Pinar Mengüç, and Rodolphe Vaillon. Near-field radiative heat transfer enhancement via surface phonon polaritons coupling in thin films. *Applied Physics Letters*, 93(4):043109, 2008.

- [12] Mathieu Francoeur, M. Pinar Mengüç, and Rodolphe Vaillon. Solution of near-field thermal radiation in one-dimensional layered media using dyadic green's functions and the scattering matrix method. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(18):2002–2018, 2009.
- [13] Guido Guazzoni and Selma Matthews. A retrospective of four decades of military interest in thermophotovoltaics. *AIP Conference Proceedings*, 738(1):3–12, 2004.
- [14] R.P. Hamlen, H.A. Christopher, and S. Gilman. U.s. army battery needs-present and future. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 10(6):30–33, 1995.
- [15] Wenxiang Huang, Lu Li, Jeremy A. Massengale, Rui Q. Yang, Tetsuya D. Mishima, and Michael B. Santos. Multistage interband cascade thermophotovoltaic devices with 0.2 ev bandgap. In *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pages 2315–2318, 2019.
- [16] Takuya Inoue, Takaaki Koyama, Dongyeon Daniel Kang, Keisuke Ikeda, Takashi Asano, and Susumu Noda. One-Chip Near-Field Thermophotovoltaic Device Integrating a Thin-Film Thermal Emitter and Photovoltaic Cell. *Nano Lett.*, 19(6):3948–3952, June 2019. Publisher: American Chemical Society.
- [17] Kota Ito, Atsushi Miura, Hideo Iizuka, and Hiroshi Toshiyoshi. Parallel-plate submicron gap formed by micromachined low-density pillars for near-field radiative heat transfer. *Applied Physics Letters*, 106(8):083504, 2015.
- [18] J. Jyothi, A. Biswas, P. Sarkar, A. Soum-Glaude, H. S. Nagaraja, and Harish C. Barshilia. Optical properties of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO tandem absorber coatings by phase-modulated spectroscopic ellipsometry. *Applied Physics A*, 123(7):496, June 2017.
- [19] Alina LaPotin, Kevin L. Schulte, Myles A. Steiner, Kyle Buznitsky, Colin C. Kelsall, Daniel J. Friedman, Eric J. Tervo, Ryan M. France, Michelle R. Young, Andrew Rohskopf, Shomik Verma, Evelyn N. Wang, and Asegun Henry. Thermophotovoltaic efficiency of 40 %. *Nature*, 604(7905):287–291, April 2022.
- [20] Abigail S. Licht, Dante F. DeMeo, J. B. Rodriguez, and Thomas E. Vandervelde. Decreasing dark current in long wavelength inas/gasb thermophotovoltaics via bandgap engineering. In *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pages 0482–0486, 2014.
- [21] Fernando Milanez, J. Culham, and M. Yovanovich. Experimental thermal contact conductance of bead-blasted ss 304 at light loads. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer - J THERMOPHYS HEAT TRANSFER*, 17:534–536, 10 2003.
- [22] Michael Papapetrou, George Kosmadakis, Andrea Cipollina, Umberto La Commare, and Giorgio Micale. Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the eu per industrial sector, temperature level and country. *Applied Thermal Engineering*, 138:207–216, 2018.

- [23] Wan Emelin Suliza Wan Abdul Rashid, Pin Jern Ker, Md Zaini Bin Jamaldin, Mansur Mohammed Ali Gamel, Hui Jing Lee, and Nazaruddin Bin Abd Rahman. Recent development of thermophotovoltaic system for waste heat harvesting application and potential implementation in thermal power plant. *IEEE Access*, 8:105156–105168, 2020.
- [24] Jaeman Song, Jihye Han, Minwoo Choi, and Bong Jae Lee. Modeling and experiments of near-field thermophotovoltaic conversion: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 238:111556, 2022.
- [25] Jesse I. Watjen, Bo Zhao, and Zhuomin M. Zhang. Near-field radiative heat transfer between doped-si parallel plates separated by a spacing down to 200 nm. *Applied Physics Letters*, 109(20):203112, 2016.
- [26] David Wilt, Donald Chubb, David Wolford, Patrick Magari, and Chris Crowley. Thermophotovoltaics for space power applications. *AIP Conference Proceedings*, 890(1):335–345, 2007.
- [27] Hang Yu, Z. Ikonic, D. Indjin, and R.W. Kelsall. The effect of interface roughness on spectral efficiency of thermophotovoltaics with multi-layer filters. *Optik*, 257:168663, 2022.
- [28] Wenhui Zhu, Guang Zheng, Sen Cao, and Hu He. Thermal conductivity of amorphous SiO<sub>2</sub> thin film: A molecular dynamics study. *Scientific Reports*, 8(1):10537, July 2018.