



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

Cotutor: Esther López Estrada
Instituto de Energía Solar

Tutor: Pablo García-Linares

Fontes

Departamento: Ingeniería
Eléctrica, Electrónica,
Automática y Física Aplicada

Madrid, Septiembre, 2022

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

Autor: Martín Augusto Reigadas Terán

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

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
Índice	xii
1. Introducción	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Estructura del documento	5
2. Estado del arte	7
2.1. Termo-fotovoltaica	7
2.2. Transmisión de calor	10
2.2.1. Convección	10
2.2.2. Radiación	10
2.2.3. Conducción	12
3. Materiales y Herramientas	13
3.1. Materiales	13
3.1.1. Nano-espaciador	13
3.1.2. Célula	13
3.1.3. Emisor	14
3.2. Herramientas	14
3.2.1. Obtención de datos de materiales	14
3.2.2. Modelado 3D	14
3.2.3. Simulaciones de transmisión de calor por conducción	14
3.2.4. Simulaciones de transmisión de calor por radiación	14
4. Métodos	15
4.1. Criterios seguidos	15
4.2. Simulación en CFD	15
4.3. Análisis dimensional	15
4.3.1. Área	15
4.3.2. Volumen	16
4.3.3. Conductancia Térmica	16
4.3.4. Calor Específico	16

4.3.5. Coeficiente de expansión térmica	16
4.3.6. Densidad	16
4.3.7. Resistencia de Contacto	16
4.4. Simulaciones	17
5. Resultados y discusión	19
5.1. Resultados	19
5.2. Discusión	19
6. Conclusiones	21
6.1. Conclusión	21
6.2. Desarrollos futuros	21
A. Anexo ...	23
A.1. Lorem ipsum	23
Bibliografía	25
Anexo: Documentación de la librería Travis	27

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. <i>Fuente: [1]</i>	7
2.2.	Relación entre densidad de potencia y eficiencia entre dispositivos nTPVs y nTiPVs. <i>Fuente: [4]</i>	9

Índice de tablas

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.

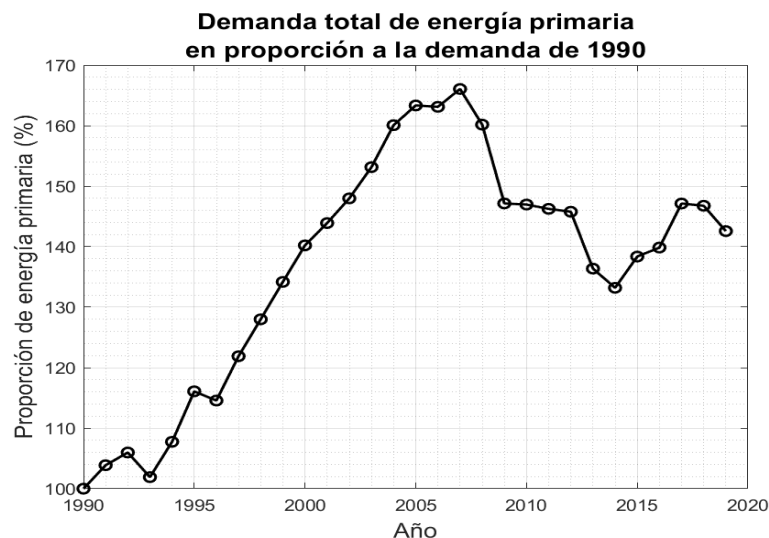


Figura 1.1: Representación gráfica de la relación entre la demanda total de energía primaria anual de 1990 hasta 2019 en España. *Fuente obtención de datos: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico de España.*

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 la energía consumida no es completamente aprovechada, llamada calor residual. En 2015, la industria en España consumió aproximadamente 220 TWh de energía, desperdiciándose unos 22 TWh según los cálculos de las estimaciones realizadas en [16].

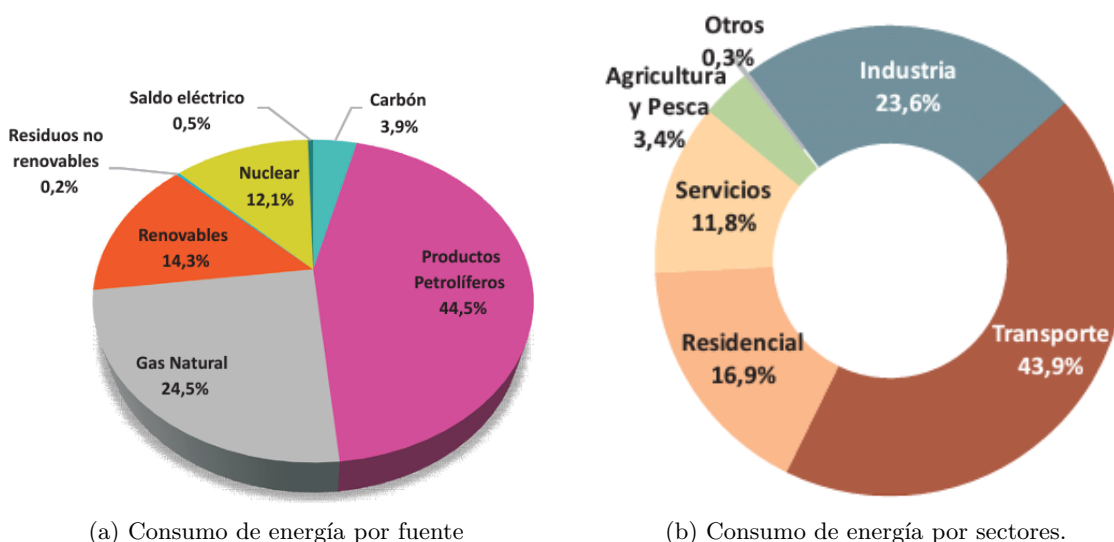


Figura 1.2: Desglose del consumo de energía primaria en España 2019 por fuente de energía(a). Consumo de energía final por sectores en el año 2019 en España(b). Fuente: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico de España.

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, termoiónicos, entre otros.

La conversión termo-eléctrica por vías mecánicas es la más conocida y es altamen-

te 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.

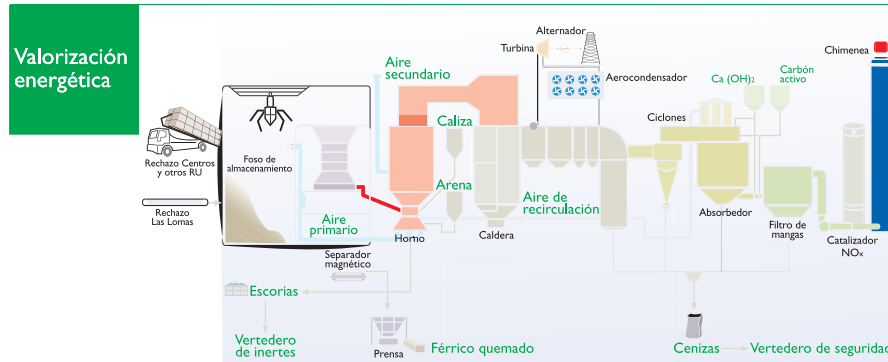


Figura 1.3: Planta de valorización energética del Centro Las Lomas del Parque Tecnológico de Valdemingómez, donde se aprovecha los gases a alta temperatura para producir vapor de agua en la caldera para mover unas turbinas conectadas a generadores para producir electricidad. *Fuente: Ayuntamiento de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

El problema principal con un sistema de este tipo son las partes móviles, las cuales tienen que estar en constante mantenimiento, para disminuir el mantenimiento se puede pasar a un sistema de recuperación de calor residual directo, ya sea con un dispositivo termoelectrónico, termoiónico o termofotovoltaico. Además de no presentar partes móviles o tener que tratar con fluidos, estos sistemas se pueden utilizar para varias aplicaciones, por ejemplo la espacial, donde la presión atmosférica es nula y la fuerza gravitacional total no es aproximadamente constante, o en la automoción donde se puede aprovechar las altas temperaturas de los motores para alimentar las luces o los circuitos electrónicos del vehículo.

Los dispositivos termoelectrónicos 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.

Los dispositivos termoelectrónicos 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 %, aunque hasta el momento la efi-

ciencia ha llegado como máximo hasta aproximadamente 15 %, 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 la 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 $J = A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-W}{kT}}$, 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 transferencia 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 por encima por la de un cuerpo negro según Planck.

La eficiencia de las TPVs 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 Wcm^{-2} [22].

Los dispositivos que aprovechan los efectos de campo cercano presentan la dificultad de mantener la separación de manera constante por lo tanto se han fabricado y probado en varias ocasiones espaciadores de alturas desde un par de micras hasta unos pocos de cientos de nanómetros, con diferentes geometrías y materiales. Por ejemplo, en [5] usan espaciadores de $1\mu\text{m}$ de 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 termo-fotovoltaico, 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.

- Modelar el emisor y la célula del sistema TPV para que los gradientes térmicos por conducción no lleguen a los bordes.
- 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. 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 [1].

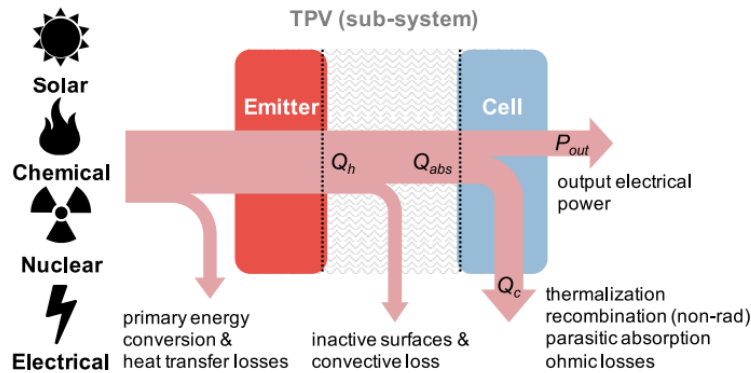


Figura 2.1: Flujo de conversión de la energía térmica en energía eléctrica. *Fuente:* [1]

La termofotovoltaica ha sido un campo de interés para aplicaciones militares, es-

paciales, 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 [11], cumpliéndose en 2004 40 años de investigación sin conseguirse potencias por encima de 500W [10]. 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 [20]. 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 [17].

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 [8], aplicación de filtros [21] y capas reflectantes para la recuperación de fotones y disminución de calentamiento [4], la combinación con un TEC para aumentar la densidad de potencia y eficiencia total del sistema generador [2, 4], y la disminución del espacio entre emisor y célula para aprovechar los efectos de la radiación de campo cercano [4, 6, 13].

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 energética comprendidas entre 0.2 y 0.5 eV que resulta en una eficiente colección de portadores foto-generados, donde la eficiencia máxima (η_{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 % η_{max} , pero genera una significativa cantidad de energía térmica por la densidad de corriente oscura [12]. Esta corriente se consigue disminuir al introducir una barrera entre las capas [15].

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 [18]. Habitualmente estas capas se usan en las TPVs y TICs, como por ejemplo se usan en [4, 6, 14]. Los filtros se utilizan para evitar la transmisión de radiación no deseada la célula, consiguiéndose un aumento de la eficiencia del 45 % al 75 %, estos filtros pueden ser de una o múltiples capas que la rugosidad de la interfaz degrada seriamente la eficiencia, lo que se puede mejorar con una poca cantidad de capas [21].

En [3] 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 Wm^{-2} pero solo con una eficiencia del 11.74 %, a

diferencia del BeO con una potencia de 3.19 Wm^{-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 [4] 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 Wm^{-2} a unos 70 Wm^{-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 reflejar los fotones de baja energía.

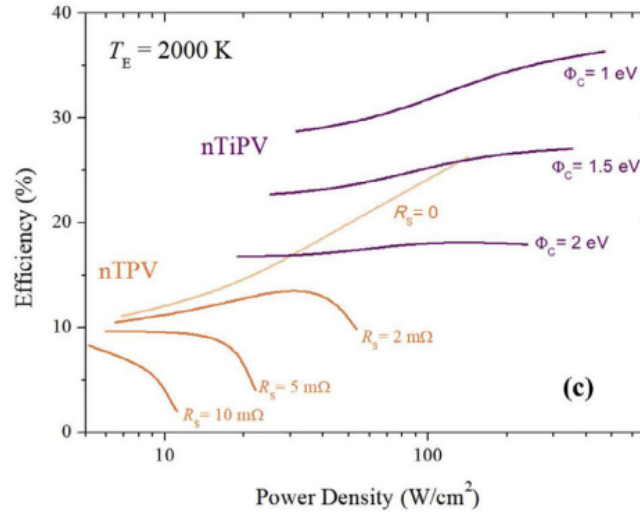


Figura 2.2: Relación entre densidad de potencia y eficiencia entre dispositivos nTPVs y nTiPVs. Fuente: [4]

Los dispositivos TPV que aprovecha el efecto de campo cercano se denotan como dispositivos NF-TPV, NF-TPV o nTPV, esto en combinación con el objetivo de disminuir la contaminación, aprovechar la energía desperdiciada en forma de calor y utilizar baterías más baratas con gran almacenamiento de energía ha impulsado bastante las investigaciones al respecto de la tecnología NF-TPV. Siendo el aumento de la eficiencia para igualar a la actual de campo lejano de 40 % [14] un objetivo interesante, en [6] se modeló la eficiencia de un NF-TPV basado en InAs con emisor a 700K y radiador de la célula a 300K, alcanzándose una 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 [7]

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 función dieléctrica compleja de los materiales.

Una ventaja que presenta los NF-TPV es la frecuencia de resonancia (ω_{res}), que produce una mejora o aumento del flujo radiado a dicha frecuencia. En [8] utilizan una lámina fina de SiC y otra gruesa, obteniendo que al aumentar el grosor de la capa disminuye la potencia en la ω_{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 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 [19] que estudia la transferencia de calor entre dos placas de Si separadas 200nm por vacío y utilizando espaciadores de SiO₂ y prismáticos de base circular de 1 μm 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 la existencia de las resistencias de contacto entre cada interfaz, teniendo una gran importancia en [13] que estudia la radiación por campo cercano entre dos placas de cuarzo con pilares de pirámides truncadas de SiO₂ que están depositados sobre el substrato inferior, descubriéndose 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.

2.2.2. 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 evanescente 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 regla de Planck sobre la emitancia monocromática de un cuerpo negro ($E_{\lambda}^{bb}(T)$) (ecuación 2.1), cuyo valor total 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.

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

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

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 ϵ_i es la emisividad monocromática, es decir, el cociente de la emisividad del cuerpo respecto a la del cuerpo negro, cuyo vaor 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, la ecuación que modela el flujo de calor por frecuencia de un emisor (n^o1) a un receptor (n^o3) separados por el vacío (n^o2) es [7]:

$$q_{w,abs}^{prop} = \frac{\Theta(\omega, T_1)}{4\pi^2} \times \int_0^{k_v} k_{\rho} d\rho \sum_{\gamma=TE,TM} \frac{(1 - |r_{21}^{\gamma}|^2)(1 - |r_{23}^{\gamma}|^2)}{|1 - r_{21}^{\gamma} r_{23}^{\gamma} e^{2ik_{z2}d_c}|^2} \quad (2.4)$$

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 en dicha interfaz en estado polarizado γ , TE son las ondas eléctricas transversales y TM son las ondas magnéticas transversales, i es la constante compleja $\sqrt{-1}$, k_{ρ} es el vector de onda de la onda primaria [9].

La ecuación 2.4 es para dos placas gruesas separadas por un vacío y rodeadas por vacío, se obtiene de las ecuaciones presentadas en [9], 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

2.5a

$$\min_{a,b,c} \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + C \sum_{i=1}^l \xi_i \quad (2.5a)$$

$$y_i (\mathbf{w}^T \phi(x_i) + b) \quad (2.5b)$$

2.2.3. 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 ($R = \sum R_i$).

En la realidad las interfaces de contacto entre los materiales no es perfecta, por ejemplo, la rugosidad de cada superficie, lo que provoca que haya una caída de temperatura entre cada interfaz, esta caída de temperatura se modela como una resistencia que se le llama resistencia de contacto.

Resistencia de contacto

La resistencia de contacto en la interfaz entre dos conductores produce una caída de temperatura significativa, como se observa en el [13], la cual es dependiente de muchos parámetros, tales como la temperatura, la presión, la rugosidad, etc.

Esta gran cantidad de dependencias hace que sea difícil parametrizar su valor, por lo tanto, se utilizan valores empíricos como el obtenido en [13] de unos $4E-6 \text{ m}^2 K/W$, pero también se puede llegar a parametrizar para ciertos casos, como en **Otra citación**, donde modelan el cálculo de la resistencia de contacto entre dos aceros 304L a temperatura ambiente como *Modelo de resistencia de contacto*.

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 a utilizar para cada uno de los componentes del sistema TPV, incluyendo los criterios seguidos de su selección.

3.1.1. Nano-espaciador

El nano-espaciador es de Dióxido de Silicio (SiO_2), 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 $10 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 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 [22].

3.1.2. Célula

La célula es en una primera instancia de Silicio (Si) para la realización de unas pruebas de simulación iniciales, se utiliza Silicio para dichas pruebas por ser muy 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 . No se utiliza Antimoniuro de Galio (GaSb) por tener una banda energética mayor que al del Ge, de 0.7eV comparado con 0.66eV a 300K .

3.1.3. Emisor

Para el emisor se utilizan 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 se ha utilizado para el aumento de potencia de radiación en campo cercano, aunque es mayor para una capa fina de SiC cercano a la frecuencia de resonancia [8].

Se tomaron en cuenta otros materiales que han sido descartados por varias razones, entre ellas ser muy caros, tener baja potencia de radiación de campo cercano respecto a una célula de Ge, entre otros. Dichos materiales son los siguientes:

- **Antimoniuro de Galio (GaSb):** Semiconductor con punto de fusión de 710°C que es menor a los 800°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 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

3.2.1. Obtención de datos de materiales

EDU...

3.2.2. Modelado 3D

Inventor 2021

3.2.3. Simulaciones de transmisión de calor por conducción

Nastran Environment

CFD

3.2.4. Simulaciones de transmisión de calor por radiación

MATLAB

Calculadora de campo cercano

Capítulo 4

Métodos

En este capítulo se detalla principalmente los criterios seguidos para el diseño del espaciador, su modelado en Inventor, las simulaciones en CFD y los cálculos en MATLAB, a su vez los métodos empleados para la rectificación del correcto funcionamiento de CFD para la extracción de datos.

En segundo lugar se describe el procedimiento realizado para la extracción de datos de las simulaciones realizadas en CFD.

Por último, se describe el procedimiento seguido para la obtención de los resultados.

4.1. Criterios seguidos

4.2. Simulación en CFD

4.3. Análisis dimensional

Dado que el programa Inventor está limitado a partir a la escala milimétrica, por lo tanto, se tiene que aplicar un escalado. Se procede a realizar un análisis dimensional de las ecuaciones para obtener los nuevos parámetros para la nueva escala del modelo.

Siendo L' la longitud en el modelo y L la longitud de la realidad, se considera que $L'/L = 10^4$.

4.3.1. Área

La sección de los nano-espaciadores es un polígono regular de cuatro lados cuya fórmula del área es $A = L^2$, donde A es el área y L el lado del polígono.

Para cualquier polígono regular a fórmula del área se puede expresar como $A = Cte \cdot L^2$, siendo Cte una constante distinta para cada polígono y tomando en cuenta la relación de escala.

$$\frac{A'}{A} = \left(\frac{L'}{L}\right)^2 = 10^8 \quad (4.1)$$

4.3.2. Volumen

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

$$V' = A' \cdot L' = A \cdot L \cdot 10^8 \cdot 10^4 = V \cdot 10^{12} \quad (4.2)$$

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

4.3.3. Conductancia Térmica

Al aplicarse la escala la conductancia térmica (C) se mantiene constante, variando la conductividad térmica (k) del material. La nueva conductividad térmica k' será:

$$C = k \cdot \frac{A}{L} = k' \cdot \frac{A'}{L'} \quad (4.3)$$

$$k' = \frac{L'}{L} \cdot \frac{A}{A'} \cdot k = 10^4 \cdot 10^{-8} = k \cdot 10^{-4} \quad (4.4)$$

Donde k es la conductividad térmica del material y k' es la conductividad térmica para la escala aplicada. $k' = k \cdot 10^{-4}$

4.3.4. Calor Específico

4.3.5. Coeficiente de expansión térmica

4.3.6. Densidad

La masa de cada elemento tiene que ser constante entre el modelo y la realidad.

$$M = M' \implies \rho \cdot V = \rho' \cdot V' = \rho' \cdot V \cdot 10^{12} \implies \rho' = \rho \cdot 10^{-12} \quad (4.5)$$

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

4.3.7. Resistencia de Contacto

En [13] se descubre como la resistencia de contacto afecta a los espaciadores y se obtiene el valor de su coeficiente(ρ) $4 \cdot 10^{-6} m^2 KW^{-1}$. Para obtener cual es el coeficiente de la resistencia de contacto del modelo se realiza un análisis dimensional.

$$R = \rho \cdot A = \rho' \cdot A' \implies \rho' = \rho \cdot \frac{A}{A'} = \rho \cdot 10^8 \quad (4.6)$$

La resistencia térmica por contacto

Según el modelo de XXXXXXXX:

$$h_c = \frac{k_s}{m} \cdot \left(\frac{P}{H_c} \right)^{0,95} \frac{P}{H_c} = \left[\frac{P}{c_1 \cdot (1,62 \cdot \sigma/m)^{c_2}} \right] \frac{1}{1 + 0,0071 \cdot c_2} \sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} k_s = \quad (4.7)$$

Para el dato $hc=1000$;

$$\frac{\sigma}{m} = \frac{\sigma_1}{m_1} h_{c1} = k_{s1} \cdot cte h_{c2} = k_{s2} \cdot cte k_{s1} = k_1 \frac{h_{c2}}{h_{c1}} = 2 \cdot \frac{k_2}{k_1 + k_2} = cof \quad (4.8)$$

$k_1=15$ y $k_2=1.5$

$$cof = 2 \cdot \frac{1,5}{15 + 1,5} = 0,18182 h_{c2} = h_{c1} \cdot cof = 181,82 \rightarrow h_{c2} = 181,82 \rightarrow R_{c2} = 5,5E-3 \quad (4.9)$$

4.4. Simulaciones

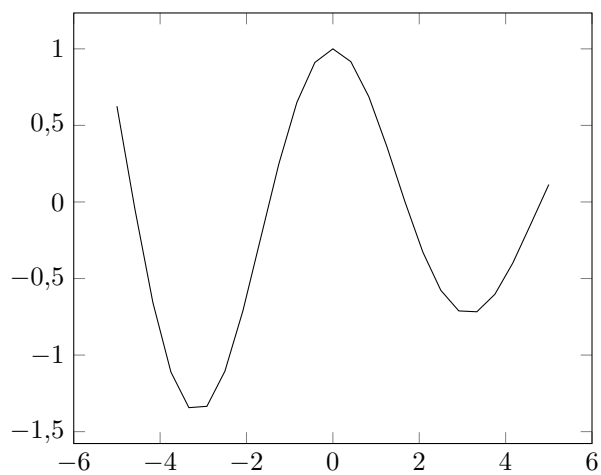
Capítulo 5

Resultados y discusión

En este capítulo...

5.1. Resultados

5.2. 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 pellentesque. 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] Tobias Burger, Caroline Sempere, Bosun Roy-Layinde, and Andrej Lenert. Present efficiencies and future opportunities in thermophotovoltaics. *Joule*, 4(8):1660–1680, 2020.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] A. Datas and R. Vaillon. Thermionic-enhanced near-field thermophotovoltaics for medium-grade heat sources. *Applied Physics Letters*, 114(13):133501, 2019.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Guido Guazzoni and Selma Matthews. A retrospective of four decades of military interest in thermophotovoltaics. *AIP Conference Proceedings*, 738(1):3–12, 2004.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Wan Emilin Suliza Wan Abdul Rashid, Pin Jern Ker, Md Zaini Bin Jamaludin, 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] David Wilt, Donald Chubb, David Wolford, Patrick Magari, and Chris Crowley. Thermophotovoltaics for space power applications. *AIP Conference Proceedings*, 890(1):335–345, 2007.
- [21] Hang Yu, Z. Ikonik, D. Indjin, and R.W. Kelsall. The effect of interface roughness on spectral efficiency of thermophotovoltaics with multi-layer filters. *Optik*, 257:168663, 2022.
- [22] Wenhui Zhu, Guang Zheng, Sen Cao, and Hu He. Thermal conductivity of amorphous SiO₂ thin film: A molecular dynamics study. *Scientific Reports*, 8(1):10537, July 2018.

Anexo: Documentación de la librería Travis

Se muestra a continuación la documentación del código de la librería Travis, realizada con un generador de documentación automático. En nuestro caso, el documentador elegido es Doxygen.