



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y  
DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**MODELADO DE ESPACIADORES  
NANOMÉTRICOS PARA UN  
CONVERTIDOR TERMO-FOTOVOLTAICO**

Martin Augusto Reigadas Teran

*Cotutor:* Esther López Estrada  
Alejandro Datas  
Instituto de Energía Solar  
*Tutor:* Pablo García-Linares

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

Madrid, Septiembre, 2022

**Título:** Modelado de espaciadores nanométricos para un convertidor termo-fotovoltaico

**Autor:** Martin Augusto Reigadas Teran

**Tutor:** Pablo García-Linares Fontes

**Cotutor:** Esther López Estrada y Alejandro Datas

## 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
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación del proyecto . . . . .	1
1.1.1. Crisis Energética . . . . .	1
1.1.2. Energías Renovables . . . . .	1
1.1.3. Aprovechamiento de energía . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	1
1.3. Estructura del documento . . . . .	1
<b>2. Estado del arte</b>	<b>3</b>
2.1. Introducción al capítulo . . . . .	3
2.2. Fotovoltaica . . . . .	3
2.2.1. Efecto fotovoltaico . . . . .	3
2.3. Termo-fotovoltaica . . . . .	3
2.4. Transmisión de calor . . . . .	3
2.4.1. Convección . . . . .	3
2.4.2. Radiación . . . . .	4
2.4.3. Conducción . . . . .	4
2.5. Investigaciones más importantes . . . . .	4
<b>3. Materiales y Herramientas</b>	<b>5</b>
3.1. Materiales . . . . .	5
3.1.1. Criterios . . . . .	5
3.1.2. Espaciador . . . . .	6
3.1.3. Emisor . . . . .	6
3.1.4. Receptor . . . . .	6
3.2. Herramientas . . . . .	6
3.2.1. edu... . . . .	6
3.2.2. Inventor 2021 . . . . .	6
3.2.3. Nastran Envioroment . . . . .	6
3.2.4. CFD . . . . .	6
3.2.5. MATLAB . . . . .	6

3.2.6. Calculadora de campo cercano . . . . .	6
<b>4. Métodos</b>	<b>7</b>
4.1. Criterios seguidos . . . . .	7
4.2. Simulación en CFD . . . . .	7
4.3. Análisis dimensional . . . . .	7
4.3.1. Área . . . . .	7
4.3.2. Volumen . . . . .	8
4.3.3. Conductancia Térmica . . . . .	8
4.3.4. Calor Específico . . . . .	8
4.3.5. Coeficiente de expansión térmica . . . . .	8
4.3.6. Densidad . . . . .	8
4.3.7. Resistencia de Contacto . . . . .	8
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>11</b>
5.1. Resultados . . . . .	11
5.2. Discusión . . . . .	11
<b>6. Conclusiones</b>	<b>13</b>
6.1. Conclusión . . . . .	13
6.2. Desarrollos futuros . . . . .	13
<b>A. Anexo ...</b>	<b>15</b>
A.1. Lorem ipsum . . . . .	15
<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>
<b>Anexo: Documentación de la librería Travis</b>	<b>19</b>

# Índice de figuras



# Índice de tablas





# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo no deben faltar los siguientes apartados:

### 1.1. Motivación del proyecto

#### 1.1.1. Crisis Energética

#### 1.1.2. Energías Renovables

#### 1.1.3. Aprovechamiento de energía

### 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.

- Obtención de la escala del modelo.
- Diseño del modelo y obtención de las propiedades de los materiales.
- Análisis de la influencia de la altura de los nano-espaciadores en la potencia de transmisión.
- Análisis de la influencia de la porosidad y resistencia de contacto en el flujo de calor por conducción.
- Determinar para que casos el sistema es viable.
- Comparación de los casos...

### 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.
- 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... [1] [3] [2] [4]

### 2.1. Introducción al capítulo

En este capítulo se exponen los principales temas de interés para la realización de este trabajo, así como los artículos más representativos usados durante la realización de este trabajo.

### 2.2. Energía solar fotovoltaica

Es una fuente de energía obtenida a partir de la radiación electromagnética del sol convertida en electricidad mediante una célula fotovoltaica por el efecto fotovoltaico.

#### 2.2.1. Efecto fotovoltaico

#### 2.2.2. Célula fotovoltaica

### 2.3. Termo-fotovoltaica

La termo-fotovoltaica convierte luz, en forma de ondas electromagnéticas, mediante el efecto fotovoltaico.

### 2.4. 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.

#### 2.4.1. 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.

### 2.4.2. Radiación

Plank

Campo Cercano

### 2.4.3. 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. Para una dimensión 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 ( $R = \sum R_i$ ).

Para el caso de transmisión de calor en serie existe un conjunto de resistencias que se producen por las imperfecciones en las interfaces de contacto entre los materiales, a dicha resistencia 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 [1], 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 [1] de unos  $4E-6 \text{ m}^2\text{K/W}$ , 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*.

## 2.5. Investigaciones más importantes

## Capítulo 3

# Materiales y Herramientas

En este capítulo se exponen los materiales utilizados para cada componente del sistema, las herramientas utilizadas para el modelado y simulación del sistema, y los motivos por de sus usos.

los motivos por el cual se han escogido dichos materiales, las herramientas utilizadas para el modelado del sistema, simulación de la transmisión de calor y cálculos de la radiación por efecto de campo cercano .

A su vez, se exponen los programas utilizados para la realización del modelo del espaciador, la simulación de la transmisión de calor y los cálculos de la radiación producida por el efecto de campo cercano, cin

### 3.1. Materiales

#### 3.1.1. Criterios

Para la selección de los materiales se sigue como principal criterio la disponibilidad del material en la IES

- Disponibilidad de los materiales

■

utilizar se tomó como principal criterio la disponibilidad de materiales en la IES, y como segundo criterios los casos de uso de los mismos y la disponibilidad

**3.1.2. Espaciador**

**3.1.3. Emisor**

**3.1.4. Receptor**

**3.2. Herramientas**

**3.2.1. edu...**

**3.2.2. Inventor 2021**

**3.2.3. Nastran Envioroment**

**3.2.4. CFD**

**3.2.5. MATLAB**

**3.2.6. 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 [1] se descubre como la resistencia de contacto afecta a los espaciadores y se obtiene el valor de su coeficiente( $\rho$ )  $4 \cdot 10^{-6} m^2 KW^{-1}$ . 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  $k_2=1.5$

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

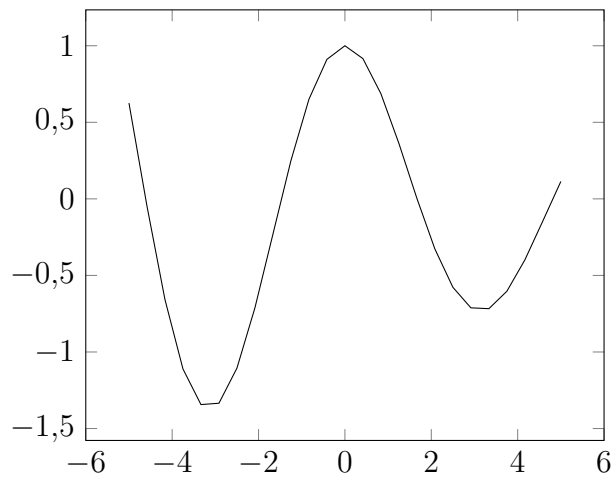


## Capítulo 5

# 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] Parallel-plate submicron gap formed by micromachined low-density pillars for near-field radiative heat transfer: *Applied Physics Letters*: Vol 106, No 8.
- [2] Matthew F. Campbell, Thomas J. Celenza, Felix Schmitt, Jared W. Schwede, and Igor Bargatin. Progress toward high power output in thermionic energy converters. *Advanced Science*, 8(9):2003812, 2021.
- [3] 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.
- [4] 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.



# 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.