



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: 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

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
Índice	xii
1. Introducción	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura del documento	3
2. Estado del arte	5
2.1. Tecnologías usadas para convertir el calor en electricidad	5
2.2. Termo-fotovoltaica	5
2.2.1. Célula fotovoltaica	5
2.2.2. Efecto fotovoltaico	6
2.3. Transmisión de calor	6
2.3.1. Convección	6
2.3.2. Radiación	6
2.3.3. Conducción	6
3. Materiales y Herramientas	9
3.1. Materiales	9
3.1.1. Criterios	9
3.1.2. Espaciador	10
3.1.3. Emisor	10
3.1.4. Receptor	10
3.2. Herramientas	10
3.2.1. edu...	10
3.2.2. Inventor 2021	10
3.2.3. Nastran Envioroment	10
3.2.4. CFD	10
3.2.5. MATLAB	10
3.2.6. Calculadora de campo cercano	10

4. Métodos	11
4.1. Criterios seguidos	11
4.2. Simulación en CFD	11
4.3. Análisis dimensional	11
4.3.1. Área	11
4.3.2. Volumen	12
4.3.3. Conductancia Térmica	12
4.3.4. Calor Específico	12
4.3.5. Coeficiente de expansión térmica	12
4.3.6. Densidad	12
4.3.7. Resistencia de Contacto	12
4.4. Simulaciones	13
5. Resultados y discusión	15
5.1. Resultados	15
5.2. Discusión	15
6. Conclusiones	17
6.1. Conclusión	17
6.2. Desarrollos futuros	17
A. Anexo ...	19
A.1. Lorem ipsum	19
Bibliografía	21
Anexo: Documentación de la librería Travis	23

Índice de figuras

1.1. Relación entre demanda total de energía primaria anual	1
1.3. Producción vs demanda de energía eléctrica anual	2

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.

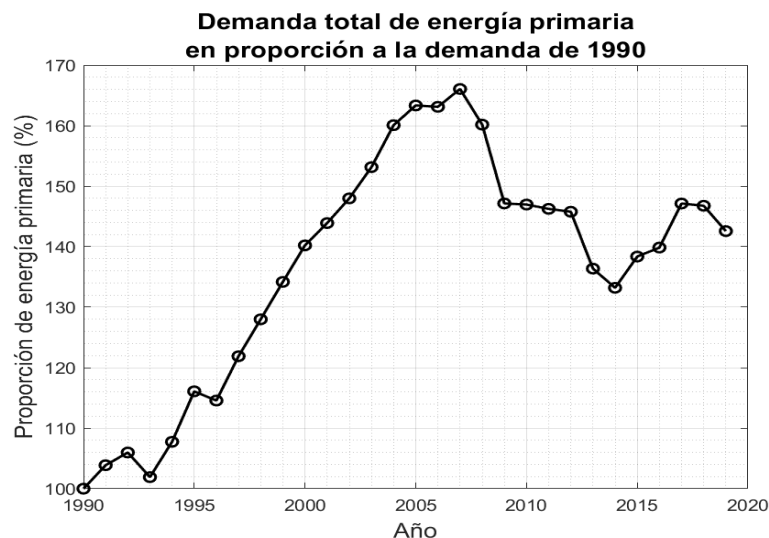


Figura 1.1: Representación gráfica de la relación entre la demanda total de energía primaria anual de 1990 hasta 2019 en España. *Fuente obtención de datos: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico de España.*

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 (figura 1.2a) y la industria consumió un 23.6 % de la energía final consumida en España (figura 1.2b), representando casi una cuarta parte del consumo total de energía final.

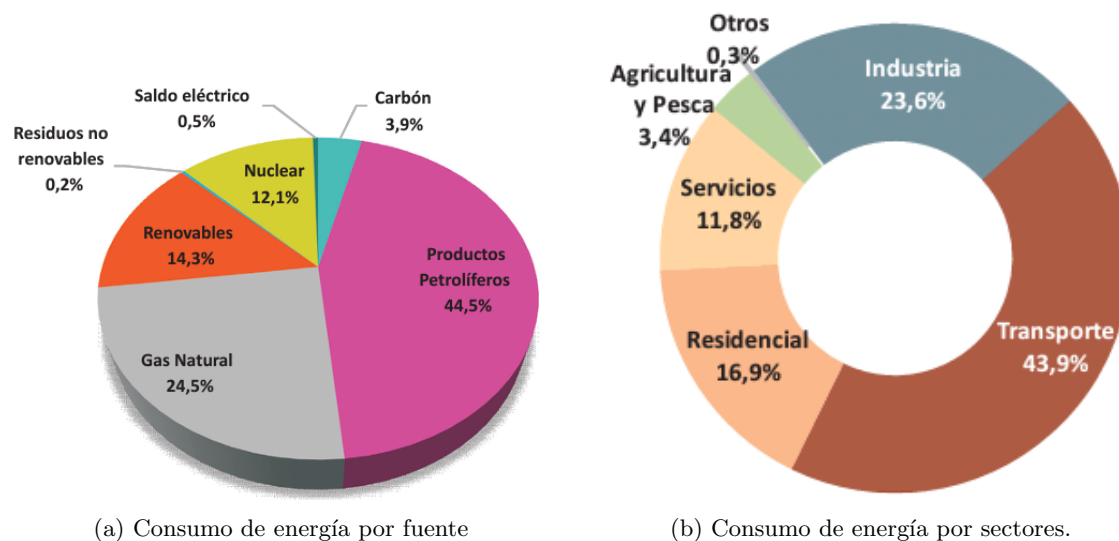


Figura 1.2: Desglose del consumo de energía primaria en España 2019 por fuente de energía(a). Consumo de energía final por sectores en el año 2019 en España(b). Fuente: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico de España.

año en el cual la ONU (Organización de las Naciones Unidas) aprobó la *Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible*, la cual cuenta con 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

De energías por fuente-¿energías por sector-¿Artículo de internet - ¿TPVs-¿Motivación del proyecto

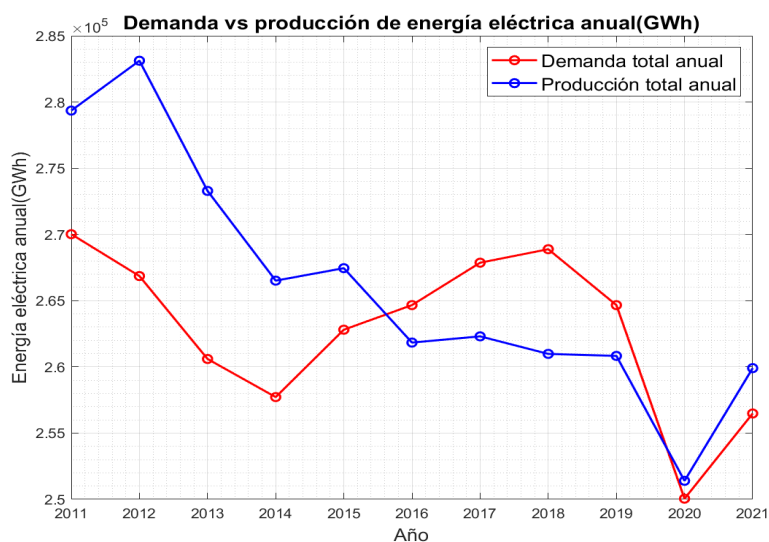


Figura 1.3: Comparación de la producción vs la demanda de energía eléctrica anual de España entre los años 2011 y 2021. Fuente: red eléctrica de España.

Objetivos del desarrollo sostenible

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.

- 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, así como los artículos más representativos usados durante la realización de este trabajo.

2.1. Tecnologías usadas para convertir el calor en electricidad

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

2.2. Termo-fotovoltaica

La termo-fotovoltaica (TPV) se basa en convertir la radiación electromagnética proveniente de una fuente de calor en electricidad [2], teniendo la ventaja sobre la fotovoltaica solar de que el emisor no está en constante movimiento [2].

La primera célula Thero

2.2.1. Célula fotovoltaica

Dispositivo eléctrico que convierte la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, generando una corriente proporcional a la intensidad de iluminación. En

Hoy en día una célula fotovoltaica se compone en su forma más sencilla de dos capas de semiconductores dopados, uno con un exceso de huecos y otro con exceso de electrones libres, llamados respectivamente semiconductor tipo p y tipo n, que forman una unión p-n produciéndose una región despoblada de electrones libres y huecos que generan una diferencia de potencial entre cada capa [4].

Estas células se agrupan en un conjunto de módulos para aumentar la potencia de salida, los cuales se pueden conectar en serie para aumentar la tensión o en paralelo para la corriente, que en conjunto con un sistema de seguimiento del punto

de máxima potencia se es capaz de extraer la mayor cantidad de energía de estos dispositivos como se describe en [4].

2.2.2. Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico fue primeramente reportado por Edmun Bequerel en 1839 cuando observaba el efecto de la luz en un electrodo de platino recubierto de plata inmerso en un electrólito produciéndose una corriente eléctrica [5], siendo usada en la primera aplicación industrial en 1954 [3] .

2.3. 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.

2.3.1. 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.

2.3.2. Radiación

Plank

Campo Cercano

2.3.3. 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 $4E-6 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, pero también se puede llegar a parametrizar para ciertos casos, como en **Otra cita-ción**, 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 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(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

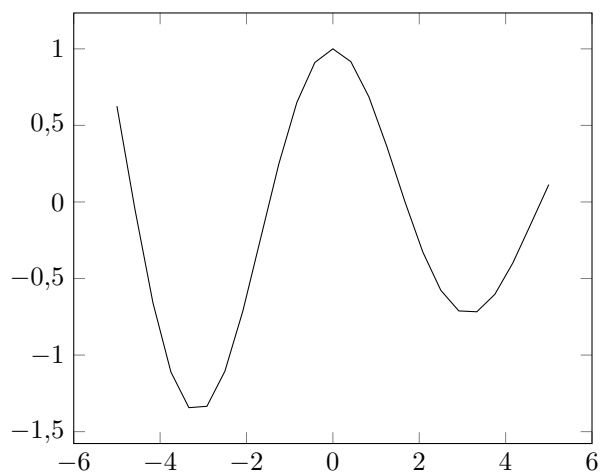
Capítulo 5

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] Parallel-plate submicron gap formed by micromachined low-density pillars for near-field radiative heat transfer: *Applied Physics Letters*: Vol 106, No 8.
- [2] Alejandro Datas and Rodolphe Vaillon. Chapter 11 - thermophotovoltaic energy conversion. In Alejandro Datas, editor, *Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion*, Woodhead Publishing Series in Energy, pages 285–308. Woodhead Publishing, 2021.
- [3] Ibrahim Dincer and Yusuf Bicer. 3.17 photonic energy production. In Ibrahim Dincer, editor, *Comprehensive Energy Systems*, pages 707–754. Elsevier, Oxford, 2018.
- [4] Alireza Khaligh and Omer C. Onar. 23 - energy sources. In Muhammad H. Rashid, editor, *Power Electronics Handbook (Fourth Edition)*, pages 725–765. Butterworth-Heinemann, fourth edition edition, 2018.
- [5] Y.N. Sudhakar, M. Selvakumar, and D. Krishna Bhat. Chapter 4 - biopolymer electrolytes for solar cells and electrochemical cells. In Y.N. Sudhakar, M. Selvakumar, and D. Krishna Bhat, editors, *Biopolymer Electrolytes*, pages 117–149. Elsevier, 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.