

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Industrial

### Análisis del comportamiento térmico de un sistema de inducción para la carga inalámbrica de vehículos

Autor: María del Rocío Benjumea Cervera

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

**Dpto. Ingeniería Energética**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla 2024





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

# **Análisis del comportamiento térmico de un sistema de inducción para la carga inalámbrica de vehículos**

Autor:

María del Rocío Benjumea Cervera

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Dpto. Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Máster: Análisis del comportamiento térmico de un sistema de inducción para la carga inalámbrica de vehículos

Autor: María del Rocío Benjumea Cervera

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis compañeros*



# Agradecimientos

---

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia. Ellos me animaron a hacer este máster y ellos me han apoyado y empujado durante estos dos años para terminarlo. Además, me han proporcionado facilidades para que pueda seguir con mis estudios a pesar de las circunstancias que han ido apareciendo.

En segundo lugar, mi reconocimiento a todos los profesores de la escuela, quienes han avivado mi interés por adquirir nuevos conocimientos y habilidades que serán fundamentales en mi futuro profesional. Agradezco especialmente a aquellos que me han desafiado, ya que son precisamente en esos momentos de adversidad donde se revela la verdadera fortaleza y se alcanzan los mayores aprendizajes.

Por último, agradecer a mis amigas. Ellas no han dejado que tire la toalla y me han impulsado hacia el éxito. Mirando hacia atrás, me han acompañado en este recorrido desde el principio hasta el final. Es una suerte que no todos tienen.



El constante aumento en la demanda de transporte por carretera impulsa la necesidad de desarrollar estrategias que sean sostenibles a largo plazo. En este contexto, surge el concepto de eRoad ("electrificación de carreteras") como una fusión de tecnologías que prometen llevar la movilidad por carretera hacia un nuevo nivel de eficiencia y colaboración entre la infraestructura vial, el medio ambiente y los vehículos.

La idea de *eRoad* es transformar las carreteras convencionales en sistemas interactivos y energéticamente eficientes, capaces de alimentar vehículos eléctricos mientras están en movimiento. Este enfoque no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de carbono, sino que también optimiza la infraestructura existente para adaptarse a las necesidades cambiantes de la movilidad urbana.

Desde el punto de vista de las infraestructuras viarias, la integración de estas funciones innovadoras en las carreteras existentes puede convertirse en una oportunidad para el desarrollo futuro de la ingeniería de infraestructuras. Sin embargo, nuestros actuales métodos de diseño, construcción y principios de mantenimiento de carreteras no garantizan necesariamente ese rendimiento de la estructura de la carretera. En otras palabras, un daño prematuro o un fallo de funcionamiento dentro del sistema integrado amenazaría enormemente su viabilidad de uso en la práctica.

Por lo tanto, este proyecto pretende abordar este problema de "compatibilidad" mediante la realización de un análisis del comportamiento del sistema de inducción empotrado en el pavimento de las carreteras que permite la carga inductiva inalámbrica dinámica.



# Abstract

---

The constant increase in road transportation demand drives the need to develop long-term sustainable strategies. In this context, the concept of *eRoad* ("electrification of roads") emerges as a fusion of technologies promising to take road mobility to a new level of efficiency and collaboration among road infrastructure, the environment, and vehicles.

The idea behind *eRoad* is to transform conventional roads into interactive and energy-efficient systems capable of powering electric vehicles while they are in motion. This approach not only reduces dependence on fossil fuels and carbon emissions but also optimizes existing infrastructure to adapt to the changing needs of urban mobility.

From the perspective of road infrastructure, the integration of these innovative functions into existing roads can become an opportunity for the future development of infrastructure engineering. However, our current methods of road design, construction, and maintenance do not necessarily guarantee the performance of the road structure. In other words, premature damage or malfunction within the integrated system would greatly threaten its practical viability.

Therefore, this project aims to address this "compatibility" issue by conducting an analysis of the behavior of the embedded induction system in road pavements that enables dynamic wireless inductive charging.

---

|   |              |
|---|--------------|
| <b>Agradecimientos</b>  | <b>ix</b>    |
| <b>Resumen</b>  | <b>xi</b>    |
| <b>Abstract</b>   | <b>xiii</b>  |
| <b>Índice</b>   | <b>xiv</b>   |
| <b>Índice de Tablas</b>   | <b>xvi</b>   |
| <b>Índice de Figuras</b>  | <b>xviii</b> |
| <b>Índice de Gráficas</b>   | <b>xx</b>    |
| <b>Notación</b>   | <b>xxiii</b> |
| <b>Introducción y objetivos</b>   | <b>1</b>     |
| <i>Objetivos</i>  | 2            |
| <b>1 Estado del arte</b>  | <b>3</b>     |
| 1.1. <i>Ingeniería del pavimento</i>  | 3            |
| 1.1.1 Transferencia de calor en pavimentos  | 3            |
| 1.1.2 Propiedades   | 4            |
| 1.2. <i>eRoad</i>   | 6            |
| 1.2.1 Retos de la integración de las infraestructuras   | 6            |
| 1.2.2 Instalación de las unidades de carga  | 8            |
| 1.2.3 Consideraciones para la implementación de sistemas de transferencia de energía en las carreteras  | 9            |
| 1.2.4 Impactos del módulo de carga en el rendimiento del pavimento  | 10           |
| 1.2.5 Influencia de la temperatura alcanzada  | 12           |
| 1.3. <i>Comportamiento del asfalto sometido a distintas aplicaciones de calentamiento por inducción</i>   | 13           |
| 1.3.1 Curación del asfalto mediante calentamiento por inducción   | 13           |
| 1.3.2 Fusión de hielo y nieve con calentamiento por inducción   | 15           |
| 1.3.3 Rendimiento del calentamiento por inducción de los pavimentos de asfalto que incorporan capas conductoras de electricidad y absorbentes de magnetismo | 16           |
| <b>2 Modelo 1D en régimen permanente</b>  | <b>18</b>    |
| 2.1. <i>Modelo</i>  | 19           |
| 2.1.1 Datos   | 19           |
| 2.1.2 Balances  | 20           |
| 2.1.3 Flujos de calor   | 20           |
| 2.2. <i>Análisis de sensibilidad</i>  | 21           |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.2.1.   | Temperatura media del terreno (Tt)  | 21        |
| 2.2.2.   | Temperatura exterior (Te) y radiación solar ( <i><math>\varphi_{sol}</math></i> ) | 21        |
| 2.2.3.   | Potencia inducida en la bobina (P)  | 27        |
| 2.3.     | <i>Resumen de resultados</i>  | 27        |
| <b>3</b> | <b>Modelo 1D en régimen transitorio</b>   | <b>29</b> |
| 3.1.     | <i>Modelo</i>   | 30        |
| 3.1.1.   | Datos   | 30        |
| 3.1.2.   | Balances  | 30        |
| 3.1.3.   | Flujos de calor   | 31        |
| 3.2.     | <i>Análisis de sensibilidad</i>   | 32        |
| 3.2.1.   | Con temperatura exterior constante  | 33        |
| 3.2.2.   | Con temperatura exterior variable   | 39        |
| 3.2.3.   | Análisis de resultados  | 44        |
| <b>4</b> | <b>Conclusiones</b>   | <b>48</b> |
|          | <b>Referencias</b>  | <b>50</b> |
|          | <b>Anexos</b>   | <b>52</b> |
|          | <i>Anexo A: Código EES modelo 1D disipación del terreno. Régimen permanente.</i>  | 52        |
|          | <i>Anexo B: Código EES modelo 1D disipación del terreno. Régimen transitorio.</i> | 53        |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Verano. Temperaturas máximas alcanzadas por el asfalto y la bobina en diferentes situaciones con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)   | 44 |
| Tabla 2: Invierno. Temperaturas máximas alcanzadas por el asfalto y la bobina en diferentes situaciones con temperatura exterior constante. (Elaboración propia) | 45 |
| Tabla 3: Verano. Temperaturas máximas alcanzadas por el asfalto y la bobina en diferentes situaciones con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)    | 45 |
| Tabla 4: Invierno. Temperaturas máximas alcanzadas por el asfalto y la bobina en diferentes situaciones con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)  | 45 |
| Tabla 5: Temperatura máximas del asfalto y de bobina según el coeficiente $Ch$ en verano. (Elaboración propia)   | 46 |
| Tabla 6: Temperatura máximas del asfalto y de bobina según el coeficiente $Ch$ en invierno. (Elaboración propia)   | 47 |



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Ilustración de eRoad con carga conductiva e inductiva. [3]  | 1  |
| Figura 2: Transferencia de calor en pavimentos. [4]   | 3  |
| Figura 3: Retos técnicos para la integración del sistema de carga inalámbrica de inducción dinámica en una carretera asfaltada. [1] | 7  |
| Figura 4: Unidades de carga con estructura esquelética. [7]   | 8  |
| Figura 5: Unidad de carga prefabricada. [8]   | 9  |
| Figura 6: Daños en el pavimento relacionados con el empotramiento de la unidad de carga. [3]  | 11 |
| Figura 7: Comparación de la temperatura máxima entre el cálculo y la medición frente al desplazamiento horizontal. [10]             | 12 |
| Figura 8: Grad T de la muestra bajo diferentes tiempos de calentamiento. [13]   | 14 |
| Figura 9: Comparación de las tasas de curación a diferentes distancias de calentamiento. [13]                                       | 15 |
| Figura 10: El principio de absorción magnética de las capas de absorción magnética. [11]  | 17 |
| Figura 11: Superficies de intercambio. (Elaboración propia)   | 18 |
| Figura 12. Esquema modelo 1D en régimen permanente. (Elaboración propia)  | 19 |
| Figura 13: Esquema modelo 1D en régimen transitorio. (Elaboración propia)   | 29 |



# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

|   |    |
|---|----|
| Gráfica 1: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura del terreno. (Elaboración propia)  | 21 |
| Gráfica 2: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 0 W/m <sup>2</sup> .  | 22 |
| Gráfica 3: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 100 W/m <sup>2</sup> . (Elaboración propia)                       | 22 |
| Gráfica 4: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 200 W/m <sup>2</sup> . (Elaboración propia)                       | 23 |
| Gráfica 5: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 300 W/m <sup>2</sup> . (Elaboración propia)                       | 23 |
| Gráfica 6: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 400 W/m <sup>2</sup> . (Elaboración propia)                       | 24 |
| Gráfica 7: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 500 W/m <sup>2</sup> . (Elaboración propia)                       | 24 |
| Gráfica 8: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 600 W/m <sup>2</sup> . (Elaboración propia)                       | 25 |
| Gráfica 9: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 700 W/m <sup>2</sup> . (Elaboración propia)                       | 25 |
| Gráfica 10: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 800 W/m <sup>2</sup> . (Elaboración propia)                      | 26 |
| Gráfica 11: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 0 W/m <sup>2</sup> y 800 W/m <sup>2</sup> . (Elaboración propia) | 26 |
| Gráfica 12: Temperatura del asfalto y de la bobina según la potencia de la bobina.(Elaboración propia)  | 27 |
| Gráfica 13: Verano. Potencia de la bobina constante de 215 W con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)   | 33 |
| Gráfica 14: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)   | 34 |
| Gráfica 15: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos excepto de 23:00h-7:00h que la potencia es nula con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)   | 35 |
| Gráfica 16: Verano. Potencia de la bobina constante de 0 W con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)   | 35 |
| Gráfica 17: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos y radiación solar nula con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)                            | 36 |
| Gráfica 18: Invierno. Potencia de la bobina constante de 215 W con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)   | 36 |
| Gráfica 19: Invierno: Potencia de la bobina variable cada 6 segundos con temperatura exterior constante. (Elaboración propia).  | 37 |

|   |    |
|---|----|
| Gráfica 20: Invierno. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos excepto de 23:00h-7:00h que la potencia es nula con temperatura exterior constante. (Elaboración propia) | 38 |
| Gráfica 21: Potencia de la bobina constante de 0 W con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)   | 38 |
| Gráfica 22: Invierno. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos y radiación solar nula con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)                          | 39 |
| Gráfica 23: Verano. Potencia de la bobina constante de 215 W con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)  | 40 |
| Gráfica 24: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)  | 40 |
| Gráfica 25: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos excepto de 23:00h-7:00h que la potencia es nula con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)    | 41 |
| Gráfica 26: Verano. Potencia de la bobina constante de 0 W con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)  | 41 |
| Gráfica 27: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos y radiación solar nula con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)                             | 42 |
| Gráfica 28: Invierno. Potencia de la bobina constante de 215 W con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)  | 42 |
| Gráfica 29: Invierno: Potencia de la bobina variable cada 6 segundos con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)  | 43 |
| Gráfica 30: Invierno. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos excepto de 23:00h-7:00h que la potencia es nula con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)  | 43 |
| Gráfica 31: Potencia de la bobina constante de 0 W con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)  | 44 |
| Gráfica 32: Invierno. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos y radiación solar nula con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)                           | 44 |



eRoad

Electrified Road



# INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

La descarbonización del transporte por carretera mediante el uso de diferentes vehículos eléctricos ha generado grandes esperanzas de mejorar la sostenibilidad en el sector del transporte por carretera, mientras que el desarrollo real está todavía en su fase inicial debido a las limitaciones impuestas por las tecnologías de almacenamiento de energía a bordo. Para resolver este problema, en los últimos años se han desarrollado activamente soluciones alternativas que permiten que los vehículos eléctricos tengan un fácil acceso a la carga de la batería fuera de casa. Estas tecnologías muestran la posibilidad de llenar el vacío técnico y apoyar la electrificación de las carreteras a gran escala. En particular, la tecnología de transferencia de carga inductiva, que permite la carga inalámbrica de los vehículos eléctricos y que puede ampliarse de forma dinámica, ha despertado un gran interés en todo el mundo. [1]

La implantación de la movilidad basada en los vehículos eléctricos se ha visto restringida por numerosas deficiencias, como su autonomía de conducción, el tamaño de la batería, la dependencia de las estaciones de carga y el tiempo necesario para su recarga. Sin embargo, la electrificación de la infraestructura vial, que permitirá una carga inalámbrica dinámica de los vehículos eléctricos durante la conducción, se está convirtiendo en una solución potencial para superar estas deficiencias. Este concepto difiere de las soluciones estáticas actuales para los vehículos eléctricos que deben cargarse antes de su uso. [2]

Entra en juego un papel importante en la implantación de este sistema de transferencia dinámica de energía inalámbrica: la electrificación de las carreteras. Aparece el término de *eRoad* (“electrified road”) que, debido a la complejidad de su integración, es necesario realizar un estudio previo para conocer, no sólo de los requisitos estructurales y de rendimiento, sino también los posibles impactos ambientales, económicos y sociales.

La siguiente figura muestra el concepto general de de *eRoad* en el sistema de transporte electrificado.



Figura 1: Ilustración de eRoad con carga conductiva e inductiva. [3]

## Objetivos

El objetivo del proyecto es analizar el comportamiento de diversos parámetros de un sistema de inducción compuesto por una bobina enterrada en el terreno, con el propósito de estudiar la carga inalámbrica de inducción dinámica y mejorar la eficiencia energética en el sector de la movilidad.

Para alcanzar este objetivo, la primera sección del proyecto se dedica a proporcionar un panorama detallado del estado actual de la electrificación de las carreteras. Se examinan las distintas consideraciones que entran en juego en la implementación de sistemas de transferencia de energía, incluyendo aspectos técnicos, económicos y de infraestructura. Además, se analiza cómo el módulo de carga instalado en el pavimento puede influir en el diseño y la funcionalidad de estos sistemas, así como el impacto en el comportamiento del asfalto cuando se somete a diversas aplicaciones de calentamiento por inducción.

En las secciones dos y tres, se llevó a cabo un estudio para analizar varios parámetros, incluyendo la temperatura del asfalto y de la bobina bajo diferentes escenarios, considerando variables como la irradiancia solar, la potencia de la bobina, etc. Para ello, en la sección dos se realizó un análisis con un modelo unidimensional en régimen permanente, mientras que en la sección tres se abordó en régimen transitorio, lo que proporciona una visión más completa de su dinámica y respuesta a cambios repentinos.

Finalmente, en el apartado cuatro, se presentan las conclusiones del estudio, donde se recopilan y los resultados obtenidos a lo largo del proyecto. En esta sección, se realiza una evaluación detallada de los hallazgos más significativos, destacando tanto los aspectos positivos como las limitaciones identificadas durante el proceso.

# 1 ESTADO DEL ARTE

## 1.1. Ingeniería del pavimento

El pavimento es un elemento esencial en la construcción de cualquier carretera. Está formado por capas superpuestas que crean una estructura a partir de la composición de ciertos materiales seleccionados y procesados que se colocan sobre el suelo de base o subrasante. El pavimento cumple dos funciones fundamentales; en primer lugar, sirve de referencia para que el conductor pueda delimitar la calzada dando una perspectiva visual de la alineación horizontal y vertical del camino recorrido. En segundo lugar y más importante, es el responsable de recibir las cargas de tráfico y transmitir las a través de la estructura asegurando una integridad mecánica. Es decir, soportar las cargas de las ruedas aplicadas a la calzada y distribuirlas a la subrasante subyacente, por lo que un diseño adecuado debe considerar el efecto de estas acciones para asegurar el comportamiento de la infraestructura. [2]

### 1.1.1 Transferencia de calor en pavimentos

La transferencia de calor en los pavimentos es un elemento importante que explica el mecanismo de cómo cambia su temperatura. Esta transferencia se refiere al movimiento de energía térmica a través de los límites del sistema debido a la diferencia de temperatura entre el pavimento asfáltico y su entorno. La figura 2 ilustra el fenómeno de transferencia de calor que se produce en los pavimentos a través de algunos mecanismos principales (es decir, conducción, convección, reflexión y emisiones de radiación) que indican el comportamiento térmico de los materiales. Además, la evaporación de la lluvia y del agua superficial influye en la transferencia de calor porque contribuye a reducir la temperatura de la superficie del pavimento. Sobre la base de la figura 2, estos mecanismos térmicos pueden describirse como un proceso que se inicia con la radiación solar, que atraviesa la atmósfera, choca con la superficie del pavimento y se refleja, absorbe y finalmente se transfiere a través del pavimento. [4]

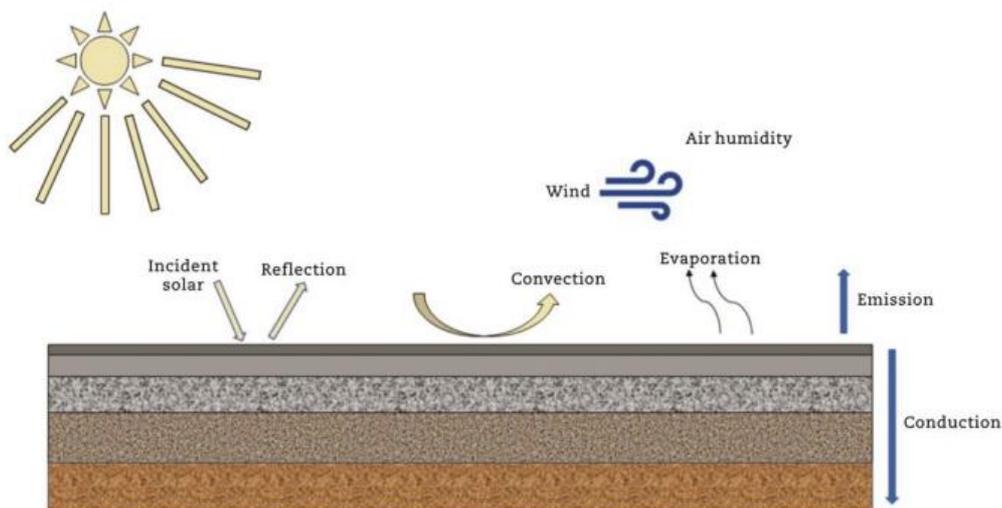


Figura 2: Transferencia de calor en pavimentos. [4]

La radiación por transferencia de calor es la energía que irradia el sol y es absorbida por los pavimentos. La cantidad de transferencia de calor depende del material y el color de la superficie, así como de la longitud de onda de la radiación entrante. Durante este proceso, la radiación solar llega a la superficie del pavimento, donde una parte se refleja mientras que el resto se absorbe y se transfiere en calor a través del pavimento. Las variaciones en la temperatura del pavimento pueden explicarse por la cantidad de radiación de onda corta que llega a la superficie del pavimento.

La transferencia de calor que se produce entre dos cuerpos sólidos en contacto físico se denomina conducción. Este proceso describe el sistema de energía de transferencia de calor que fluye desde la capa de alta temperatura del pavimento a la siguiente capa con una temperatura más baja hasta que se alcanza el equilibrio térmico. Por ejemplo, la conductividad térmica, la capacidad calorífica y la densidad se definen como tipos de conducción vertical del calor.

En el caso de los pavimentos, la convección también se produce cuando el calor se transfiere del aire al pavimento. El coeficiente de convección se ve afectado exclusivamente por la geometría, las propiedades del fluido, el estado del flujo y la rugosidad de la superficie. Por lo tanto, se reduce cuando la velocidad del viento y la turbulencia del aire sobre la superficie son bajas, así como cuando las variaciones de la temperatura del aire y de la superficie son pequeñas. Por ejemplo, los pavimentos permeables tienen superficies más rugosas y una mayor proporción de vacíos de aire que los pavimentos normales. Las estructuras de huecos abiertos y las superficies expuestas permiten que las corrientes de aire fluyan a través del pavimento, aumentando así el potencial de convección entre el pavimento y el aire. Como resultado, el proceso reduce el calor en el pavimento, dependiendo de las condiciones del flujo de aire.

Por el contrario, la evaporación también puede disminuir la temperatura del pavimento por el calor latente absorbido durante la transformación del agua en vapor, especialmente con un pavimento poroso que permite que el agua permee a través del pavimento. Los pavimentos permeables pueden proporcionar estos beneficios al inducir el calor latente del agua almacenada. El efecto de enfriamiento de la evaporación depende en gran medida de la tasa de evaporación. [4]

### 1.1.2 Propiedades

La cantidad de energía solar que puede ser absorbida o reflejada por un material depende de las propiedades físicas del mismo, especialmente las relacionadas con su superficie. La cantidad de energía solar absorbida que se transfiere en forma de calor al interior de un material depende de la conductividad de este. Posteriormente, este calor se libera a los alrededores en forma de ondas infrarrojas a través de la emisión. Las propiedades termofísicas suelen estar relacionadas con la capacidad de un material para transferir y almacenar calor sin sufrir una reacción o un cambio químicos, que varía con la temperatura, la presión y la composición. [5]

Estas propiedades incluyen el albedo, la emisividad, el índice de reflectancia solar, la conductividad térmica, la capacidad calorífica, la difusividad térmica, la densidad y la permeabilidad.

- Albedo: el porcentaje de energía solar reflejada por una superficie. Los materiales con un albedo considerable pueden reducir las temperaturas del pavimento.
- Emisividad ( $\epsilon$ ): es una medida de la superficie radiada del material o del nivel de calor (escalado de 0 a 1) que se libera en el entorno. Es una proporción de energía emitida desde la superficie de un material a un cuerpo negro en condiciones similares.

- Capacidad calorífica específica (Cp): es la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de una unidad de peso en 1°C sin cambiar la fase del material. La unidad de medida es J/(kg\*°C) o J/(kg\*K) para los pavimentos; describe la capacidad térmica volumétrica utilizada para expresar la cantidad de energía que se absorbe y almacena en el pavimento a una determinada temperatura.
- Difusividad térmica: es un parámetro que describe cómo el calor se propaga a través del cuerpo de un material.
- Densidad: no es una propiedad térmica, pero influye en el comportamiento térmico. La temperatura aumenta a medida que se incrementa la densidad porque la transferencia de calor dentro del material se hace más efectiva a través de la conducción.
- Conductividad térmica (k): se utiliza para explicar y medir la transferencia de calor a través de un cuerpo; dicha transferencia se produce cuando el calor de la superficie se transfiere a la sección fría del cuerpo a través de interacciones a microescala.

Es un importante parámetro del material que determina las condiciones térmicas de un pavimento, e influye en el agrietamiento y la formación de surcos del mismo.

La ley de Fourier determina el flujo de calor por conducción a partir de la distribución de temperaturas y de la conductividad térmica del material.

Si se reduce la conductividad térmica en los pavimentos para reducir la tasa de flujo de calor a través de ellos por la incidencia solar y por las altas temperaturas del aire, se reduce la temperatura del pavimento. Esto es importante en cuanto a la capacidad de absorción de calor inicial del material para minimizar la transferencia de calor dentro de la estructura del pavimento. Por lo tanto, es preferible una baja conductividad térmica de los materiales, ya que tiende a conducir menos calor a lo largo de la estructura del pavimento y evitar que se caliente el entorno. Cuanto más gruesas sean las capas del pavimento, mayor será la resistencia térmica o su resistencia a la transferencia de calor. Esto es ideal para el propio pavimento asfáltico, ya que se prefieren los materiales con menor susceptibilidad a la temperatura para mejorar su rendimiento. La reducción de la capacidad de transferencia de calor podría reducir cualquier cambio potencial en el comportamiento mecánico debido a los cambios de temperatura.

Son muchos los factores que intervienen en la conductividad térmica de un material. Por ejemplo, la conductividad térmica de un pavimento puede modificarse utilizando diferentes diseños de mezcla y tipos y proporciones de áridos. La conductividad térmica de los materiales de base de los áridos y de la subrasante depende de la naturaleza del material, el contenido mineral, el contenido de humedad, el tamaño de la gradación y la gravedad específica. Por lo tanto, la conductividad térmica puede ser difícil de controlar en varios tipos de pavimentos de asfalto.

Relación con la humedad: la relación entre la conductividad térmica y el contenido de humedad es lineal: a medida que el contenido de humedad disminuye, la conductividad térmica del hormigón disminuye. Por cada 1% de diferencia en el contenido de humedad, la conductividad térmica varía entre un 7 y un 10%, dependiendo de la mezcla de hormigón. La variación de la conductividad térmica con la humedad es muy importante

en las estructuras de pavimento debido a los perfiles de humedad no lineales.

El rendimiento térmico de los materiales puede evaluarse teniendo en cuenta sus propiedades termofísicas. El control de las propiedades del material afecta a la superficie del pavimento y a la absorción, el almacenamiento y la cantidad de calor radiado. Las propiedades termofísicas de un material tienen un impacto considerable en la distribución y la variación de las temperaturas en las capas de un pavimento. Las propiedades termofísicas internas, como la conductividad térmica, la capacidad calorífica y la densidad, también son cruciales para el comportamiento térmico general de los materiales de pavimentación. La densidad de un pavimento puede aumentar las temperaturas a media profundidad y afectar a las respuestas de calentamiento y enfriamiento, junto con la capacidad de almacenamiento.

Los pavimentos de asfalto tienen un albedo más bajo que otros tipos de pavimento. La mayoría del estudio se han centrado en la edad del pavimento asfáltico, la profundidad de las capas del pavimento, el tipo de agregado utilizado o los factores estructurales relacionados con los tipos de diseño de los pavimentos asfálticos. Se ha comprobado que estas características influyen en la cantidad de radiación solar reflejada y absorbida, en la cantidad total de calor liberado y en el nivel de calor borrado durante la noche. Por lo tanto, se pueden utilizar muchas técnicas, incluyendo el uso de diferentes métodos o materiales durante la construcción de nuevos pavimentos de asfalto, para disminuir el impacto de su temperatura en el área circundante. [5]

## 1.2. eRoad

Las carreteras electrificadas están diseñadas para proporcionar energía para cargar los vehículos eléctricos de forma dinámica. Sin embargo, también deben garantizar una capacidad estructural y un funcionamiento de la superficie similares a los de las carreteras tradicionales.

### 1.2.1. Retos de la integración de las infraestructuras

Para lograr una implementación sostenible de un sistema de *eRoad* basado en la transferencia de energía inductiva, se han realizado muchos estudios de viabilidad, en términos de rendimiento del sistema de carga (por ejemplo, la eficiencia energética, la distancia de transferencia, la seguridad), la red eléctrica, la aceptación de los clientes, la legislación, los beneficios e impactos sociales y ambientales. Desde el punto de vista de la infraestructura vial, la *eRoad* debe cumplir los requisitos de rendimiento a largo plazo para servir como una carretera ordinaria por la que circular y, al mismo tiempo, suministrar eficientemente la energía eléctrica a los vehículos eléctricos en movimiento.

Hay que tener en cuenta que para construir una *eRoad* utilizando esta tecnología, es necesario integrar en el pavimento de la carretera instalaciones como los transmisores (bobinas, núcleos de ferrita) y otros sensores de control. Es de suma importancia que esta integración no influya en el rendimiento de los componentes individuales.

Además, es igualmente esencial la protección de la estructura de la carretera en su conjunto. Si una *eRoad* resulta dañada durante su vida útil, los sistemas de transferencia de energía por inducción no podrán funcionar correctamente, lo que dejará a la *eRoad* en un estado general de mal funcionamiento para cargar vehículos eléctricos o incluso para soportar la movilidad del tráfico convencional.

La tecnología actual y las bases de conocimiento en ingeniería vial no están necesariamente preparadas para una integración exitosa de tal sistema en una estructura vial.

Los investigadores han sugerido los retos técnicos emergentes de la integración de la tecnología de transferencia de energía inductiva en las carreteras físicas, que surgen de dos aspectos principales [1]:

- Las influencias sobre el rendimiento estructural de la *eRoad* en condiciones operativas debido a la incrustación de la tecnología de carga.
- El efecto sobre la eficiencia de carga del sistema debido a la integración, por ejemplo, la pérdida de energía causada dentro de los materiales de la *eRoad* cuando los campos magnéticos alternos pasan a través de ellos.

La siguiente figura muestra un vehículo eléctrico sometido al el proceso de carga inalámbrica. Se señalan los dos aspectos mencionados como retos técnicos para la integración del sistema de carga inalámbrica. Los puntos rojos hacen referencia a los daños estructurales causados por la incrustación y la doble flecha amarilla representa las pérdidas de energía.

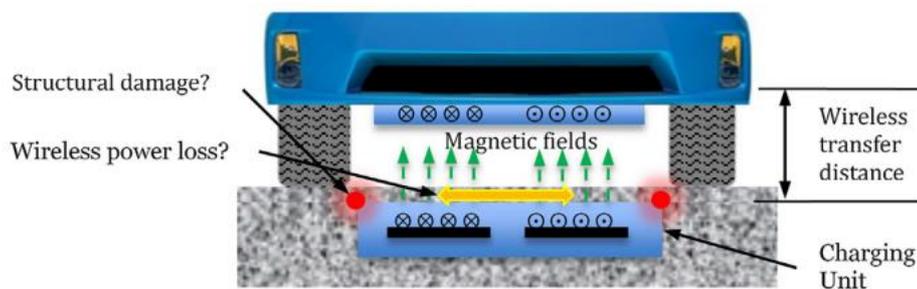


Figura 3: Retos técnicos para la integración del sistema de carga inalámbrica de inducción dinámica en una carretera asfaltada. [1]

Además, aunque los retos técnicos puedan resolverse y la madurez de la tecnología se acerque a un nivel de despliegue, podría seguir siendo importante reflexionar sobre el beneficio medioambiental real del uso de la tecnología. Esto debería lograrse realizando una evaluación exhaustiva del rendimiento de la sostenibilidad del ciclo de vida de la infraestructura de *eRoad*, así como de las influencias consecuentes para la sostenibilidad holística de un transporte por *eRoad*. Todos estos aspectos técnicos y medioambientales son de vital importancia para la implantación sostenible de la tecnología *eRoad*. [1]

Sin embargo, la seguridad de las personas es el factor más importante para el estudio de esta tecnología. La carga inalámbrica conlleva tres importantes problemas potenciales de salud y seguridad: riesgos eléctricos, magnéticos y de incendio. Estos sistemas funcionan con niveles de corriente y tensión elevados. Esto puede crear un riesgo de descarga eléctrica debido a un mal funcionamiento o a un daño accidental del dispositivo, derivado de las condiciones ambientales (calor o frío) y de los daños físicos. [6]

Además, la transferencia de alta potencia desde el transmisor a las almohadillas de carga del receptor se produce en grandes espacios de aire de 150 mm a 300 mm a unos kilohercios a unos pocos megahercios. Como resultado, se generan flujos de fuga de alta frecuencia debido a los grandes espacios de aire. El nivel de estos flujos de exposición debe estar por debajo o cumplir las directrices de exposición humana para una serie de partes del cuerpo humano. Los valores de los límites

permitidos se han especificado en términos de exposición máxima permitida (MPE) y relación de absorción específica (SAR).

Por ejemplo, una persona con dispositivos de monitorización de la salud, como un marcapasos, puede tener posibles problemas de salud si está expuesta a flujos de fuga. Esto puede ocurrir si está sentado dentro del coche cuando éste es inalámbrico o si camina o está de pie cerca de las unidades de carga inalámbrica.

Por otra parte, los dispositivos de alta potencia siempre suponen un riesgo de incendio debido a fallos o averías en los componentes electrónicos o mecánicos. Esto puede crear condiciones que pongan en peligro la vida en las carreteras de alta densidad de vehículos. Por ejemplo, el aislamiento de los cables o el fallo de los dispositivos de conmutación pueden provocar un cortocircuito y causar un incendio. Para evitar estos problemas de funcionamiento, hay que establecer normas, reglamentos y estándares de fabricación. Esto incluye las condiciones meteorológicas, ya que la temperatura en algunos países varía de extremadamente fría a calurosa en el transcurso de un año. En general, los sistemas de carga inalámbrica requieren normas de salud y seguridad desde el diseño, la construcción, la fabricación y la instalación (incluido el mantenimiento) para evitar cualquier preocupación importante para el usuario. [6]

### 1.2.2. Instalación de las unidades de carga

Aunque la configuración de las instalaciones de inducción en el interior del pavimento sigue siendo ambigua, la inclusión de los sistemas de recarga en la carretera podría realizarse de diferentes maneras. Sin embargo, en general, podrían prevalecer dos enfoques básicos entre otros:

- Los componentes se instalan directamente en el pavimento como una estructura esquelética en el lugar correspondiente que se rellenará posteriormente con materiales del pavimento para su sellado y protección. [7]



Figura 4: Unidades de carga con estructura esquelética. [7]

- Las instalaciones de inducción se integran en una unidad prefabricada, como una entidad sólida o losa, y se incrustan como una sola pieza en el pavimento. [7]



Figura 5: Unidad de carga prefabricada. [8]

Desde el punto de vista de la infraestructura vial, ambos métodos de empotramiento podrían plantear problemas, derivados de dos aspectos principales: los posibles daños prematuros en los primeros años de vida útil y el mantenimiento rentable a largo plazo.

### 1.2.3. Consideraciones para la implementación de sistemas de transferencia de energía en las carreteras

La integración de las *eRoads* en el transporte por carretera es un proceso progresivo y lento. Además, en lo que se refiere a cuestiones económicas, cada paso hacia estos sistemas requiere más recursos que una carretera convencional; por ejemplo, el desarrollo de diseños estructurales innovadores adecuados para garantizar su rendimiento, la compleja construcción con sus correspondientes actividades de mantenimiento futuras teniendo en cuenta la falta de experiencia previa y el uso de nuevos materiales y componentes desconocidos, entre otros. Sin embargo, esta integración también produciría beneficios potenciales en términos energéticos y medioambientales como: romper con el consumo de combustibles fósiles y su fuerte dependencia, reducciones notables de las emisiones a la atmósfera y también reducciones en la energía total consumida debido a la mayor eficiencia energética relacionada con los dispositivos eléctricos.

Actualmente, las investigaciones relacionadas con la integración de la tecnología de los sistemas de carga inalámbrica de inducción dinámica en la infraestructura vial siguen en pleno desarrollo. Así pues, desde el punto de vista de la ingeniería de carreteras, es imperativo hacer hincapié en las etapas de diseño, construcción y mantenimiento/rehabilitación, ya que de ellas dependerá el adecuado rendimiento de las futuras *eRoads*. [2]

Por otra parte, hay que tener en cuenta algunas consideraciones para la disposición de las unidades de recarga inalámbrica de inducción dinámica al desarrollar las *eRoads*. En primer lugar, para la disposición de la instalación la solución más razonable podría ser considerar cada carril como una unidad singular para su integración. Este hecho permitirá la posibilidad de combinar diferentes flujos de tráfico a corto plazo, esto es; combinar vehículos con motor de combustión interna con vehículos eléctricos adaptados a soluciones inductivas.

En segundo lugar, el concepto de *eRoads* está concebido para rutas regulares, principalmente

autopistas con alta demanda de tráfico, por lo que la distribución de los sistemas de carga de inducción debe hacerse montando grupos o tramos de unidades de carga para facilitar una intervención en caso de incidente y no interrumpir el flujo de tráfico.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores sobre la distribución de los sistemas de carga inalámbrica, es posible sugerir algunas configuraciones para su colocación en la carretera. Los sistemas deben colocarse simétricamente respecto al centro del carril para obtener una buena transmisión de energía con menos desalineación. Por lo tanto, la anchura del módulo de carga de la unidad debe ser similar a la separación estándar de las ruedas de los vehículos eléctricos. [2]

Con todo, un estudio realizado en Cádiz en 2017: “*Comparative study of dynamic wireless charging of electric vehicles in motorway, highway and urban stretches*” [9], presentó un análisis comparativo de un sistema de transferencia dinámica de energía inalámbrica para tres tramos de carreteras de tráfico: autopista, autovía y tramo urbano, con el fin de evaluar los requisitos de potencia y energía que deben ser considerados en el diseño.

El dimensionamiento del sistema de carga dependía del vehículo eléctrico y del tramo de carretera, es decir, de la velocidad e intensidad del tráfico, direcciones, cruces, estacionalidad, tipo de día y hora. Este estudio se realizó asumiendo un escenario con un 25% de vehículos eléctricos circulando y siendo cargados mediante carga inalámbrica dinámica.

Los resultados mostraron una gran dependencia del tramo de carretera, con grandes fluctuaciones en el tramo urbano y más estabilidad en la autopista y la autovía. La potencia requerida por el sistema dependía del tráfico, la hora del día, el tipo de día y la estacionalidad. En el tramo urbano, la dependencia era muy grande (entre 0 y 1,7 MW) y debería utilizarse la máxima disponibilidad de potencia en la red como parámetro principal para dimensionar el sistema de carga dinámica, en lugar de los requisitos de potencia máxima. Por el contrario, los tramos de autopistas y autovías son menos dependientes de la estacionalidad y el sistema podría ser dimensionado principalmente por las necesidades de potencia. Por lo tanto, se necesitaría una potencia nominal, basada en los valores medios, para hacer frente a las fluctuaciones diarias y un apoyo adicional para cubrir los aumentos previstos durante el día. Este apoyo podría ser proporcionado por una fuente de energía renovable (fotovoltaica o eólica) con un sistema de almacenamiento de energía como potencia de reserva. [9]

#### **1.2.4. Impactos del módulo de carga en el rendimiento del pavimento**

En la *eRoad*, la unidad de carga inalámbrica tiene que estar incrustada en la capa del pavimento. El diseño del pavimento tiene que proteger la unidad de carga de las cargas repetidas del tráfico, del movimiento térmico debido a la variación de la temperatura, de la congelación y de las heladas durante el invierno, y de los daños causados por la humedad. El empotramiento de la unidad de carga en el pavimento asfáltico puede causar una deformación desigual o una concentración de tensiones debido a la inconsistencia de la rigidez entre el paquete de protección de la unidad de carga y el material del pavimento circundante. [3]

Por otro lado, se espera que la implementación de la *eRoad* con pavimento de hormigón tenga una influencia mínima en el rendimiento de la carretera existente.

La Figura 6 muestra las unidades de carga incrustadas en el pavimento y sus efectos en las tensiones del pavimento.

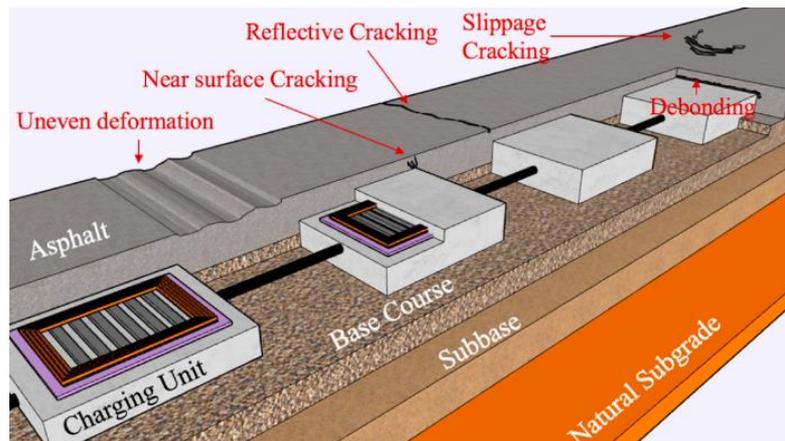


Figura 6: Daños en el pavimento relacionados con el empotramiento de la unidad de carga. [3]

En anteriores proyectos de campo se utilizó una caja de hormigón para proteger la unidad de carga y se construyó una capa de asfalto sobre la caja de hormigón para la construcción de *eRoad* con pavimento de asfalto. Sin embargo, esto puede aumentar el potencial de daños estructurales, especialmente el agrietamiento. Debido a la tensión horizontal inducida por los neumáticos del vehículo al acelerar y frenar, la interfaz entre la caja de hormigón y el recubrimiento de asfalto podría sufrir desprendimiento y agrietamiento por deslizamiento.

El lugar crítico de fallo en el pavimento se encuentra cerca de las intersecciones entre el hormigón y el asfalto. La tensión de Von Mises en el interior de la sección de asfalto se encontró duplicada para la *eRoad* que las carreteras tradicionales en la misma ubicación y distancia de desplazamiento. Bajo la carga inducida, los movimientos horizontales y la deformación de curvatura de la losa de hormigón pueden dar lugar a una considerable concentración de tensiones en el borde de la caja de hormigón que puede aumentar el potencial de agrietamiento cerca de la superficie. Si el cajón de hormigón que contiene la unidad de carga está cerca del otro, los movimientos de unión entre los cajones de hormigón pueden causar fisuración por reflexión. Para retrasar el agrietamiento por reflexión, es necesario aumentar el grosor de la capa de asfalto o utilizar las capas intermedias que absorben la tensión.

Un estudio realizado en Estados Unidos sobre “*las perspectivas de la carretera electrificada para la transferencia inalámbrica de energía de los vehículos eléctricos*” [3] llevó a cabo un análisis de elementos finitos para analizar la respuesta del pavimento de la *eRoad*, suponiendo que se trataba de interfaces totalmente adheridas entre la losa de hormigón en la que estaba incrustada la unidad de carga y el asfalto superpuesto. La *eRoad* presentaba menores deformaciones longitudinales y deflexiones a distintas profundidades del pavimento en comparación con las carreteras tradicionales debido a la rigidez de la losa. Sin embargo, los problemas del pavimento relacionados con la superficie y la pérdida de adherencia de la interfaz, provocados por las maniobras de los vehículos (como el frenado y la aceleración), podrían ser peores. Por lo tanto, era necesario realizar un análisis estructural del pavimento teniendo en cuenta la incrustación de la unidad de carga en el pavimento para evitar el fallo prematuro del pavimento en la *eRoad* y proporcionar el mismo nivel de servicio que la carretera tradicional. [3]

### 1.2.5. Influencia de la temperatura alcanzada

En un sistema de transferencia de energía inalámbrica que se acopla magnéticamente, hay varias pérdidas de energía, incluyendo la pérdida de conmutación y de conducción de los circuitos electrónicos de potencia, la pérdida dieléctrica de la red de compensación, la pérdida de ohmios de las bobinas, etc. Estas pérdidas se convertirán en calor por efecto Joule, induciendo el aumento de temperatura de los componentes de los sistemas. De tal manera que el riesgo de la sobretemperatura que alcanza el pavimento en el que está incrustada la unidad de carga, es un factor importante que necesita atención. [10]

La eficiencia de carga es mayor cuando las bobinas primarias y secundarias están alineadas. La desalineación de las bobinas puede reducir la transferencia de energía debido a la menor inductancia mutua entre las bobinas primarias y secundarias. Teniendo esto en cuenta, los conductores viajarán conscientemente más en el centro del carril de carga, aumentando la concentración de carga en la trayectoria de las ruedas, lo que da lugar a daños acelerados como la formación de surcos y las grietas por fatiga.

Por otro lado, el aumento de la desalineación y el ángulo de desfase entre el plano de la bobina primaria y la secundaria provoca mayores pérdidas de transferencia de potencia, lo que puede intensificar la temperatura en el pavimento. Durante la operación de carga, la temperatura podría alcanzar los 80-90°C en el pavimento provocando el ablandamiento del material y el estrés térmico. Si se puede controlar el aumento de la temperatura, este fenómeno puede ser beneficioso para la autocuración inducida por el calor del pavimento asfáltico, lo que es similar al propósito del calentamiento por inducción electromagnética. De lo contrario, la elevada temperatura del pavimento aumentará la respuesta del pavimento asfáltico y aumentará los daños del pavimento en cuanto a agrietamiento por fatiga y formación de surcos.

En el caso en el que el tráfico de vehículos en la carretera es mayor y la bobina incrustada en el pavimento se ve obligada a disipar potencia un periodo de tiempo más largo, el riesgo de la sobretemperatura se vuelve aún más importante, convirtiéndose en una fuente de calor crítica para los objetos extraños contactados. De hecho, puede provocar lesiones cutáneas en los cuerpos vivos y la ignición de objetos extraños. [10]

La siguiente figura muestra la importancia de la desalineación entre las bobinas con respecto a la temperatura alcanzada. En concreto, se presenta la temperatura máxima en función del desplazamiento horizontal entre bobinas, clasificando según la temperatura alcanzada en cuatro niveles de peligrosidad.

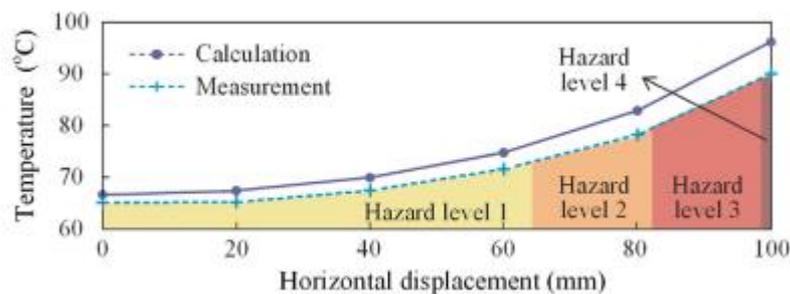


Figura 7: Comparación de la temperatura máxima entre el cálculo y la medición frente al desplazamiento horizontal. [10]

Para aliviar el efecto de la variación de la temperatura, se podría mejorar la gestión térmica de las unidades de carga mediante el uso de material compuesto de cambio de fase, la refrigeración por líquido, el tubo de calor oscilante, etc. Además, otro foco de investigación relativo al funcionamiento seguro de los sistemas de transferencia dinámica inalámbrica es la detección de objetos metálicos. [10]

### 1.3. Comportamiento del asfalto sometido a distintas aplicaciones de calentamiento por inducción

Actualmente, se están incorporando nuevas tecnologías a los pavimentos asfálticos, añadiendo nuevas funcionalidades a los mismos, lo que lleva a desarrollar nuevas estructuras funcionales, como los pavimentos solares, de fusión de nieve, autocurativos o de carga inalámbrica dinámica. Entre otras, la tecnología de inducción electromagnética como método de calentamiento altamente eficiente ha sido ampliamente probada a escala de laboratorio para materiales asfálticos, siendo en la ingeniería de los pavimentos cada vez más popular. [11]

#### 1.3.1. Curación del asfalto mediante calentamiento por inducción

Los pavimentos de asfalto son propensos a agrietarse debido a muchos factores como las cargas de tráfico, las deficiencias en la construcción o las severas condiciones ambientales. Una serie de estudios realizados en Europa han intentado aprovechar el calentamiento por inducción para acelerar mecanismos de curación en materiales asfálticos.

Cuando las muestras de hormigón asfáltico conductivo se calientan eléctricamente, el calor generado a través del mecanismo de calentamiento por inducción puede influir en la masilla asfáltica dando lugar a la curación parcial o completa de la sección dañada de la mezcla. [12]

La potencia necesaria para el calentamiento por inducción dependía de la conductividad y del tamaño de la muestra utilizada para el ensayo.

Según un estudio realizado en 2019: “*Study on the gradient heating and healing behaviors of asphalt concrete induced by induction heating*” [13], que analizó el campo de temperaturas de calentamiento y el comportamiento de curación de una muestra de asfalto mediante calentamiento por inducción, observó que el tiempo de calentamiento tenía una gran influencia en la distribución del gradiente de temperatura. El gradiente de temperaturas se define como:

$$Grad T = \frac{T1 - T2}{esp} \left( \frac{^{\circ}C}{cm} \right)$$

Siendo:

- T1: temperatura de la superficie superior de la muestra.
- T2: temperatura de la superficie inferior de la muestra.
- *esp*: espesor de la muestra.

Por lo tanto, el gradiente de temperaturas muestra la tendencia de la diferencia de temperatura entre la superficie superior y la inferior de la muestra.

En la siguiente figura se muestra un gráfico de la relación entre el gradiente de temperaturas y el tiempo de calentamiento de la muestra asfáltica analizada para dos distintas distancias de calentamiento.

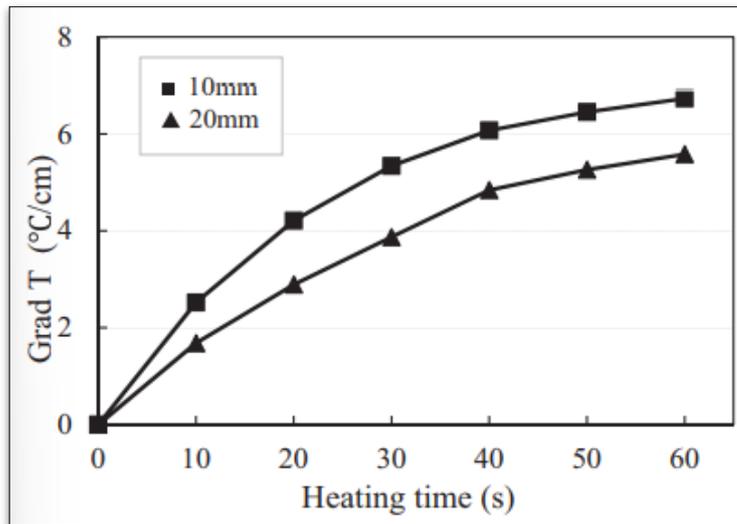


Figura 8: Grad T de la muestra bajo diferentes tiempos de calentamiento. [13]

Con el aumento del tiempo de calentamiento, el valor de *Grad T* aumentaba gradualmente, lo que indicaba que la diferencia de temperatura entre la parte superior y la inferior aumentaba, causada principalmente por las diferentes velocidades de calentamiento en los distintos niveles de la probeta. Sin embargo, la tendencia al aumento del valor de *Grad T* disminuyó con el aumento del tiempo de calentamiento, lo que estaba relacionado principalmente con la transferencia de calor: cuanto mayor era la diferencia de temperatura, más rápido se transfería el calor, lo que conducía a la disminución de la tendencia al aumento del gradiente de temperatura.

Por otra parte, según la figura 8, la distancia de calentamiento era también un factor importante que afectaba a la temperatura de inducción. La velocidad de calentamiento y el gradiente de temperatura disminuyeron al aumentar la distancia de calentamiento, lo que estaba relacionado con la disminución de la intensidad del campo magnético eléctrico con el aumento de la profundidad de la muestra. Por lo tanto, el calentamiento por inducción electromagnética del pavimento de hormigón asfáltico debería adoptar una distancia de calentamiento más pequeña y un tiempo de calentamiento más largo, pero al mismo tiempo, debería evitarse el daño estructural causado por un calentamiento excesivo.

#### ➤ Tasa de curación

Una temperatura adecuada podría dar lugar a una baja viscosidad y a una mejor fluidez del material, lo que mejoraría la capacidad de curación por inducción y el curado de las microfisuras en el hormigón asfáltico.

Sin embargo, la tasa de curación del hormigón asfáltico no es uniforme porque los campos electromagnéticos alternos son cambiantes, y la intensidad del campo magnético depende de la distancia entre la bobina y la muestra, produciendo diferentes fuerzas electromotrices inductivas. Este fenómeno conlleva a diferentes niveles de energía, lo que conduce al gradiente de temperatura.

[13]

Por otro lado, una vez alcanzada la mejor temperatura para la curación por inducción, el calentamiento debe detenerse para evitar el sobrecalentamiento, y entonces la temperatura disminuye, por lo que el tiempo de curación puede no ser suficiente. El estudio sobre la tasa de curación por inducción del mortero asfáltico mostró que la tasa de curación estaba positivamente correlacionada con el tiempo de curación, y la tasa de curación podría mejorarse prolongando el tiempo de curación.

La siguiente figura muestra una comparativa de tasas de curación a distintas distancias de calentamiento la bobina y para dos tiempos de calentamiento:

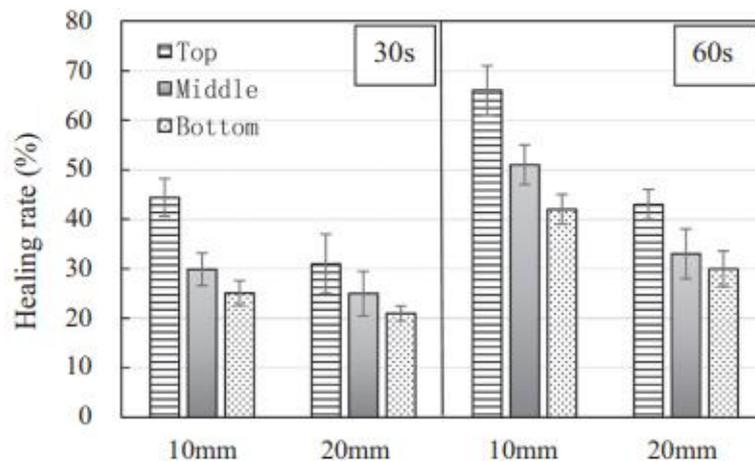


Figura 9: Comparación de las tasas de curación a diferentes distancias de calentamiento. [13]

Se observa que, tras el mismo tiempo de calentamiento, la tasa de curación a 10 mm es mayor que la de 20 mm. Esto se debe a que la distancia de calentamiento afecta al gradiente de temperatura como se muestra en la figura 9.

Por último, cabe destacar que la distancia entre la bobina y la superficie de la muestra tuvo una influencia significativa en la velocidad de calentamiento.

En conclusión, aunque el enfoque del calentamiento por inducción parece prometedor, la eficacia de la curación mediante el calentamiento por inducción está aún por demostrar, ya que muchas variables que influyen, como el tiempo de calentamiento, la frecuencia de la corriente, la permeabilidad magnética o la profundidad de penetración, pueden impedir que se produzca el proceso de curación. Además, se han realizado estudios limitados para estudiar la recuperación de los daños por agrietamiento y las propiedades de resistencia a la fatiga después de la curación, que pueden utilizarse para evaluar la eficacia general de este enfoque. [13]

### 1.3.2. Fusión de hielo y nieve con calentamiento por inducción

Las nevadas, y la lluvia helada son grandes problemas para la seguridad del tráfico en las regiones frías durante los inviernos. Se estudió que entre el 25 y el 30% de los accidentes de tráfico eran causados por el hielo en la superficie del pavimento en los inviernos fríos, especialmente en algunas secciones como los puentes. [14]

En consecuencia, se propusieron sistemas de calefacción del pavimento respetuosos con el medio ambiente (por ejemplo, los sistemas de calefacción del pavimento hidrónico y los sistemas de tuberías de calefacción incorporados al pavimento) para eliminar la capa de hielo. Sin embargo, los

dos enfoques suelen tardar varias horas en eliminar la capa de hielo congelada en el pavimento, lo que resulta muy desfavorable para la reapertura del transporte por carretera.

Por lo tanto, la fusión del hielo y de la nieve mediante calentamiento por inducción tiene las ventajas de una menor contaminación ambiental, una alta eficiencia de calentamiento y una mejor utilización de la energía.

En los últimos dos años, los investigadores han propuesto añadir materiales inductivos en el pavimento de asfalto convencional y calentar los materiales inductivos a través del funcionamiento del equipo de calentamiento por inducción, haciendo que la temperatura de la superficie del pavimento aumente, logrando así el propósito de derretir la capa de hielo. Se ha demostrado que la eficiencia de deshielo estaba directamente relacionada con el calor y la temperatura concentrados en la superficie superior del pavimento. Es decir, cuanto mayor sea el aumento de la temperatura de la superficie del pavimento, mejor será el efecto de deshielo. [15]

Por lo tanto, a diferencia de la autocuración de las grietas que necesita el calentamiento uniforme de todas las capas del pavimento asfáltico; cuando el pavimento asfáltico de calentamiento por inducción se utilizó para lograr la función de deshielo, solo la superficie superior de las capas del pavimento asfáltico necesita calentarse rápidamente.

Se ha comprobado que el punto final de la prueba de fusión del hielo se define en el momento en que el hielo puede separarse de la muestra con su propio peso. Esto se debe a que no es necesario fundir todo el hielo en el proceso de fusión del hielo. La única combinación entre el hielo y el pavimento era la interfaz entre la superficie superior del pavimento asfáltico y la superficie inferior del hielo. Cuando la unión de esas dos superficies se destruyera, el hielo se desprendería fácilmente de la carretera como consecuencia. Además, teniendo en cuenta el proceso posterior a la fusión y la prevención de la congelación del agua del hielo fundido en el pavimento, es mejor eliminar el hielo como un sólido que fundir todo el hielo en agua. [14]

### **1.3.3. Rendimiento del calentamiento por inducción de los pavimentos de asfalto que incorporan capas conductoras de electricidad y absorbentes de magnetismo**

Cuando se introduce la inducción electromagnética en los pavimentos funcionales, las técnicas necesarias para mejorar el rendimiento del calentamiento por inducción siguen siendo un tema importante. Por lo general, el proceso de aumento de la temperatura del pavimento asfáltico puro necesita una gran cantidad de tiempo y energía que puede no ser rentable ni respetuosa con el medio ambiente. Como solución, se pueden utilizar algunas partículas conductoras de la electricidad para acelerar el proceso de calentamiento y aumentar la eficacia de la curación inducida

Se han realizado muchos estudios que se centran en la incorporación de agentes inductivos en los pavimentos asfálticos para mejorar su rendimiento de calentamiento por inducción.

Los investigadores han llevado a cabo amplios estudios sobre el efecto del tipo, el contenido y el tamaño de los agentes inductivos, como las fibras de acero, la lana de acero, la arenilla de acero y la escoria de acero en el calentamiento por inducción. Se ha introducido el concepto de tasa de calentamiento por inducción para describir el efecto de los agentes inductivos en el rendimiento del calentamiento por inducción de los pavimentos funcionales. Se ha encontrado que la tasa de

calentamiento por inducción de la mezcla de asfalto que contiene fibras de acero es la más alta, seguida por la lana de acero y la gravilla de acero, mientras que la mezcla de asfalto que contiene escoria de acero era limitada. Así mismo, la tasa de calentamiento por inducción aumenta a medida que aumenta la cantidad de agentes inductivos. [11]

Además, cuanto mayor sea el diámetro de las fibras de acero, mayor será la tasa de calentamiento por inducción. Sin embargo, en el caso de que la masa de fibras sea fija y el diámetro de la fibra aumente, el número de fibras en la mezcla se reducirá. Por lo tanto, la influencia del diámetro de las fibras de acero en la mejora de la velocidad de calentamiento por inducción es limitada. [11]

En cuanto a la conductividad eléctrica y térmica, las fibras de acero se caracterizan por tener altos valores y se añaden a las mezclas de asfalto para diversas aplicaciones. Las fibras de acero a microescala pueden mejorar en gran medida la conductividad eléctrica de la mezcla asfáltica.

Sin embargo, hay pocas investigaciones sobre la mejora de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica con fibra de acero. En realidad, se ha demostrado que el tamaño y la forma de los rellenos desempeñan un papel importante en la influencia de la conductividad térmica de la mezcla asfáltica. [16]

➤ El principio de absorción magnética

La figura 10 muestra la distribución del campo magnético del pavimento de asfalto multicapa con o sin capas de absorción magnética durante el calentamiento por inducción. El papel de las capas de absorción magnética en el campo magnético es similar al que desempeñan los conductores eléctricos en el campo eléctrico. El conductor eléctrico con alta conductividad eléctrica es fácil de pasar la corriente, mientras que las capas de absorción magnética con alta permeabilidad magnética son fáciles de pasar la línea de inducción magnética. Se consume más energía eléctrica cuando la corriente fluye a través del circuito eléctrico con baja conductividad eléctrica. Del mismo modo, se consume más energía magnética cuando la línea de inducción magnética pasa a través del circuito magnético con baja permeabilidad magnética. Por lo tanto, la presencia de las capas de absorción magnética puede reducir la pérdida de energía magnética, mejorando así el rendimiento del calentamiento por inducción. [11]

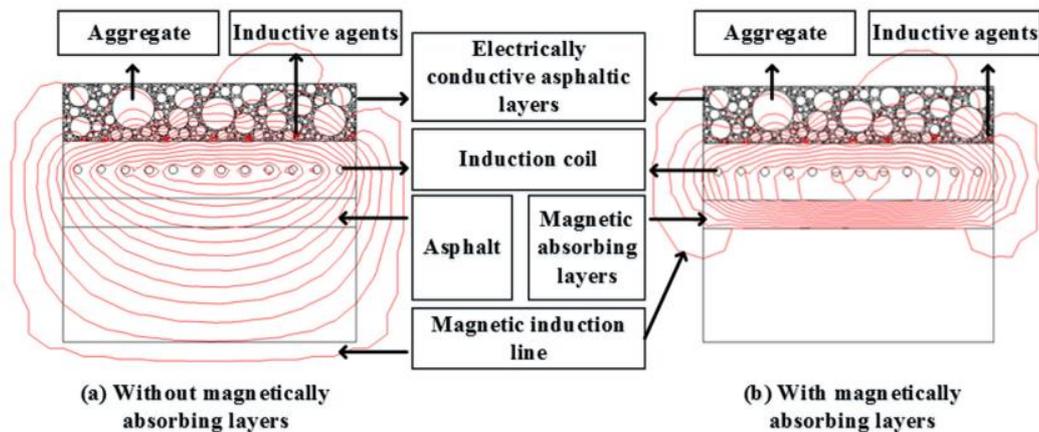


Figura 10: El principio de absorción magnética de las capas de absorción magnética. [11]

## 2 MODELO 1D EN RÉGIMEN PERMANENTE

El objeto del presente capítulo es analizar el comportamiento de distintos parámetros de funcionamiento de un sistema de inducción formado por una bobina dentro del terreno para el estudio de la carga inalámbrica de inducción dinámica como elemento de mejora de eficiencia energética para una movilidad sostenible.

En concreto, se va a estudiar la disipación de calor que produce la bobina por efecto Joule y la temperatura que puede llegar a alcanzar la superficie del asfalto y la bobina con respecto a distintas condiciones de operación.

Dicho estudio se ha analizado como un problema unidimensional de diseño de transmisión de calor al terreno mediante un modelo de EES. El código empleado se presenta en el Anexo A. Las superficies de intercambio que han formado parte del estudio son el asfalto (la capa superior), la bobina situada entre el asfalto y el hormigón y el terreno, siendo este último la capa inferior.

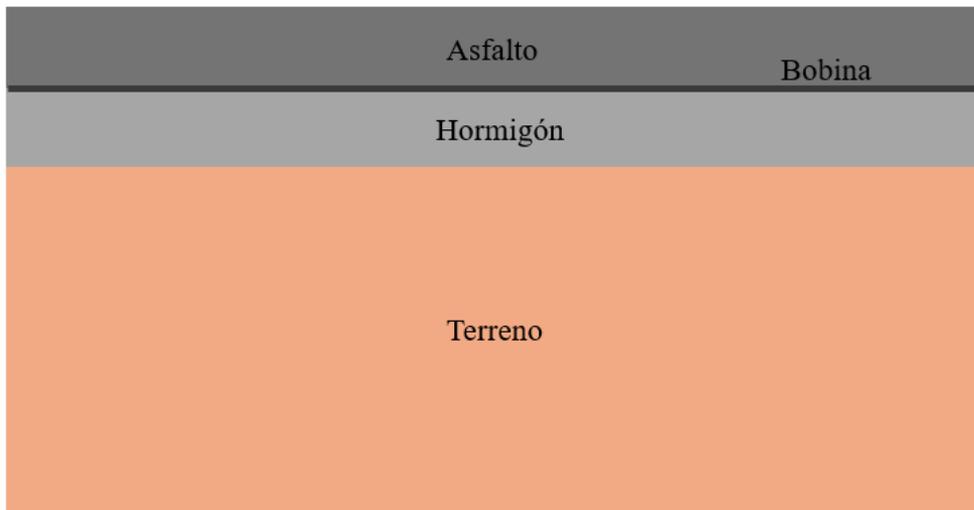


Figura 11: Superficies de intercambio. (Elaboración propia)

En este capítulo el estudio se ha realizado en régimen permanente, siendo este estudio el más desfavorable debido a que se obtendrán las temperaturas máximas del sistema. La siguiente figura muestra los distintos intercambios de calor y las temperaturas de las distintas superficies, siendo:

- $Q_{CDa}$ : calor transferido por conducción a través del asfalto.
- $Q_{CDh}$ : calor transferido por conducción a través del hormigón.
- $Q_{CDt}$ : calor transferido por conducción a través del terreno.
- $Q_{CVa}$ : calor transferido por convección al exterior.
- $Q_{RDa}$ : calor transferido por radiación al ambiente.
- $P$ : potencia inducida en la bobina.
- $\varphi_{sol}$ : radiación solar.
- $T_e$ : temperatura exterior.

- $T_a$ : temperatura del asfalto.
- $T_b$ : temperatura de la bobina.
- $T_h$ : temperatura del hormigón.
- $T_t$ : temperatura del terreno.

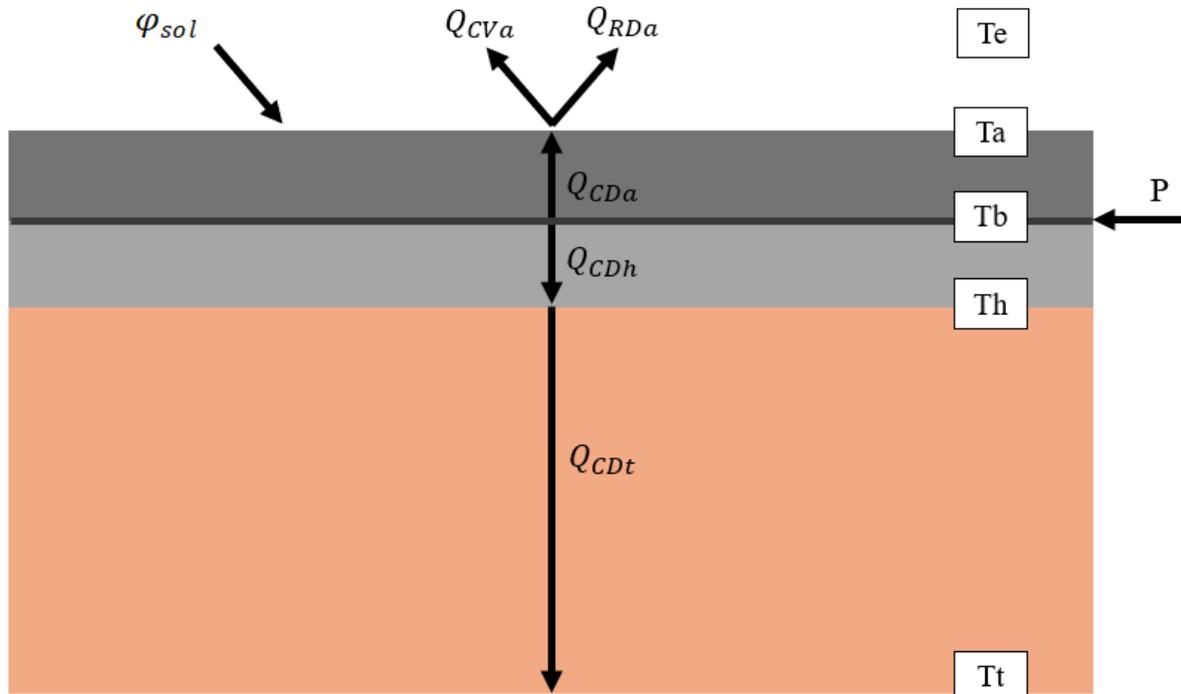


Figura 12. Esquema modelo 1D en régimen permanente. (Elaboración propia)

## 2.1. Modelo

### 2.1.1. Datos

Los datos de partida del problema de diseño que después se van a variar para ver cómo afectan a la temperatura del asfalto y de la bobina son:

- $P = 215 \text{ W}$
- $T_e = 25^\circ\text{C}$
- $T_t = 25^\circ\text{C}$
- $\varphi_{sol} = 0 \text{ W/m}^2$

El área de transferencia de la bobina ( $A$ ) es de  $1 \text{ m}^2$  y su perímetro de  $4 \text{ m}$ , siendo la longitud del dominio y el ancho del dominio ambos de  $1 \text{ m}$ .

Por otra parte, los espesores de las capas de asfalto, de hormigón de la bobina y del terreno son:

- $esp_{asf} = 0,1 \text{ m}$
- $esp_h = 0,15 \text{ m}$

- $esp_t = 5 \text{ m}$

Por último, las conductividades térmicas del asfalto, del hormigón y del terreno son:

- $k_{asf} = 0,16 \frac{W}{m \cdot K}$

- $k_h = 1,2 \frac{W}{m \cdot K}$

- $k_t = 0,6 \frac{W}{m \cdot K}$

Con este modelo se obtiene una temperatura extrema para el asfalto y para la bobina.

### 2.1.2. Balances

Se han hecho tres balances de energía en tres de las superficies de intercambio del sistema. La ecuación (1) se corresponde con un balance de energía en la superficie en la que se encuentra la bobina. La ecuación (2) con un balance de energía en la superficie del asfalto y la ecuación (3) con un balance de energía en la superficie entre el hormigón y el terreno.

$$(1) P = Q_{CDa} + Q_{CDh}$$

$$(2) \varepsilon * \varphi_{sol} * A + Q_{CDa} = Q_{CVa} + Q_{RDa}$$

$$(3) Q_{cdh} = Q_{cdt}$$

Siendo:

- $\varepsilon$ : emisividad de la superficie del asfalto, con un valor de 0,9.

### 2.1.3. Flujos de calor

Las ecuaciones (4), (5) y (6) se corresponde con las resistencias conductivas del asfalto, del hormigón y del terreno respectivamente que, al ser de tipo de pared plana son:

$$(4) R_{cda} = \frac{esp_{asf}}{k_{asf} * A}$$

$$(5) R_{cdh} = \frac{esp_h}{k_h * A}$$

$$(6) R_{cdt} = \frac{esp_t}{k_t * A}$$

Los calores transferidos por conducción en las tres superficies se corresponden con las ecuaciones (7), (8) y (9).

$$(7) Q_{CDa} = \frac{T_b - T_a}{R_{cda}}$$

$$(8) Q_{CDh} = \frac{T_b - T_h}{R_{cdh}}$$

$$(9) Q_{CDt} = \frac{T_h - T_t}{R_{cdt}}$$

La ecuación (10) se corresponde con el calor transferido por convección entre la superficie del asfalto y el exterior. El coeficiente de película ( $h$ ) será del orden de  $5 \text{ W/m}^2$ , al ser convección libre de un gas.

$$(10) \quad Q_{CVa} = h * A * (T_a - T_e)$$

Por último, la ecuación (11) se corresponde con el calor transferido por radiación entre la superficie del asfalto y el exterior.

$$(11) \quad Q_{RDa} = \varepsilon * A * \sigma * (T_a^4 - T_e^4)$$

Las principales incógnitas del problema unidimensional son  $T_a$  y  $T_b$ . Los valores de estas variables para el problema de diseño son:

$$T_a = 44,29^\circ C$$

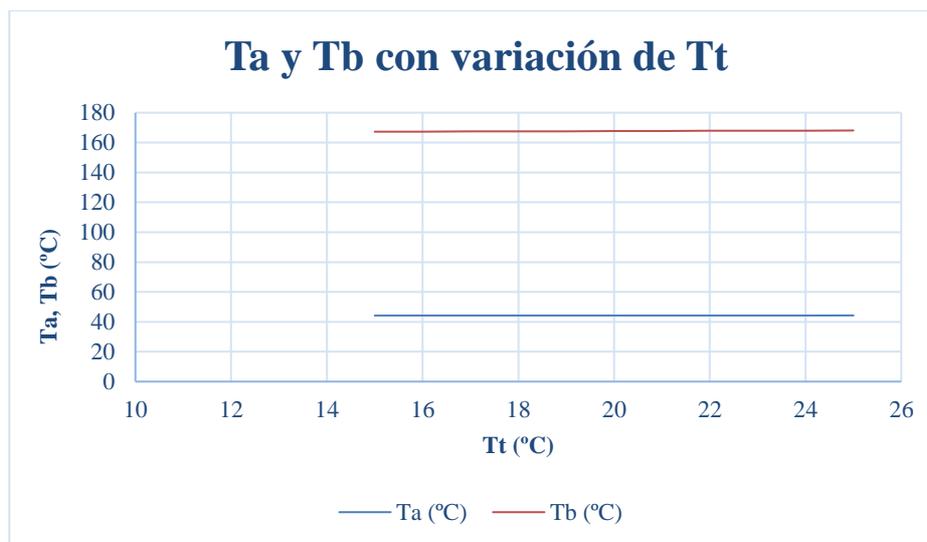
$$T_b = 168,1^\circ C$$

## 2.2. Análisis de sensibilidad

Una vez obtenidos los valores de la temperatura del asfalto y de la bobina en las condiciones de diseño, se ha hecho un análisis de sensibilidad para distintas condiciones de operación a la que puede estar sometido el sistema.

### 2.2.1. Temperatura media del terreno (Tt)

Para saber cómo afecta la temperatura del terreno, se ha variado dicho valor de 15 a 25°C.



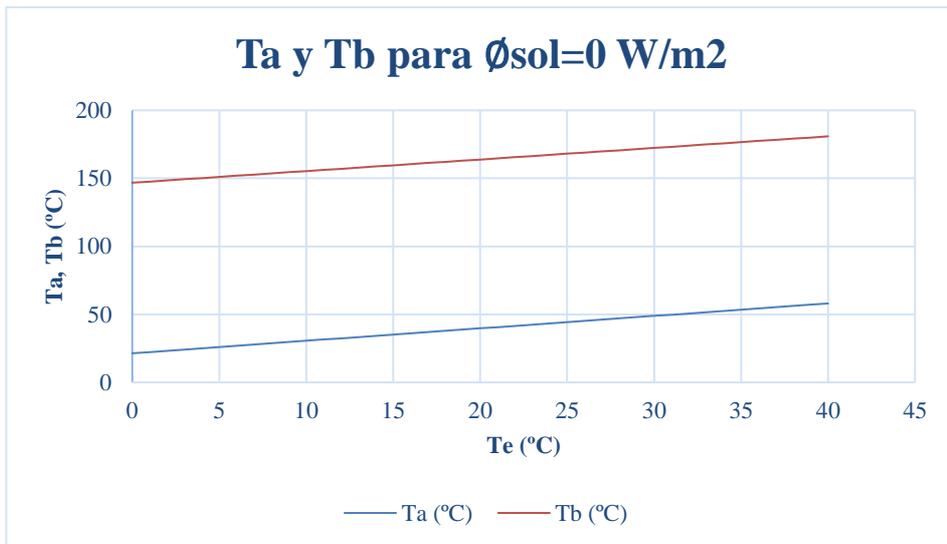
Gráfica 1: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura del terreno. (Elaboración propia)

Se puede observar que las temperaturas del asfalto y de la bobina apenas cambian con respecto a la temperatura del terreno. Por lo tanto, se puede concluir que la disipación de calor de la bobina se va en su gran mayoría por la parte superior.

### 2.2.2. Temperatura exterior (Te) y radiación solar ( $\varphi_{sol}$ )

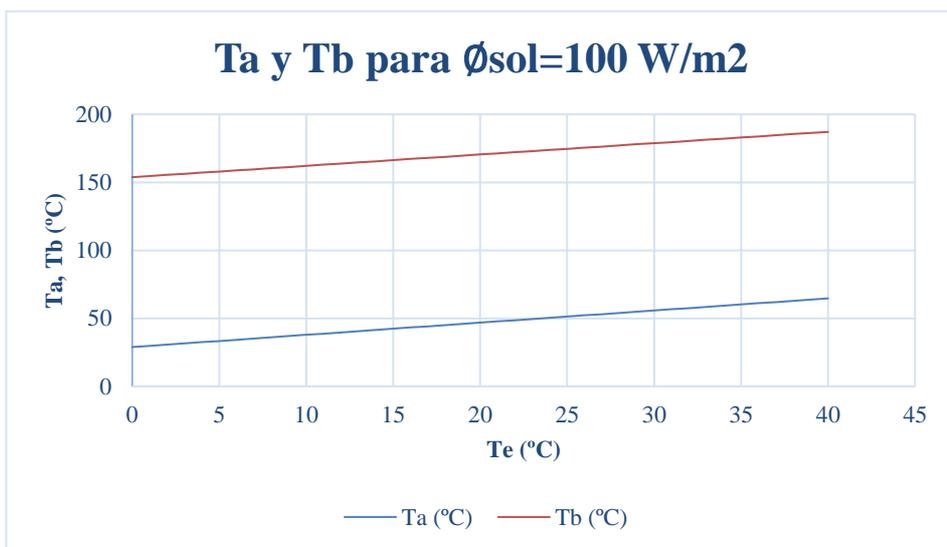
En cuanto a la temperatura exterior y la radiación solar, se han analizado el cambio de temperatura del asfalto y de la bobina con respecto a la temperatura exterior, desde 0°C en invierno hasta 40°C en verano para distintos niveles de radiación solar.

- $\varphi_{sol} = 0 \text{ W/m}^2$



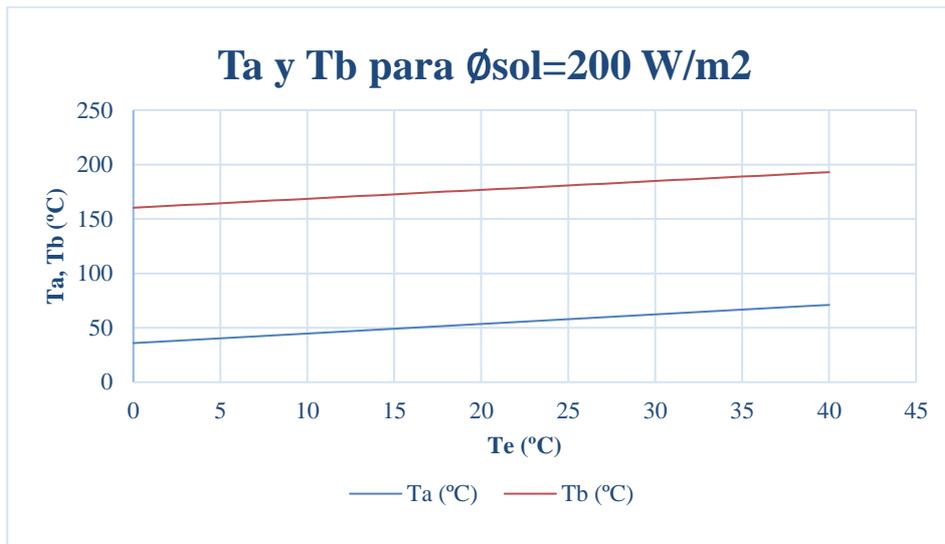
Gráfica 2: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 0 W/m<sup>2</sup>.

- $\phi_{sol} = 100 \text{ W/m}^2$



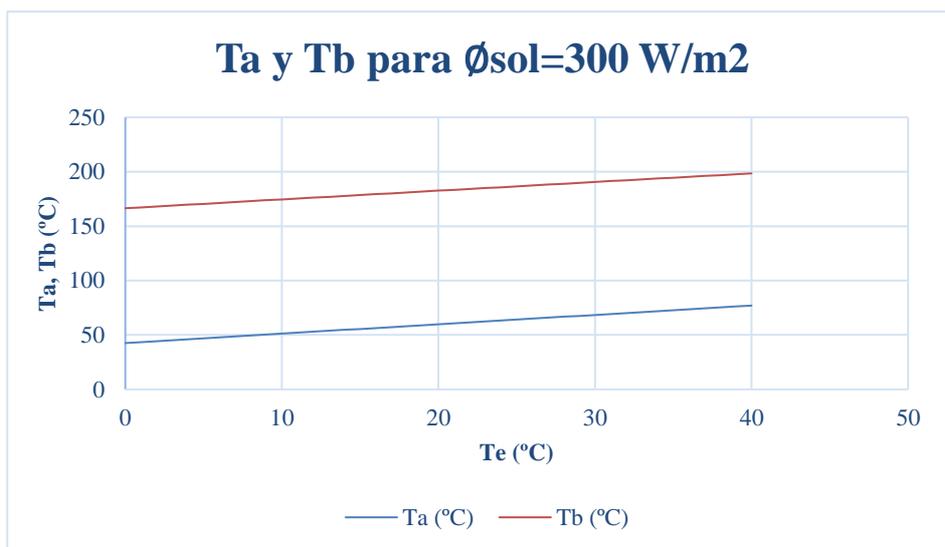
Gráfica 3: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 100 W/m<sup>2</sup>.  
(Elaboración propia)

- $\phi_{sol} = 200 \text{ W/m}^2$



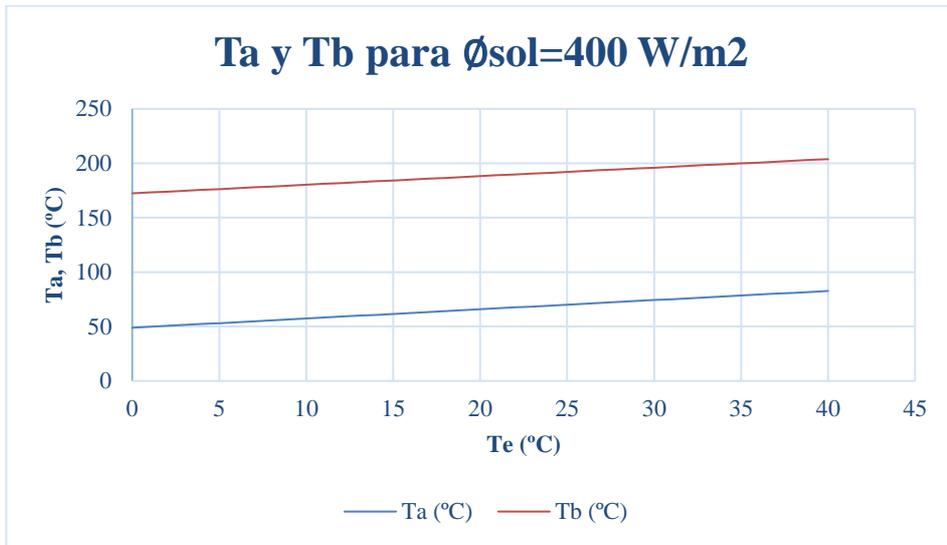
Gráfica 4: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 200 W/m2. (Elaboración propia)

- $\varphi_{sol} = 300 \text{ W/m}^2$



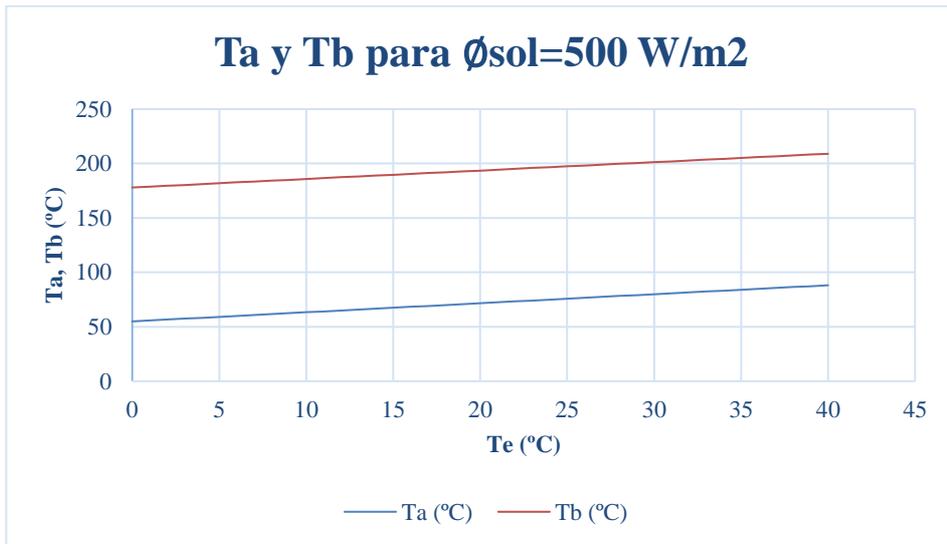
Gráfica 5: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 300 W/m2. (Elaboración propia)

- $\varphi_{sol} = 400 \text{ W/m}^2$



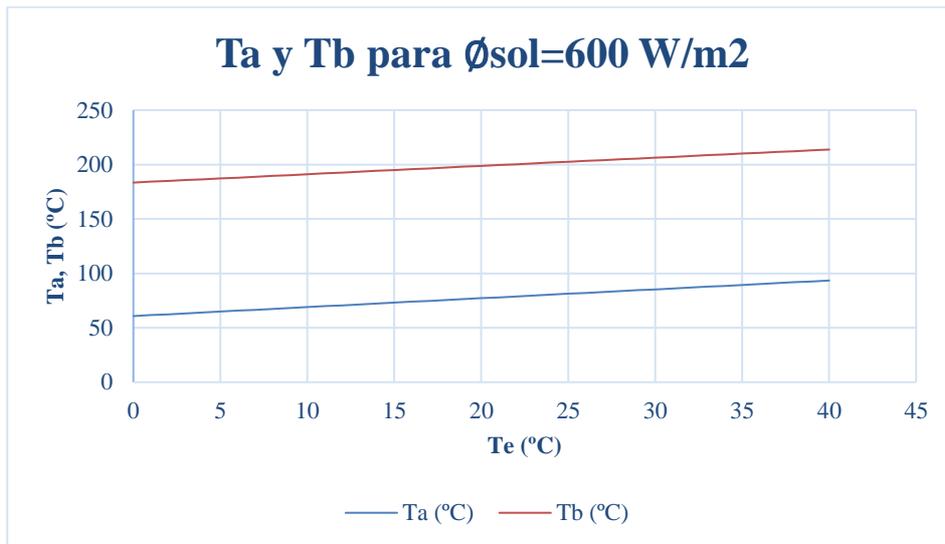
Gráfica 6: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 400 W/m<sup>2</sup>.  
(Elaboración propia)

- $\varphi_{sol} = 500 \text{ W/m}^2$



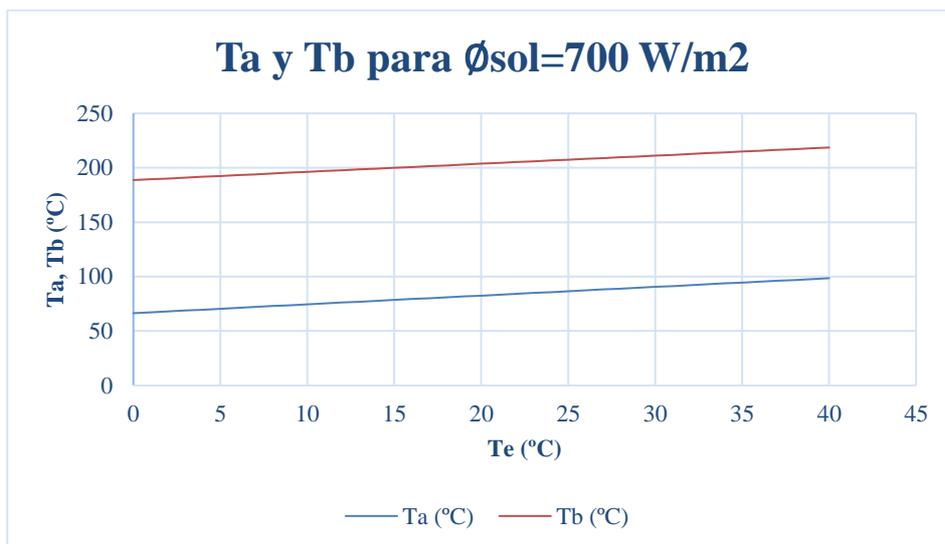
Gráfica 7: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 500 W/m<sup>2</sup>.  
(Elaboración propia)

- $\varphi_{sol} = 600 \text{ W/m}^2$



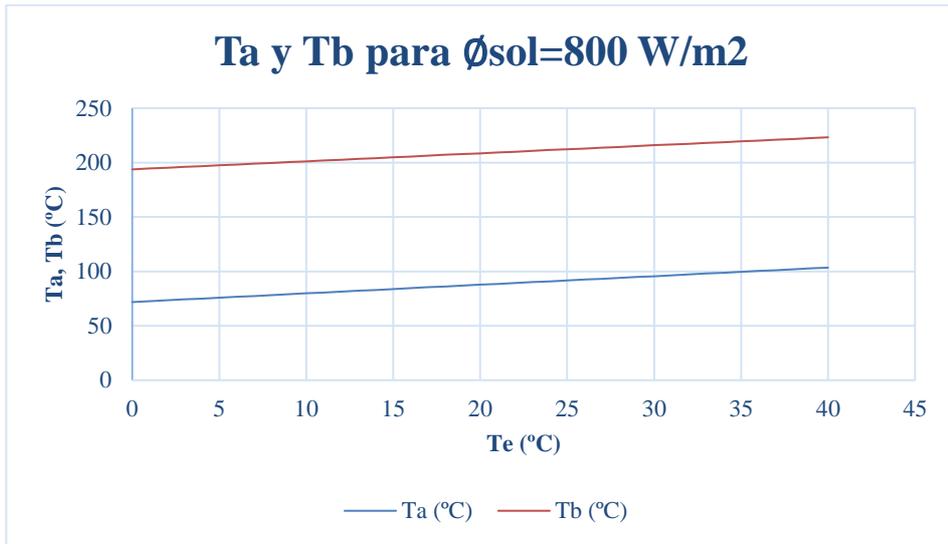
Gráfica 8: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 600 W/m2. (Elaboración propia)

- $\varphi_{sol} = 700 \text{ W/m}^2$



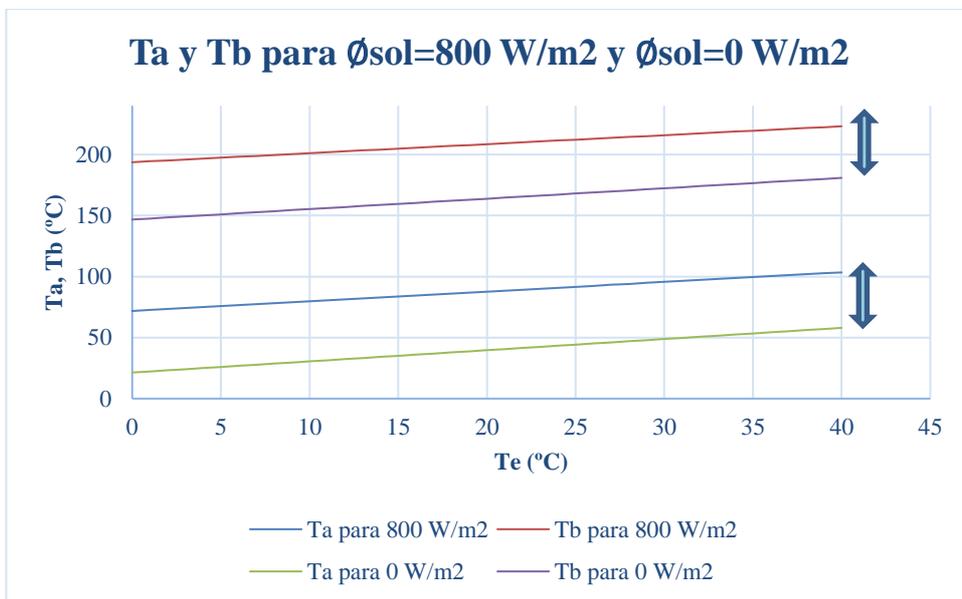
Gráfica 9: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 700 W/m2. (Elaboración propia)

- $\varphi_{sol} = 800 \text{ W/m}^2$



Gráfica 10: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 800 W/m2. (Elaboración propia)

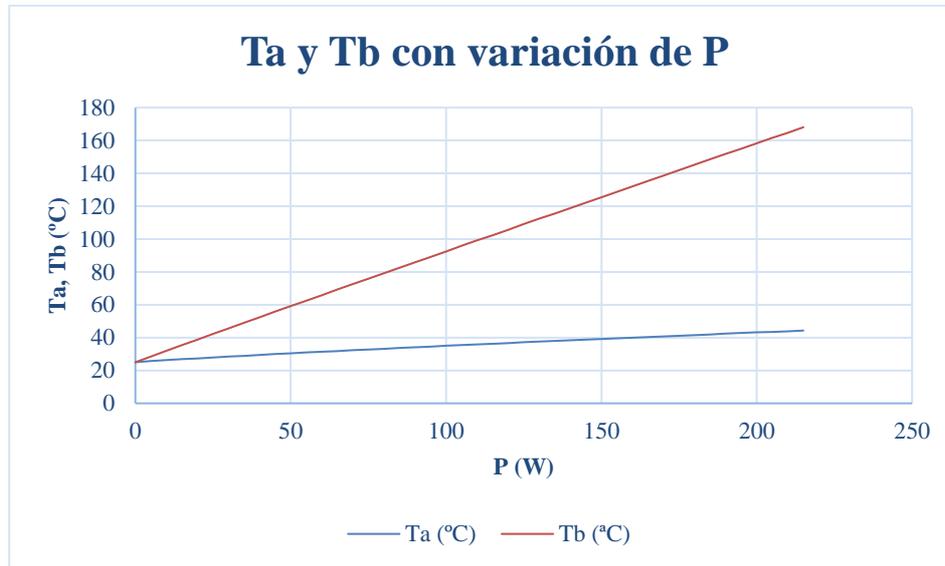
Se observa que la forma de la curva de las temperaturas de asfalto y de la bobina es siempre la misma. Lo que cambia es que, al aumentar los valores de nivel de radiación solar, las curvas se desplazan hacia arriba. Es decir, para niveles de radiación más altos, ambas temperaturas aumentan con el aumento de la temperatura exterior. En la siguiente gráfica se muestra el desplazamiento de las curvas desde 0 W/m2 hasta 800 W/m2.



Gráfica 11: Temperatura del asfalto y de la bobina según la temperatura exterior para una radiación solar de 0 W/m2 y 800 W/m2. (Elaboración propia)

### 2.2.3. Potencia inducida en la bobina (P)

La máxima potencia conectada a la bobina es de 215 W el cual es el caso en el que está en régimen permanente. Se ha estudiado para distintos valores de potencia, desde 0 W hasta su máxima potencia, como se muestra en la siguiente gráfica.



Gráfica 12: Temperatura del asfalto y de la bobina según la potencia de la bobina.(Elaboración propia)

Se puede observar que la temperatura de la bobina se ve más afectada que la del asfalto. Cuando la potencia es nula, ambas temperaturas tienen un valor de 25°C, pero en cuanto aumenta dicha potencia, el aumento de la temperatura de la bobina es mayor que la del asfalto siendo la pendiente de la temperatura de la bobina mucho más inclinada.

## 2.3. Resumen de resultados

Para atender al estudio de la carga inalámbrica de inducción dinámica como elemento de mejora de eficiencia energética para una movilidad sostenible es importante hacer un previo estudio de la disipación de calor en el terreno que produce la bobina de inducción.

Las temperaturas del asfalto y de la bobina son los dos parámetros importantes del sistema que no pueden excederse para que dicho sistema no deje de ser eficiente y no produzca daños en el terreno.

Haciendo un análisis de sensibilidad sobre distintas variables que suponen diferentes condiciones de operación se puede concluir que:

- El cambio de la temperatura del terreno no afecta a las temperaturas de asfalto y bobina, por lo que se deduce que el calor se disipa por la parte superior.
- La variación desde 0°C hasta 40°C de la temperatura exterior supone un aumento de las temperaturas del asfalto y de la bobina. Además, para niveles de radiación solar desde 0 W/m<sup>2</sup> hasta 800 W/m<sup>2</sup> ambas temperaturas aumentan con el aumento de la temperatura exterior.

- Por último, en cuanto a la potencia conectada a la bobina, para una potencia nula, ambas temperaturas tienen el mismo valor. Sin embargo, a medida que aumenta, la temperatura de la bobina sufre un aumento mucho mayor que la temperatura del asfalto.

En conclusión, se ha analizado que la temperatura del asfalto y la temperatura de la bobina alcanzan valores muy altos para distintas condiciones de operación. Una solución a estas altas temperaturas es un sistema de refrigeración para que no se produzcan ablandamientos o roturas del terreno.

### 3 MODELO 1D EN RÉGIMEN TRANSITORIO

En el capítulo anterior, se ha analizado el comportamiento de las temperaturas del asfalto, de la bobina y del terreno de un sistema de inducción formado por una bobina dentro del terreno para el estudio de la carga inalámbrica de inducción dinámica en régimen permanente, siendo el caso más desfavorable.

En este caso, se ha estudiado el funcionamiento del sistema de inducción formado por una bobina dentro del terreno para el estudio de la carga inalámbrica de inducción dinámica en régimen transitorio de un periodo de 24 horas (86400 segundos), teniendo en cuenta factores como la radiación solar, la temperatura exterior, la intensidad media diaria (IMD) medida en vehículos a la hora o la época del año, distinguiendo entre verano e invierno en la provincia de Sevilla.

Para que sea en régimen transitorio, se introduce inercia en cada superficie que compone el sistema: asfalto, hormigón y el terreno; de tal manera que las temperaturas varían en función del tiempo. Aparecen nuevas variables, las temperaturas medias, que se sitúan justo en el medio de las distintas superficies. En el caso del terreno, al tener un espesor mucho mayor que el asfalto y el hormigón, se ha dividido en cinco superficies, por lo que hay cinco diferentes temperaturas medias del terreno.

De esta forma, se observará y estudiará la evolución de las temperaturas principales: temperatura del asfalto y de la bobina, a lo largo de un día completo sometido a distintas condiciones. El código empleado se presenta en el Anexo B.

El esquema se muestra en la siguiente figura:

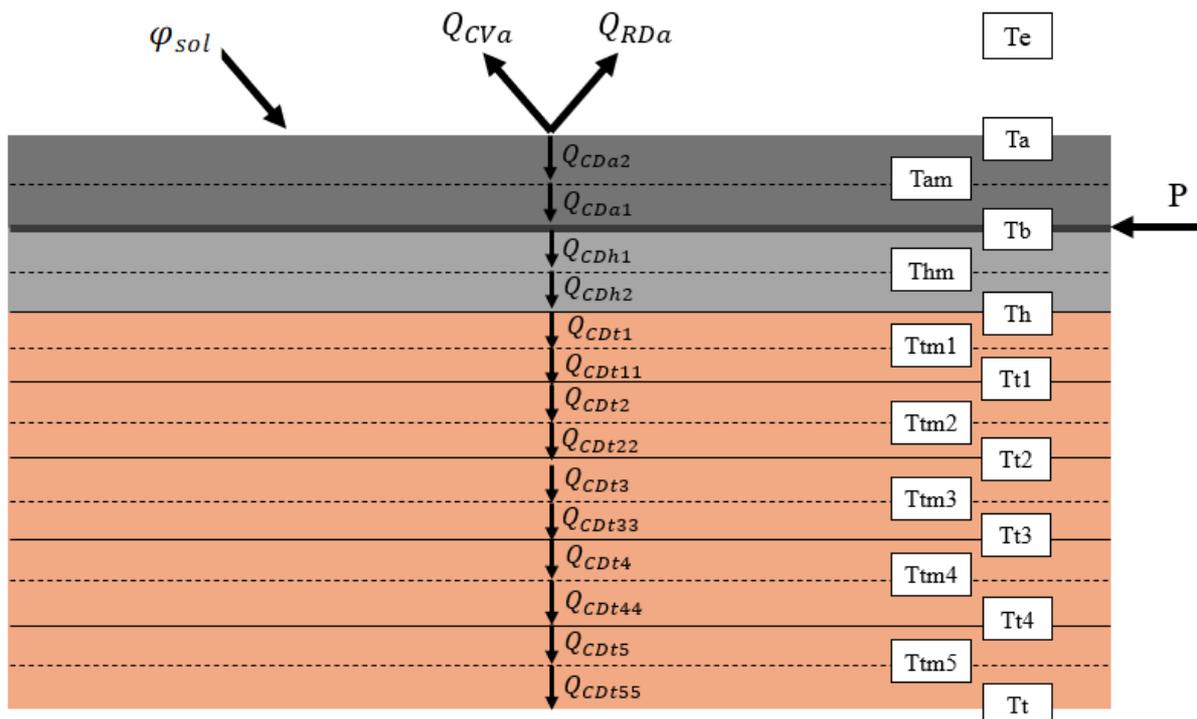


Figura 13: Esquema modelo 1D en régimen transitorio. (Elaboración propia)

### 3.1. Modelo

Se modela como sistemas de capacidad de manera que, en cada subdivisión de superficie, todos los puntos de la capa que componen dicha superficie están a la misma temperatura.

#### 3.1.1. Datos

Para este estudio, además de los datos del capítulo anterior (espesores, conductividades térmicas y dimensiones de la bobina) se necesitan los valores de las densidades y de los calores específicos de cada material que interviene en el sistema, siendo:

➤ Para el asfalto:

- $\rho_a = 1000 \text{ kg/m}^3$
- $Cp_a = 1700 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

➤ Para el hormigón:

- $\rho_h = 2300 \text{ kg/m}^3$
- $Cp_h = 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

➤ Para el terreno:

- $\rho_t = 1750 \text{ kg/m}^3$
- $Cp_t = 800 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

La potencia de la bobina (P), la temperatura exterior (Te) y la radiación solar ( $\varphi_{sol}$ ) también serán datos, pero su valor cambia en función de la época del año y de la hora del día, según la situación que estamos analizando. En el análisis de sensibilidad se explica con más detalle.

Por otra parte, un factor importante a tener en cuenta es el número de vehículos a la hora que circula sobre la vía que se quiere implementar este sistema de transferencia de carga inalámbrica dinámica. Haciendo una media según el tipo de vía y según la época del año, se ha establecido que la intensidad media diaria es de 568 vehículos a la hora. Esto se traslada a que el tiempo entre vehículos que circulan en la vía es de 6 segundos. Es decir, cada 6 segundos la bobina induce su máxima potencia, que son 215 W.

#### 3.1.2. Balances

Haciendo un sistema de capacidad en cada superficie, el balance de energía será:

$$(12) \quad Q_{entra} + Q_{genera} = Q_{sale} + Q_{acumula}$$

Aplicando esta ecuación en cada superficie se obtienen los siguientes balances:

- En la superficie que está en contacto con el ambiente:

$$(13) \quad \varepsilon * \varphi_{sol} * A + Qcd_{a2} = Qcv_a + Qrd_a$$

- En la bobina:

$$(14) \quad P = Qcd_{a1} + Qcd_{h1}$$

- En el asfalto:

$$(15) \quad Qcd_{a1} = \rho_a * Cp_a * V_a * \frac{dT_{am}}{dt}$$

- En el hormigón:

$$(16) \quad Qcd_{h1} = Qcd_{h2} + \rho_h * Cp_h * V_h * \frac{dT_{hm}}{dt}$$

- A lo largo del terreno:

$$(17) \quad Qcd_{h2} = Qcd_{t1}$$

$$(18) \quad Qcd_{h2} = Qcd_{t2} + \rho_t * Cp_t * V_t * \frac{dT_{tm1}}{dt}$$

$$(19) \quad Qcd_{t2} = Qcd_{t3} + \rho_t * Cp_t * V_t * \frac{dT_{tm2}}{dt}$$

$$(20) \quad Qcd_{t3} = Qcd_{t4} + \rho_t * Cp_t * V_t * \frac{dT_{tm3}}{dt}$$

$$(21) \quad Qcd_{t4} = Qcd_{t5} + \rho_t * Cp_t * V_t * \frac{dT_{tm4}}{dt}$$

$$(22) \quad Qcd_{t5} = Qcd_{t55} + \rho_t * Cp_t * V_t * \frac{dT_{tm5}}{dt}$$

$V_a, V_h$  y  $V_t$  se corresponden con los volúmenes de asfalto, hormigón y del terreno respectivamente.

Los límites de integración para calcular las temperaturas medias son 0 segundos para el inicial y 86400 segundos para el final, que se corresponde con un día completo.

### 3.1.3. Flujos de calor

En primer lugar, las resistencias conductivas del asfalto, del hormigón y del terreno respectivamente que, al ser de tipo de pared plana son:

$$(23) \quad R_{cda} = \frac{esp_{asf}}{k_{asf} * A}$$

$$(24) \quad R_{cdh} = \frac{esp_h}{k_h * A}$$

$$(25) \quad R_{cdt} = \frac{esp_t}{k_t * A}$$

Los calores transferidos por conducción con sistemas de capacidad en las tres superficies son:

- En el asfalto:

$$(26) \quad Qcd_{h1} = \frac{Tb - Tam}{Rcd_a}$$

$$(27) \quad Qcd_{a2} = \frac{Tam - Ta}{Rcd_a}$$

- En el hormigón:

$$(28) \quad Qcd_{h1} = \frac{Tb - Thm}{Rcd_h}$$

$$(29) \quad Qcd_{h2} = \frac{Thm - Th}{Rcd_h}$$

- En el terreno:

$$(30) \quad Qcd_{t1} = \frac{Th - Ttm1}{Rcd_t}$$

$$(31) \quad Qcd_{t11} = \frac{Ttm1 - Tt1}{Rcd_t}$$

$$(32) \quad Qcd_{t11} = Qcd_{t2}$$

$$(33) \quad Qcd_{t2} = \frac{Tt1 - Ttm2}{Rcd_t}$$

$$(34) \quad Qcd_{t22} = \frac{Ttm2 - Tt2}{Rcd_t}$$

$$(35) \quad Qcd_{t22} = Qcd_{t3}$$

$$(36) \quad Qcd_{t3} = \frac{Tt2 - Ttm3}{Rcd_t}$$

$$(37) \quad Qcd_{t33} = \frac{Ttm3 - Tt3}{Rcd_t}$$

$$(38) \quad Qcd_{t33} = Qcd_{t4}$$

$$(39) \quad Qcd_{t4} = \frac{Tt3 - Ttm4}{Rcd_t}$$

$$(40) \quad Qcd_{t44} = \frac{Ttm4 - Tt4}{Rcd_t}$$

$$(41) \quad Qcd_{t44} = Qcd_{t5}$$

$$(42) \quad Qcd_{t5} = \frac{Tt4 - Ttm5}{Rcd_t}$$

$$(43) \quad Qcd_{t55} = \frac{Ttm5 - Tt5}{Rcd_t}$$

Por último, los calores transferidos por convección y radiación entre la superficie del asfalto y el exterior son:

$$(44) \quad Qcv_a = h * A * (T_a - T_e)$$

$$(45) \quad Qrd_a = \varepsilon * A * \sigma * (T_a^4 - T_e^4)$$

### 3.2. Análisis de sensibilidad

Este estudio está enfocado al análisis de las temperaturas a las que pueden llegar los distintos componentes que intervienen en el sistema, siendo las temperaturas más importantes la del asfalto y de la bobina.

Para ello, se han estudiado cinco diferentes situaciones para un día de verano y un día de invierno (10 en total) en la provincia de Sevilla con distintas condiciones de entrada particularizadas a cada caso. Dichas situaciones son:

1. Potencia de la bobina constante de 215 W las 24 horas y la radiación solar ( $\varphi_{sol} (\frac{W}{m^2})$ ) variable a lo largo del día.
2. Potencia de la bobina variable, es decir, 215 W cada 6 segundos, como se ha explicado anteriormente y la radiación solar ( $\varphi_{sol} (\frac{W}{m^2})$ ) variable a lo largo del día.
3. Potencia de la bobina variable, es decir, 215 W cada 6 segundos y nula en las horas de la noche, de 23:00h-7:00h y la radiación solar variable a lo largo del día.
4. Potencia de la bobina constante nula las 24 horas y la radiación solar ( $\varphi_{sol} (\frac{W}{m^2})$ ) variable a lo largo del día.
5. Potencia de la bobina variable, es decir, 215 W cada 6 segundos, como se ha explicado anteriormente y la radiación solar ( $\varphi_{sol} (\frac{W}{m^2})$ ) nula las 24 h.

Para entender las siguientes gráficas en las que se muestra la evolución de las temperaturas de asfalto, de la bobina y del terreno se debe saber que:

- El día comienza a las 00:00h.
- Para conocer la evolución de la temperatura de la bobina se ha hecho una media aritmética de forma que:

$$T_{bobina} = \frac{T_{hm} + T_{am}}{2} [^{\circ}C]$$

- La temperatura del terreno ( $T_t$ ) es siempre  $25^{\circ}C$ . Se muestra en las gráficas para ver la comparativa de la evolución de las temperaturas de las distintas superficies.

### 3.2.1. Con temperatura exterior constante

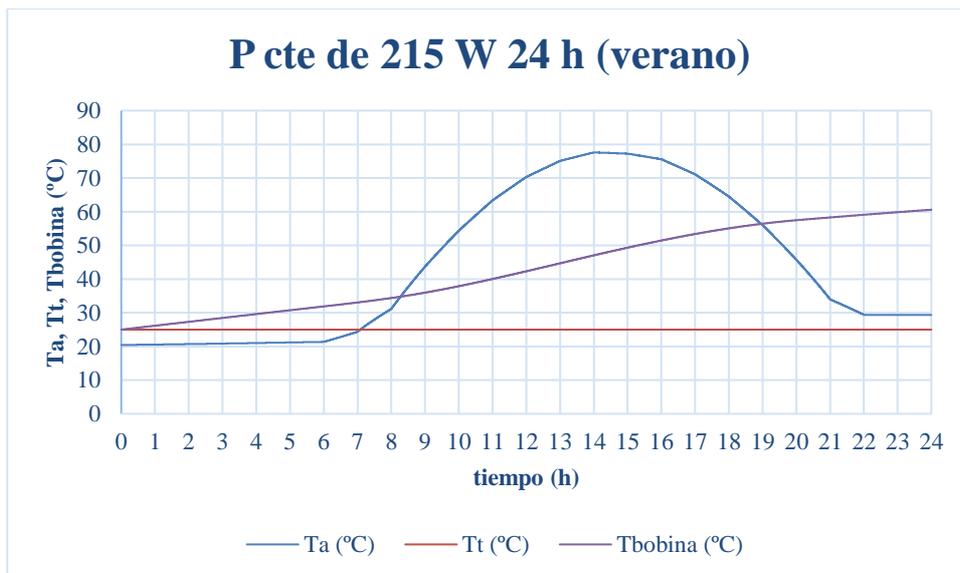
Este análisis tiene la condición de que la temperatura exterior es constante a lo largo del día, teniendo un valor de  $25^{\circ}C$  en verano y  $15^{\circ}C$  en invierno. Por lo tanto, la temperatura inicial en las integraciones de las temperaturas del asfalto y de la bobina es de  $25^{\circ}C$  en verano y  $15^{\circ}C$  en invierno.

Por otra parte, la temperatura de cielo tiene el valor de:

$$T_{cielo} = T_{ext} - 10^{\circ}C$$

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a los análisis realizados.

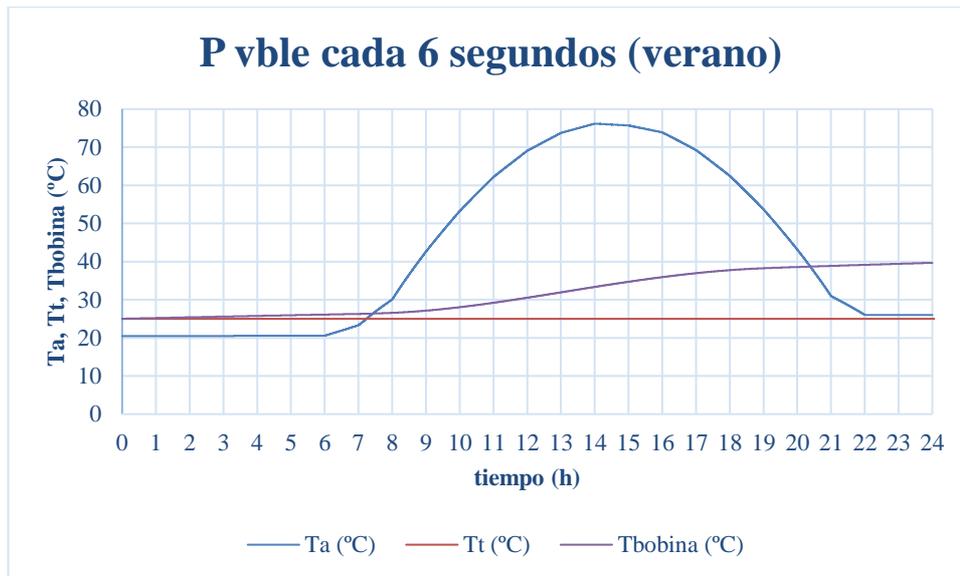
- Verano: Potencia de la bobina constante de 215 W y radiación solar variable



Gráfica 13: Verano. Potencia de la bobina constante de 215 W con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

La temperatura del asfalto llega hasta un valor de  $77,6^{\circ}\text{C}$  entre las 14:00 y las 15:00 horas, que es cuando hay mayor radiación solar incidiendo en el asfalto. En cuanto a la temperatura de la bobina, la temperatura que alcanza al cabo de las 24 horas es de  $60,6^{\circ}\text{C}$ . Es decir, incrementa un intervalo de  $35,6^{\circ}\text{C}$  cada día, lo que llegaría a temperaturas muy altas en pocos días. Sin embargo, hay que tener en cuenta que es el caso más desfavorable ya que la potencia que disipa la bobina es la máxima que puede dar ( $215\text{ W}$ ) las 24 horas.

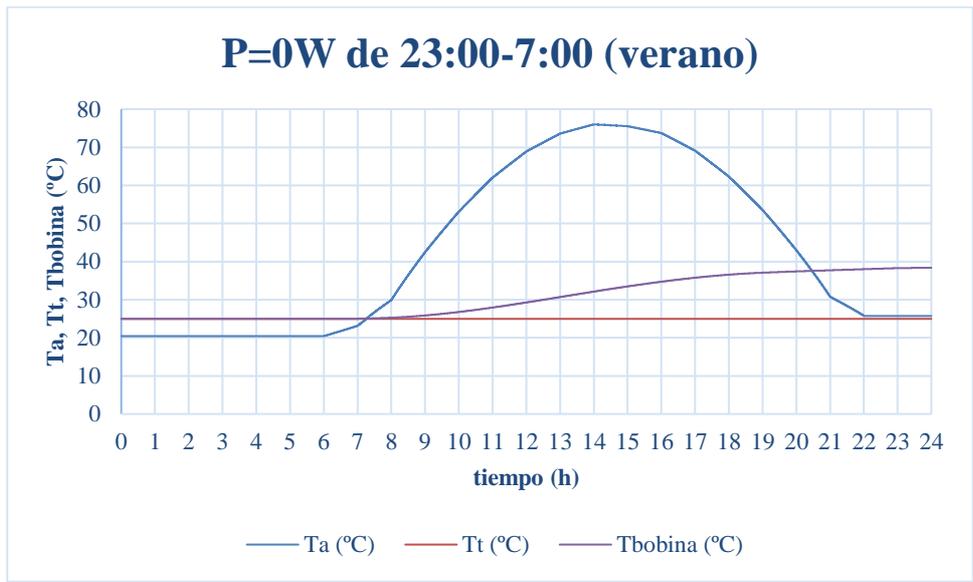
➤ Verano: Potencia de la bobina variable y radiación solar variable



Gráfica 14: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

Similar al caso anterior, la temperatura del asfalto llega hasta un valor de  $76,14^{\circ}\text{C}$  alrededor de las 14:00 horas. Sin embargo, ahora que la potencia de la bobina disipada varía cada 6 segundos, la temperatura que alcanza la bobina después de las 24 horas es de  $39,65^{\circ}\text{C}$ . En este caso, el incremento de temperatura es de  $14,65^{\circ}\text{C}$  al cabo de 24 horas.

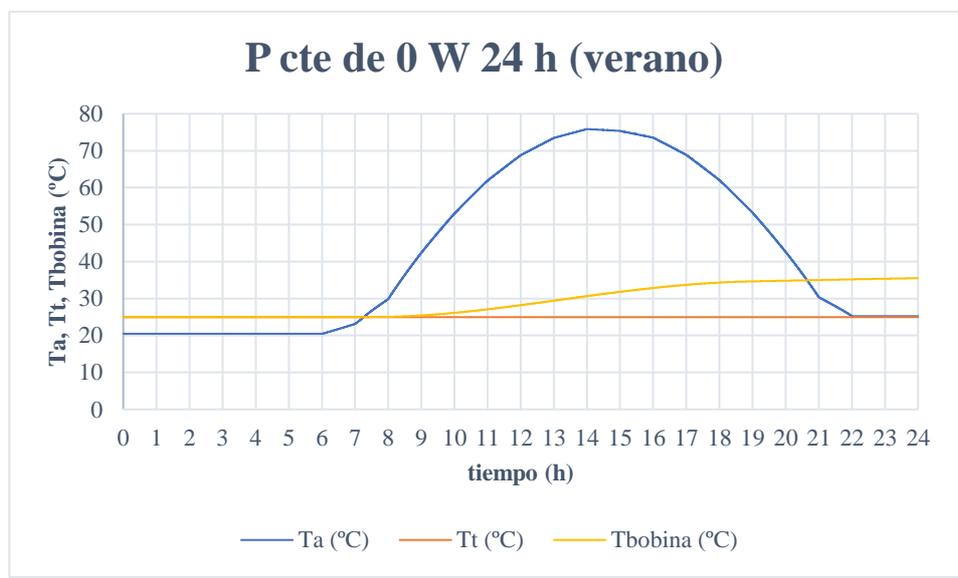
➤ Verano: Potencia de la bobina nula de 23:00h-7:00h y radiación solar variable



Gráfica 15: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos excepto de 23:00h-7:00h que la potencia es nula con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

La temperatura del asfalto alcanza los 76,02°C a la hora de la radiación solar incidente máxima. Para la temperatura de la bobina, en este caso, se ha establecido que la potencia disipada por la bobina durante las horas de la noche sea nula. Es decir, no circula ningún vehículo entre las 23:00 horas y las 7:00 horas. Se observa que la temperatura de la bobina empieza a aumentar cuando la bobina empieza a disipar, alcanzando una temperatura de 35,8°C al cabo del día completo.

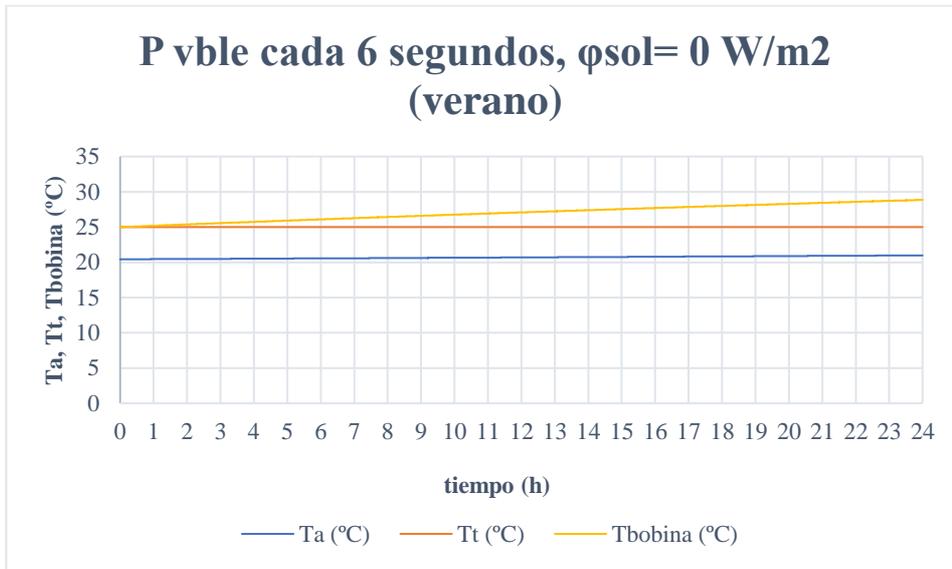
➤ Verano: Potencia de la bobina nula y radiación solar variable



Gráfica 16: Verano. Potencia de la bobina constante de 0 W con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

Según las condiciones de entrada para este caso, la potencia disipada por la bobina es nula el día completo. La temperatura del asfalto no se ve afectada ya que su valor máximo vuelve a ser 75,86°C. En cambio, la temperatura de la bobina pasa de los 25°C a los 35,51°C al cabo de las 24 h, es decir, sufre un incremento de 10,51°C. Se puede apreciar que, aun estando la bobina sin disipar potencia, la temperatura de la bobina aumenta debido al efecto de la radiación solar incidente en el asfalto.

➤ Verano: Potencia variable cada 6 segundos y radiación solar nula

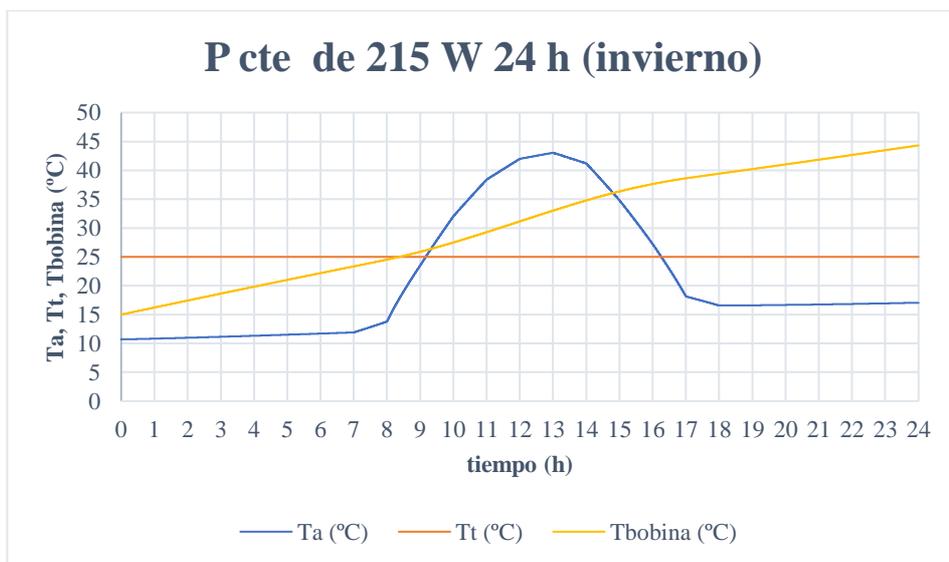


Gráfica 17: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos y radiación solar nula con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

En este caso, la radiación solar es nula las 24 horas. Es prácticamente imposible que se de en la realidad, pero se ha decidido analizar para ver cómo afecta a las temperaturas que se están estudiando.

La temperatura del asfalto llega a los 21°C mientras que la temperatura de la bobina llega hasta los 28,86°C. Se puede observar que la radiación solar es un factor muy importante a tener en cuenta en este sistema que se está estudiando ya que afecta a ambas temperaturas, pero sobre todo a la temperatura del asfalto.

➤ Invierno: Potencia de la bobina constante y radiación solar variable



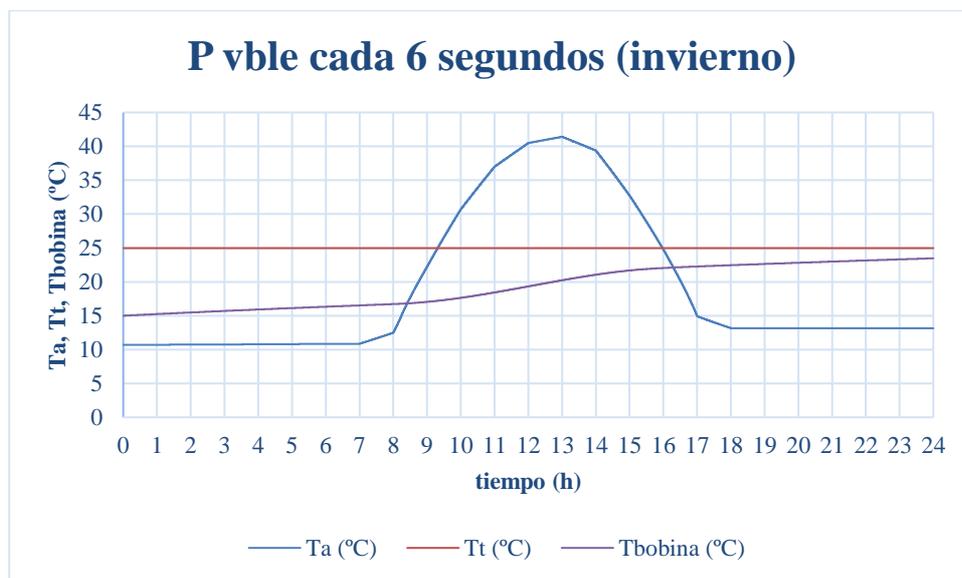
Gráfica 18: Invierno. Potencia de la bobina constante de 215 W con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

En los días de invierno, la radiación solar máxima es alrededor de las 13:00 horas que es cuando la

temperatura del asfalto alcanza su valor máximo de 43,05°C. Por otra parte, la temperatura de la bobina aumenta su valor desde los 15°C hasta los 44,33°C. Es decir, sufre un incremento de 29,33°C al cabo de las 24 horas.

Si comparamos este caso con respecto al día de verano, la temperatura del asfalto como era de esperar, alcanza un valor menor puesto que la radiación solar en invierno es mucho menor que en verano. Del mismo modo, la temperatura de la bobina alcanza un valor menor pero el incremento de temperatura al cabo de las 24 horas es algo similar siendo para el día de verano de 35,6°C y para el día de invierno de 29,33°C. Aun así, esta diferencia de 5°C cobra importancia cuando se estudia este sistema para una semana, por ejemplo, ya que el incremento de temperatura se multiplica por siete.

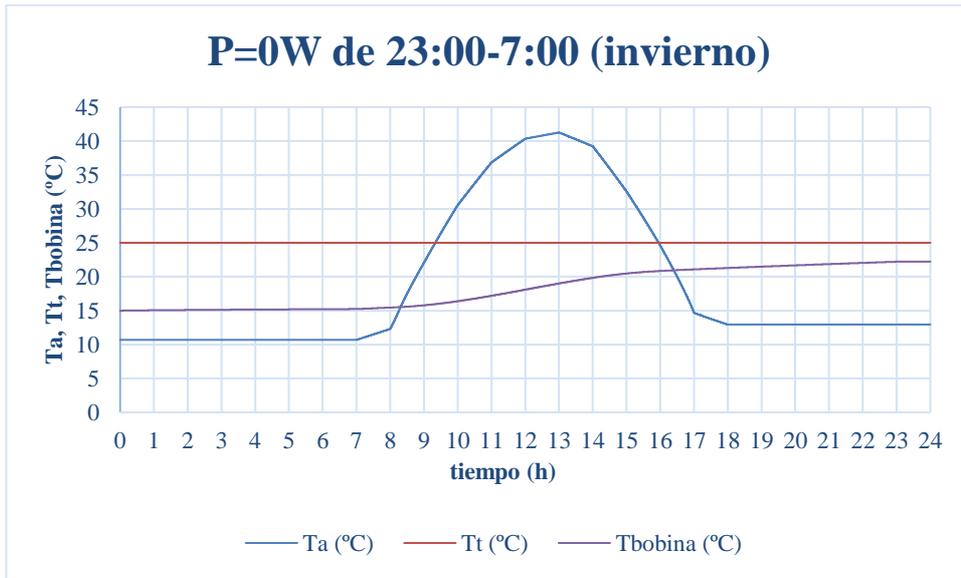
➤ Invierno: Potencia de la bobina variable y radiación solar variable



Gráfica 19: Invierno: Potencia de la bobina variable cada 6 segundos con temperatura exterior constante. (Elaboración propia).

La temperatura del asfalto vuelve el pico máximo alrededor de las 13:00 horas, con un valor de 41,42°C. La temperatura de la bobina llega hasta los 23,48°C después de las 24 horas. El incremento de temperatura disminuye con respecto a un día de verano en estas condiciones, siendo de 8,48°C en invierno y 14,65°C en verano.

➤ Invierno: Potencia de la bobina nula de 23:00h-7:00h y radiación solar variable

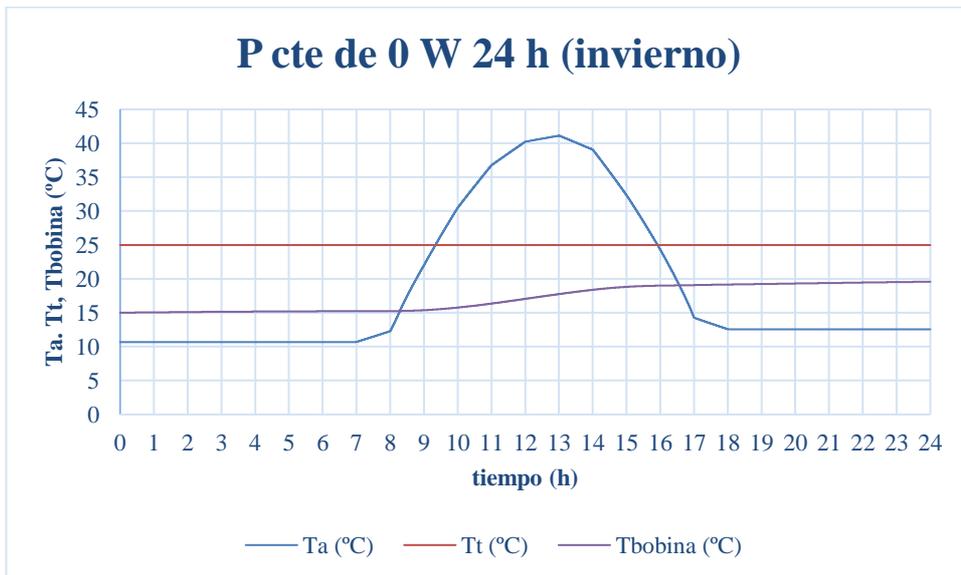


Gráfica 20: Invierno. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos excepto de 23:00h-7:00h que la potencia es nula con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

Al igual que en el caso anterior, la temperatura del asfalto llega hasta los 41,27°C a las 13:00 horas. La temperatura de la bobina también realiza una evolución similar al caso anterior, llegando a un valor de 22,22°C al cabo de las 24 horas.

Se observa que, de la misma manera que en un día de verano en estas condiciones, que la potencia disipada por la bobina sea nula durante 8 horas, no supone un gran cambio en el funcionamiento del sistema.

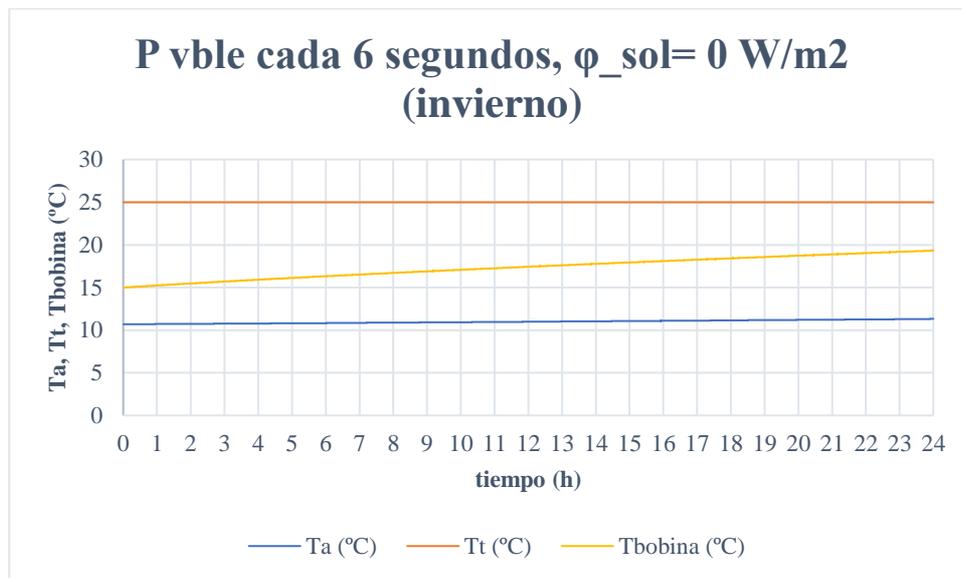
➤ Invierno: Potencia de la bobina nula y radiación solar variable



Gráfica 21: Potencia de la bobina constante de 0 W con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

Para una potencia nula durante el periodo de tiempo estudiado, la temperatura del asfalto llega hasta un valor de 41,11°C a las 13:00 horas. La temperatura de la bobina llega hasta los 19,58°C, sufriendo un incremento de temperatura de 4,58°C.

➤ Invierno: Potencia variable cada 6 segundos y radiación solar nula



Gráfica 22: Invierno. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos y radiación solar nula con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

La temperatura del asfalto, como se ha observado en los casos anteriores, está directamente relacionada con la radiación solar y depende muy poco de la potencia disipada por la bobina. En cuanto a la temperatura de la bobina, tiene un comportamiento parecido al caso en el que sí existía radiación solar, alcanzando un valor de 19,34°C.

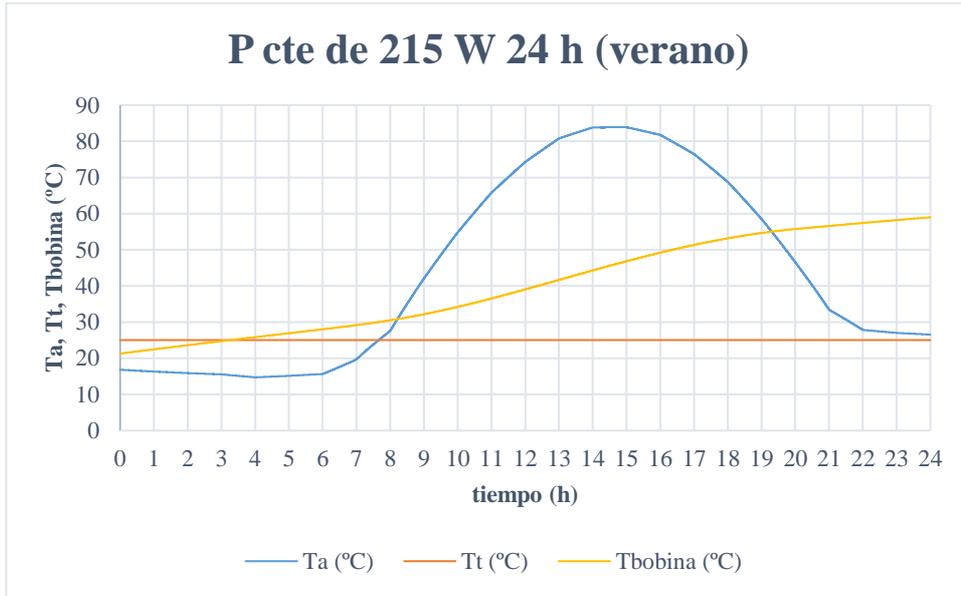
### 3.2.2. Con temperatura exterior variable

En el siguiente análisis de sensibilidad, las condiciones iniciales generales cambian con el fin de acercarse un poco más a la realidad. En primer lugar, la temperatura exterior, es decir, la temperatura ambiente deja de ser constante, si no que varía a lo largo del día según para un día de verano y para un día de invierno en la provincia de Sevilla. Por lo tanto, la temperatura inicial en las integraciones de las temperaturas del asfalto y de la bobina también cambian, siendo de 19,7°C en verano y 6,1°C en invierno.

Al introducir estas variantes al análisis de sensibilidad se obtienen las siguientes gráficas para las distintas situaciones que se están estudiando.

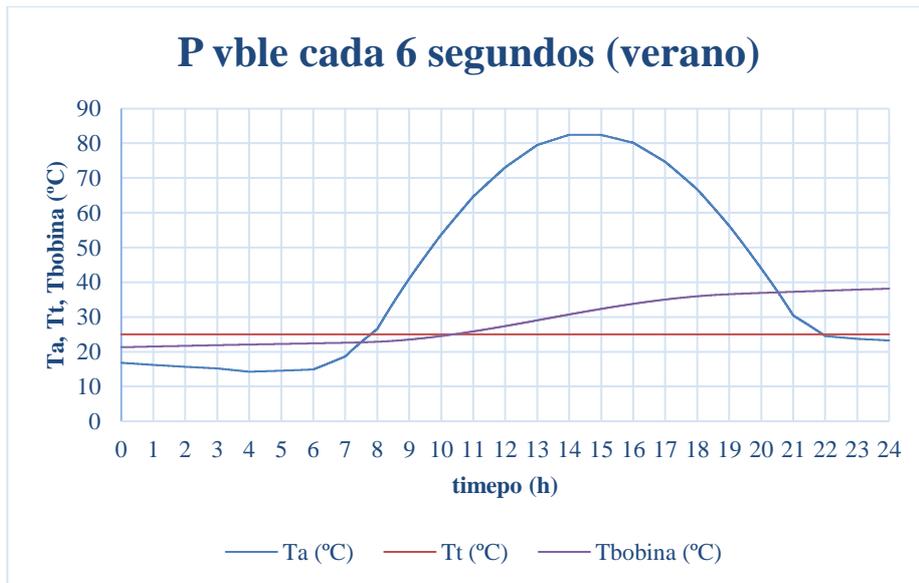
Cabe destacar que el comportamiento de las temperaturas estudiadas es prácticamente el mismo que en el análisis con temperatura exterior constante. Solo cambia y muy poco los valores máximos alcanzados. Se muestra claramente en la tabla que se proporciona en el análisis de resultados.

➤ Verano: Potencia de la bobina constante y radiación solar variable



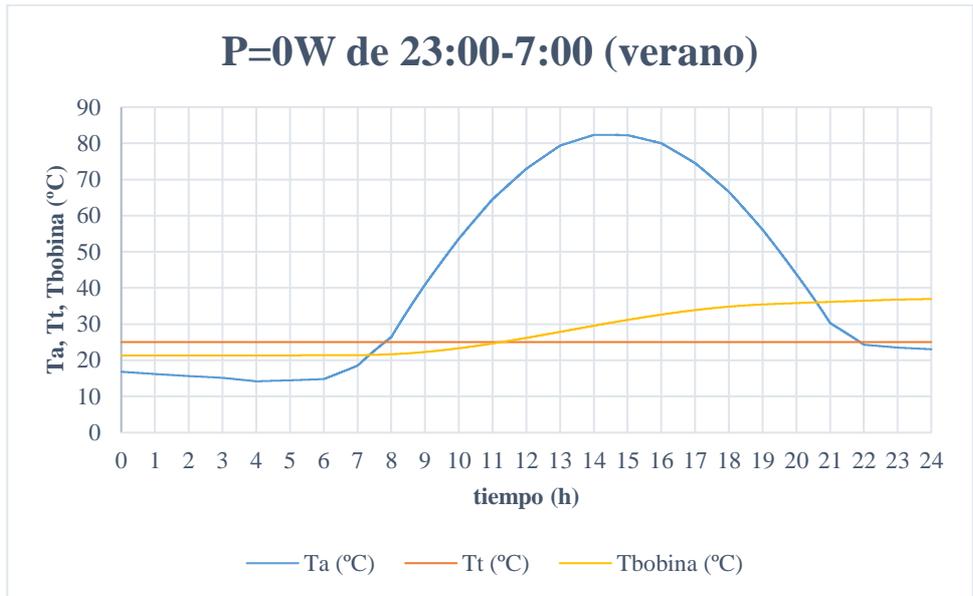
Gráfica 23: Verano. Potencia de la bobina constante de 215 W con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

➤ Verano: Potencia de la bobina variable y radiación solar variable



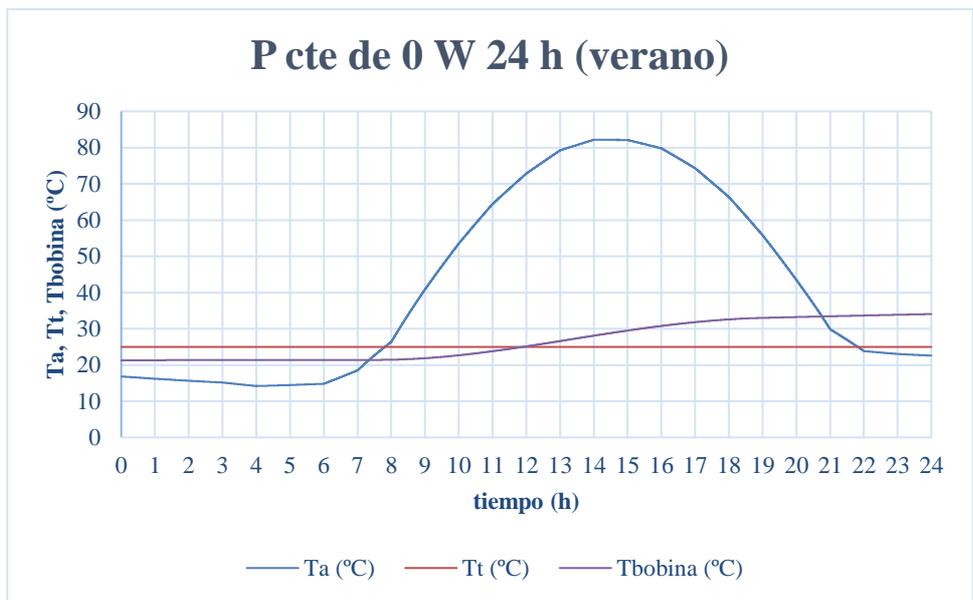
Gráfica 24: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

➤ Verano: Potencia de la bobina nula de 23:00h-7:00h y radiación solar variable



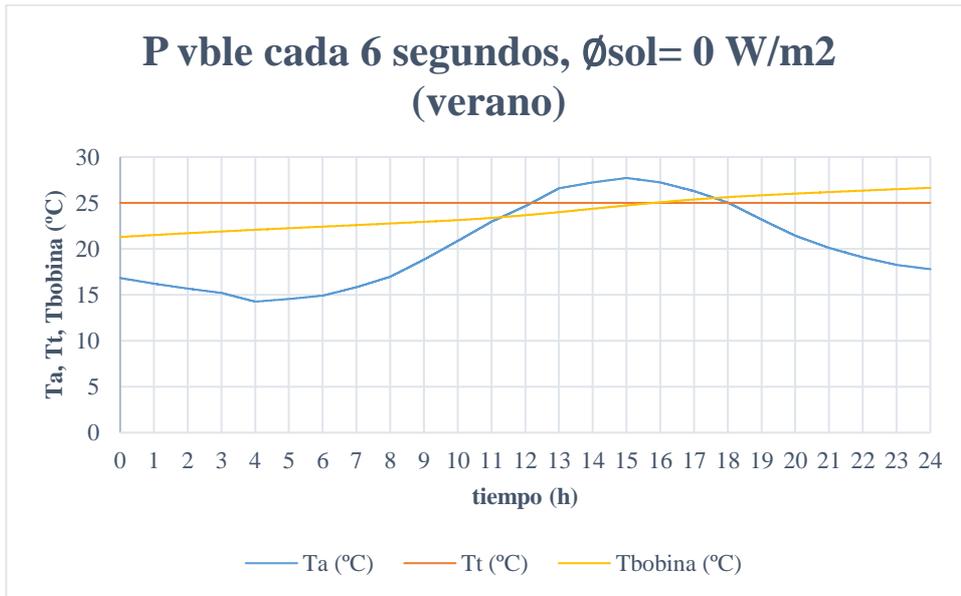
Gráfica 25: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos excepto de 23:00h-7:00h que la potencia es nula con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

➤ Verano: Potencia de la bobina nula y radiación solar variable



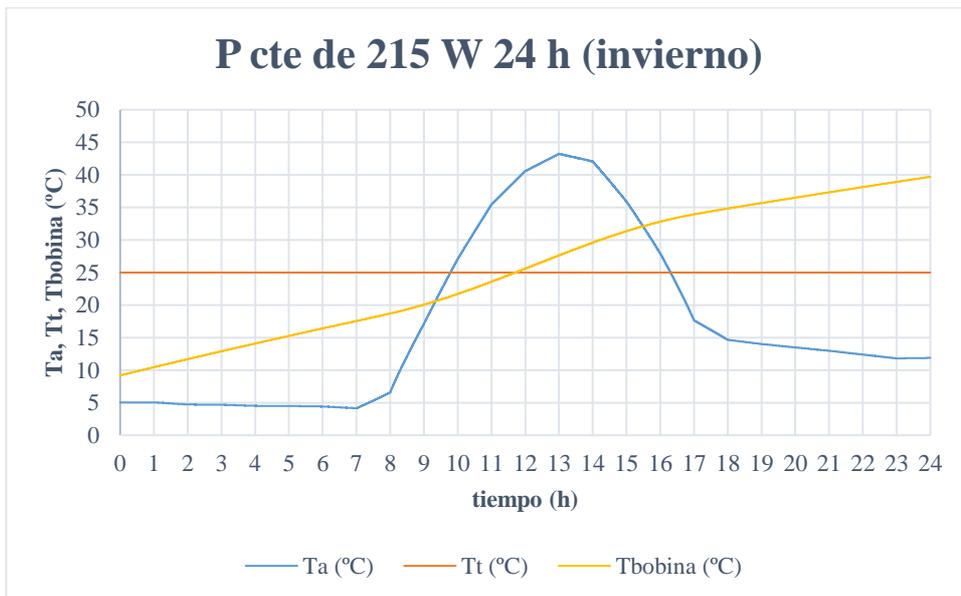
Gráfica 26: Verano. Potencia de la bobina constante de 0 W con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

➤ Verano: Potencia variable cada 6 segundos y radiación solar nula



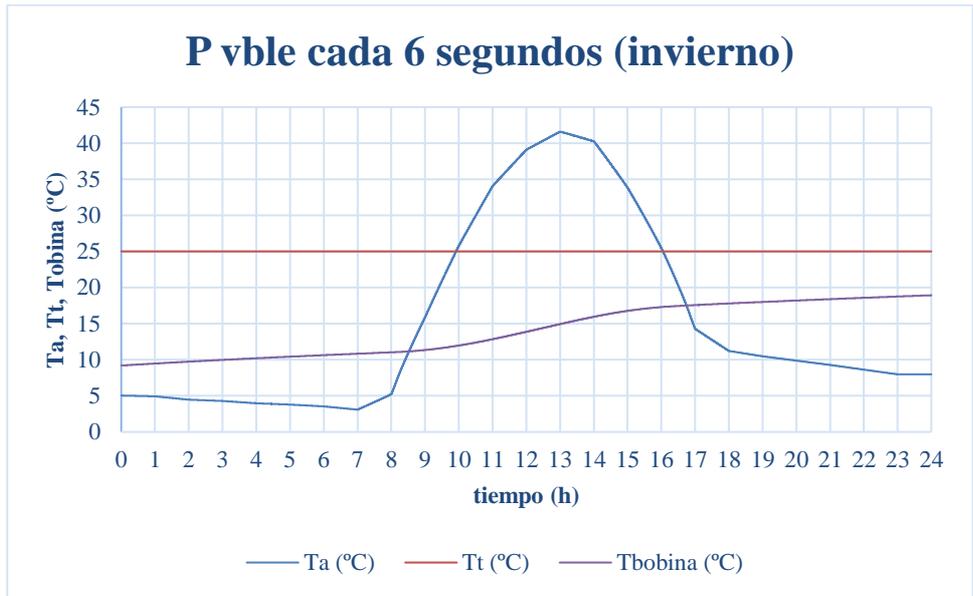
Gráfica 27: Verano. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos y radiación solar nula con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

➤ Invierno: Potencia de la bobina constante y radiación solar variable



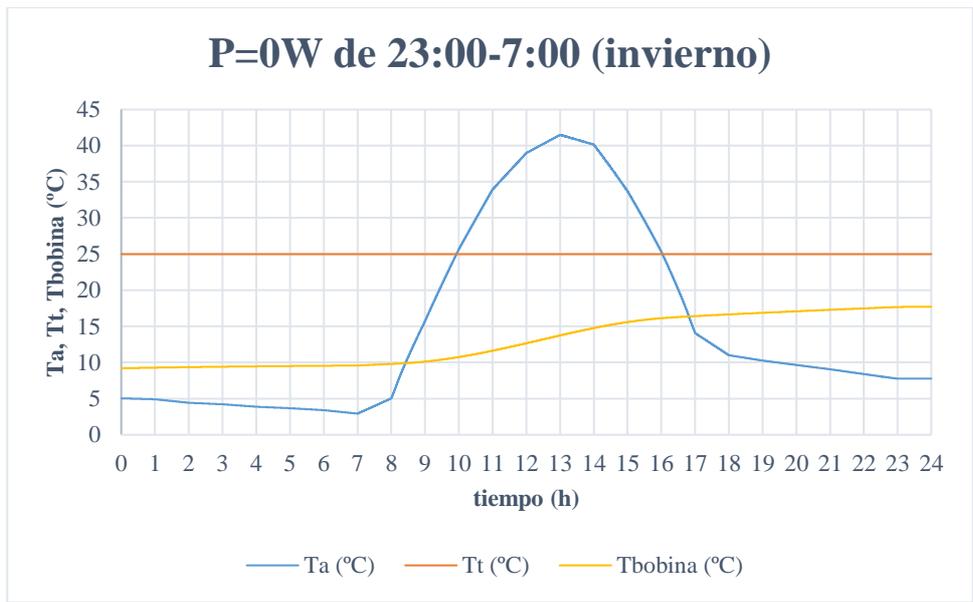
Gráfica 28: Invierno. Potencia de la bobina constante de 215 W con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

➤ Invierno: Potencia de la bobina variable y radiación solar variable



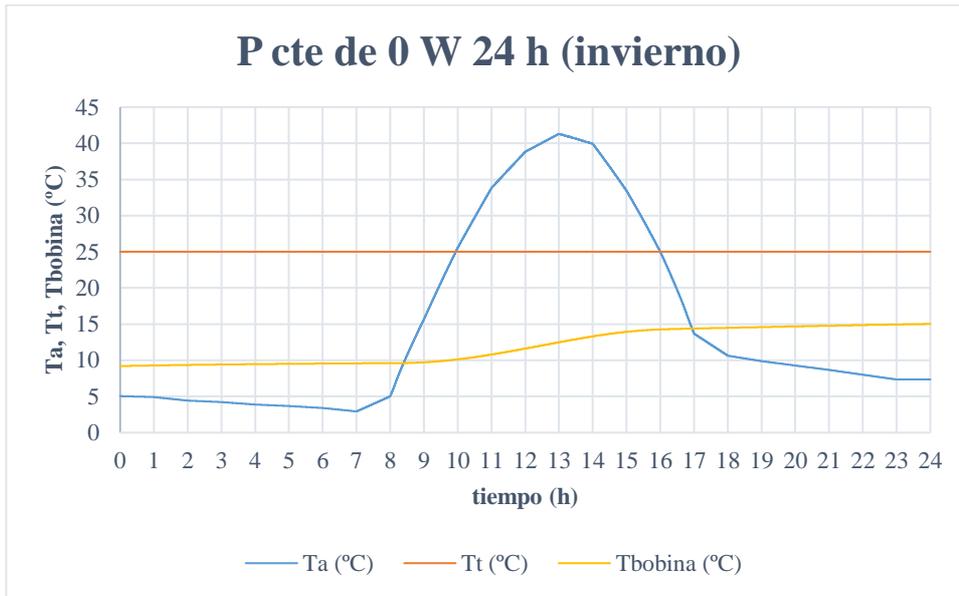
Gráfica 29: Invierno: Potencia de la bobina variable cada 6 segundos con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

➤ Invierno: Potencia de la bobina nula de 23:00h-7:00h y radiación solar variable



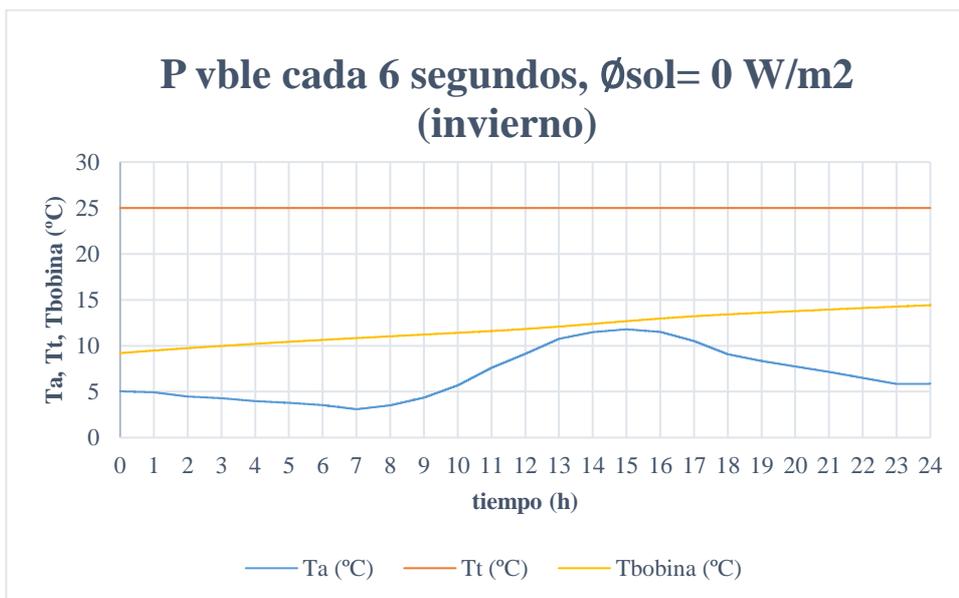
Gráfica 30: Invierno. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos excepto de 23:00h-7:00h que la potencia es nula con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

➤ Invierno: Potencia de la bobina nula y radiación solar variable



Gráfica 31: Potencia de la bobina constante de 0 W con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

- Invierno: Potencia variable cada 6 segundos y radiación solar nula



Gráfica 32: Invierno. Potencia de la bobina variable cada 6 segundos y radiación solar nula con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

### 3.2.3. Análisis de resultados

Para facilitar el análisis de los resultados, se muestran a continuación unas tablas con las temperaturas máximas alcanzadas por la temperatura de la bobina y del asfalto en las diferentes situaciones.

- Con temperatura exterior constante

Tabla 1: Verano. Temperaturas máximas alcanzadas por el asfalto y la bobina en diferentes situaciones con temperatura

exterior constante. (Elaboración propia)

| VERANO               | Ta (°C) | Tbobina (°C) |
|----------------------|---------|--------------|
| P=215W, Rds vble     | 77,6    | 60,6         |
| Pvble, Rds vble      | 76,14   | 39,65        |
| P=0W noche, Rds vble | 76,02   | 38,4         |
| P=0W, Rds vble       | 75,86   | 35,51        |
| Pvble, Rds=0 W/m2    | 21      | 28,86        |

Tabla 2: Invierno. Temperaturas máximas alcanzadas por el asfalto y la bobina en diferentes situaciones con temperatura exterior constante. (Elaboración propia)

| INVIERNO             | Ta (°C) | Tbobina (°C) |
|----------------------|---------|--------------|
| P=215W, Rds vble     | 43,05   | 44,33        |
| Pvble, Rds vble      | 41,42   | 23,48        |
| P=0W noche, Rds vble | 41,27   | 22,22        |
| P=0W, Rds vble       | 41,11   | 19,58        |
| Pvble, Rds=0 W/m2    | 11,32   | 19,34        |

➤ Con temperatura exterior variable

Tabla 3: Verano. Temperaturas máximas alcanzadas por el asfalto y la bobina en diferentes situaciones con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

| VERANO               | Ta (°C) | Tbobina (°C) |
|----------------------|---------|--------------|
| P=215W, Rds vble     | 83,91   | 59           |
| Pvble, Rds vble      | 82,45   | 38,17        |
| P=0W noche, Rds vble | 82,33   | 36,95        |
| P=0W, Rds vble       | 82,18   | 34,06        |
| Pvble, Rds=0 W/m2    | 27,73   | 26,65        |

Tabla 4: Invierno. Temperaturas máximas alcanzadas por el asfalto y la bobina en diferentes situaciones con temperatura exterior variable. (Elaboración propia)

| INVIERNO             | Ta (°C) | Tbobina (°C) |
|----------------------|---------|--------------|
| P=215W, Rds vble     | 43,24   | 39,72        |
| Pvble, Rds vble      | 41,62   | 18,94        |
| P=0W noche, Rds vble | 41,47   | 17,7         |

|                   |       |       |
|-------------------|-------|-------|
| P=0W, Rds vble    | 41,32 | 15,03 |
| Pvble, Rds=0 W/m2 | 11,79 | 14,42 |

En primer lugar, hay que tener en cuenta que se han estudiado dos casos extremos en cuanto a radiación solar en la provincia de Sevilla.

Hay que recalcar que las temperaturas máximas alcanzadas del asfalto se dan cuando hay mayor radiación solar incidente, es decir, sobre las 15.00h en verano y sobre las 13.00h en invierno. Por lo tanto, se afirma que la temperatura del asfalto depende en su mayoría de la radiación solar incidente y de la temperatura exterior.

En cambio, la temperatura de la bobina alcanza su máximo valor al cabo de las 24 horas ya que se va calentando y depende principalmente de la potencia que disipa.

Por otra parte, una variable muy importante a mencionar es el coeficiente de película convectivo:  $h \left( \frac{W}{m^2} * K \right)$ .

En los análisis, este coeficiente se ha obtenido según convección libre de un gas, cuyo orden de magnitud es alrededor de  $5 \frac{W}{m^2} * K$ . Esta suposición se aleja de la realidad ya que hay que tener en cuenta factores como el viento o la inercia del aire que mueve el vehículo al circular por la carretera. Por lo tanto, se trataría de convección forzada de un gas.

El coeficiente de película según este tipo de convección tiene valores mayores con órdenes de magnitud en torno a  $50 \frac{W}{m^2} * K$ , lo que conlleva a valores menores de las temperaturas.

Esta causa se ve reflejada en el caso en el que la potencia no disipa potencia en las 24 horas con la radiación solar adecuada a un día de verano. En estas condiciones, se trataría de una carretera convencional y la temperatura del asfalto supera los 80°C, lo que es prácticamente imposible.

En consecuencia, se ha introducido una constante ( $C_h$ ) que multiplica al coeficiente de película convectivo para observar cómo cambian los valores de las temperaturas del asfalto y de la bobina. El coeficiente de película modificado sería:

$$h_{mod} = C_h * h$$

En las siguientes tablas se muestran los valores máximos de las temperaturas para distintos valores de  $C_h$  en el caso en el que la potencia disipada de la bobina es de 215 W cada 6 segundos y la radiación solar es según un día de verano y de invierno.

Tabla 5: Temperatura máximas del asfalto y de bobina según el coeficiente Ch en verano. (Elaboración propia)

| VERANO | Ta (°C) | Tbobina (°C) |
|--------|---------|--------------|
| Ch=3   | 65,72   | 34,66        |
| Ch=4   | 61,51   | 33,78        |
| Ch=5   | 58,45   | 33,14        |

|      |       |       |
|------|-------|-------|
| Ch=6 | 56,12 | 32,66 |
|------|-------|-------|

Tabla 6: Temperatura máximas del asfalto y de bobina según el coeficiente Ch en invierno. (Elaboración propia)

| INVIERNO | Ta (°C) | Tbobina (°C) |
|----------|---------|--------------|
| Ch=3     | 32,63   | 17,7         |
| Ch=4     | 30,42   | 17,41        |
| Ch=5     | 28,83   | 17,2         |
| Ch=6     | 27,62   | 17,05        |

A medida que aumenta el valor de la constante, la disminución de temperatura es menor. Incluso se puede observar que el incremento de disminución en la temperatura del asfalto es mayor que en la de la bobina. Tiene sentido puesto que la convección se da entre la superficie del asfalto y el aire exterior.

Con estas temperaturas más bajas el sistema podría funcionar sin sobrecalentamientos. Sin embargo, el caso más desfavorable es el que determina el funcionamiento total del sistema en todas las situaciones posibles.

## 4 CONCLUSIONES

La ingeniería del pavimento es un área crucial en el desarrollo de infraestructuras viales eficientes y sostenibles. Es importante prestar especial atención a la transferencia de calor en pavimentos y a sus propiedades, aspectos fundamentales que influyen en el diseño y construcción de carreteras.

La electrificación de carreteras, conocida como eRoad, representa un avance significativo en la movilidad sostenible. Sin embargo, enfrenta desafíos en la integración de infraestructuras y la instalación de unidades de carga, así como consideraciones específicas para la implementación de sistemas de transferencia de energía en las carreteras.

Los módulos de carga utilizados pueden tener un impacto significativo en el rendimiento del pavimento y en la temperatura alcanzada durante su funcionamiento, lo que subraya la importancia de una cuidadosa planificación y diseño.

Por otra parte, se ha analizado el comportamiento del asfalto sometido a diferentes aplicaciones de calentamiento por inducción; desde la curación del asfalto hasta la fusión de hielo y nieve en las carreteras. Además, se están explorando tecnologías que mejoran el rendimiento de los pavimentos mediante capas conductoras de electricidad y absorbentes de magnetismo, lo que demuestra el potencial de la inducción en la ingeniería del pavimento.

Para la futura introducción de carreteras electrificadas (*eRoads*) en la red actual, es necesario poner foco en los efectos y consecuencias de la incorporación de sistemas de transferencia inductiva de potencia en la infraestructura viaria.

El análisis de la carga inalámbrica de inducción dinámica revela que el control de la disipación de calor en el terreno es esencial para su eficacia y la integridad del sistema. Para ello, se ha estudiado una estructura que se compone de cuatro superficies de intercambio: Asfalto, bobina, hormigón y terreno; sometida a diferentes condiciones de operación. El estudio se ha realizado mediante un modelo unidimensional.

En primer lugar, se ha estudiado el comportamiento de las superficies de intercambio en régimen permanente. En concreto, el estudio se ha centrado en las temperaturas del asfalto y de la bobina, ya que son críticas y deben mantenerse dentro de ciertos límites para evitar daños.

Se ha observado que las condiciones ambientales, como la temperatura exterior y la radiación solar, afectan significativamente estas temperaturas. Además, a medida que aumenta la potencia conectada a la bobina, la temperatura de la bobina aumenta de manera más pronunciada que la del asfalto. Para combatir estas altas temperaturas, una posible solución sería la implementación de un sistema de refrigeración y así garantizar la eficacia a largo plazo del sistema de carga inalámbrica de inducción dinámica en carreteras.

En segundo lugar, el modelo unidimensional se estudió en régimen transitorio, teniendo otros factores en cuenta como la intensidad media diaria de los vehículos, la distinción entre verano e invierno y considerando la temperatura exterior constante como variable.

Los resultados han mostrado que las temperaturas máximas del asfalto coinciden con momentos de alta radiación solar, mientras que la temperatura de la bobina alcanza su pico después de 24 horas,

influenciada principalmente por la potencia disipada.

Por otra parte, se ha hecho mención en el coeficiente de película convectivo ( $h$ ), aunque su cálculo se basa en una convección libre de gas, obviando factores como el viento. Se ha introducido una constante ( $Ch$ ) para ajustar este coeficiente y analizar los valores máximos de temperaturas para distintos valores de  $C_h$ , considerando la potencia de la bobina y la radiación solar en verano e invierno.

En conclusión, un sistema con temperaturas más bajas podría funcionar sin sobrecalentamientos, aunque es necesario evaluar su desempeño en diversas condiciones para determinar su viabilidad.

Al abordar esta cuestión de compatibilidad entre el sistema de inducción y el pavimento, se requiere alcanzar unos requisitos estructurales y de rendimiento adecuados. Así no solo se mejora la eficiencia y la sostenibilidad de las carreteras, sino que también se allana el camino hacia un futuro más conectado y respetuoso con el medio ambiente en el campo de la movilidad.

## REFERENCIAS

- [1] F. Chen, "Inductive power transfer technology for road transport electrification," in *Eco-efficient Pavement Construction Materials*, Estocolmo, Woodhead Publishing, 2020, pp. 383-399.
- [2] E. Córdoba Ledesma, "Analysis of effects and consequences of constructing inductive power transfer system in road infrastructure," KTH Architecture and the Built Environment, Estocolmo, 2015.
- [3] L. Soares and H. Wang, "A study on renewed perspectives of electrified road for wireless power transfer of electric vehicles," ELSEVIER, New Jersey, 2022.
- [4] S. Ridha Oleiwi Aletba, N. Abdul Hassan, R. Putra Jaya, E. Aminudin and M. Z. Hanif Mahmud, "Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: A state-of-the-art review," *Traffic and transportation engineering*, pp. 356-373, 2020.
- [5] A. Salam Ridha Oleiwi, H. Norhidayah Abdul, M. Azman and H. Ahmed Abdulameer, "Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: a state-of-art review," *Journal of traffic and Transportation Engineering*, pp. 356-373, 2021.
- [6] C. Panchal, S. Stegen and J. Lu, "Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system," *Engineering Science and Technology*, pp. 922-937, 2018.
- [7] F. Chen, N. Taylor and N. Kringos, "Electrification of roads: Opportunities and challenges," ELSEVIER, pp. 109-119, 2015.
- [8] L. Ripa Rodriguez, "Pásate a lo eléctrico," 2 febrero 2019. [Online]. Available: <https://pasatealoelectrico.es/2019/02/02/asi-cargaremos-de-manera-inalambrica-nuestros-automoviles-electricos-en-un-futuro-no-muy-lejano/>.
- [9] C. A. García Vázquez, F. Llorens-Iborra, L. M. Fernández-Ramírez and F. Jurado, "Comparative study of dynamic wireless charging of electric vehicles in motorway, highway and urban stretches," *Energy*, pp. 42-57, 2017.
- [10] S. Niua, H. Yu, S. Niu and L. Jian, "Power loss analysis and thermal assessment on wireless electric vehicle charging technology: The over-temperature risk of ground assembly needs attention," ELSEVIER, Shenzhen, 2020.
- [11] K. Liu, C. Fu, D. Dai, C. Jin, W. Li, S. Li and X. Xu, "Induction heating performance of asphalt pavements incorporating electrically conductive and magnetically absorbing layers," ELSEVIER, Hefei, 2019.

- [12] Y. Pamulapat, M. A. Elseifi, S. B. Cooper III, L. N. Mohammad and O. Elbagalati, "Evaluation of self-healing of asphalt concrete through induction heating and metallic fibers," *ELSEVIER*, pp. 66-75, 2017.
- [13] L. Hechuan, Y. Jianying, W. Shaopeng, L. Quantao, L. Bin and L. Yuanyuan, "Study on the gradient heating behaviours of asphalt concrete induced by induction heating," *ELSEVIER*, pp. 638-645, 2019.
- [14] Y. Sun, S. Wu, Q. Liu, Y. Yuan and Q. Ye, "Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating," *ELSEVIER*, pp. 871-883, 2017.
- [15] K. Liu, P. Xu, F. Wang, C. Jin, M. Huang and D. Dai, "Deicing efficiency analysis and economic-environment assessment of a novel induction heating asphalt pavement," *ELSEVIER*, 2020.
- [16] D. Yinfei, W. Jiacheng, D. Haibin, L. Yinchen and T. Jun, "Using steel fibers to accelerate the heat conduction in asphalt mixture and its performance evaluation," *Construction and Building Materials*, pp. 282-290, 2021.

# ANEXOS

## Anexo A: Código EES modelo 1D disipación del terreno. Régimen permanente.

{DATOS}

P=215 [W] [Potencia térmica disipada por bobina]

Te=25 [°C] {Temperatura ambiente}

phi\_sol=0 [W/m<sup>2</sup>] {Radiación solar incidente en asfalto}

Tt=25 [°C] {Temperatura del terreno Temperatura media anual}

Call fc\_plate\_horizontal1('air'; Ta; Te; 1; A/Perimetro: h; Nusselt; Ra)

{h=5 [W/m<sup>2</sup>·K] {Coeficiente película convectivo asfalto}}

épsilon=0,9 {Emisividad superficie asfalto}

L=1 [m] {Longitud del dominio}

W=1 [m] {Ancho del dominio}

A=L\*W {Área de transferencia}

Perímetro=2\*L+2\*W

esp\_asf=0,10 [m] [espesor capa de asfalto]

esp\_h=0,15 [m] [espesor de la capa de hormigón de la bobina]

esp\_t=5 [m] [espesor del terreno]

k\_asf=0,16 [W/m·K][Conductividad térmica asfalto]

k\_h=1,2 [W/m·K][Conductividad térmica hormigón]

k\_t=0,6 [W/m·K][Conductividad térmica terreno]

{BALANCES}

P=Qcda+Qcdh

epsilon\*phi\_sol\*A+Qcda=Qcva+Qrda

Qcdh=Qcdt

{FLUJOS DE CALOR}

$R_{cda} = \text{esp\_asf} / (k_{\text{asf}} * A)$

$R_{cdh} = \text{esp\_h} / (k_{\text{h}} * A)$

$R_{cdt} = \text{esp\_t} / (k_{\text{t}} * A)$

$Q_{cda} = (T_b - T_a) / R_{cda}$

$Q_{cdh} = (T_b - T_h) / R_{cdh}$

$Q_{cdt} = (T_h - T_t) / R_{cdt}$

$Q_{cva} = h * A * (T_a - T_e)$

## Anexo B: Código EES modelo 1D disipación del terreno. Régimen transitorio.

{!DATOS}

{P= 0 [W] [Potencia térmica disipada por bobina]}

P=lookup('Potencia'; time; 2)

{phi\_sol=0 [W/m2] {Radiación solar incidente en asfalto} }

phi\_sol=lookup('Radiacionsolar'; time; 2)

{Te=25 [°C] {Temperatura ambiente} }

Te=lookup('Text'; time; 2)

Tcielo=Te-10

Tt=25 [°C] {Temperatura del terreno Temperatura media anual}

Call fc\_plate\_horizontal1('air'; Ta; Te; 1; A/Perimetro: h\_real; Nusselt; Ra)

$h = C_{\text{h}} * h_{\text{real}}$

$C_{\text{h}} = 6$

{h=5 [W/m2·K] {Coeficiente película convectivo asfalto} }

epsilon=0,9 {Emisividad superficie asfalto}

L=1 [m] {Longitud del dominio}

W=1 [m] {Ancho del dominio}

$A=L*W$  {Area de transferencia}

$Perimetro=2*L+2*W$

$esp\_asf=0,10$  [m] [espesor capa de asfalto]

$esp\_h=0,15$  [m] [espesor de la capa de hormigón de la bobina]

$esp\_t=5$  [m] [espesor del terreno]

$k\_asf=0,16$  [W/m·K][Conductividad térmica asfalto]

$k\_h=1,2$  [W/m·K][Conductividad térmica hormigón]

$k\_t=0,6$  [W/m·K][Conductividad térmica terreno]

"ASFALTO"

$\rho\_a=1000$  [kg/m<sup>3</sup>]

$Cp\_a=1700$

$V\_a=esp\_asf*L*W$

"HORMIGÓN"

$\rho\_h=2300$  [kg/m<sup>3</sup>]

$Cp\_h=1000$

$V\_h=esp\_h*L*W$

"TERRENO"

$\rho\_t=1750$  [kg/m<sup>3</sup>]

$Cp\_t=800$

$V\_t=(esp\_asf/5)*L*W$

{!BALANCES}

$P=Qcda1+Qcd\_h1$

$\epsilon*phi\_sol*A+Qcda2=Qcva+Qrda$

"Límites de integración"

$time\_f=86400$

$time\_i=0$

$Temp\_inicial=9,2$  [°C]

$$Q_{iner} = \rho_a \cdot C_{p\_a} \cdot V_a \cdot \Delta T_{am}$$

"Asfalto"

$$Q_{cda1} = \rho_a \cdot C_{p\_a} \cdot V_a \cdot \Delta T_{am} + Q_{cda2}$$

$$T_{am} = T_{am\_i} + \int_{time\_i}^{time\_f} \dot{Q}_{cda1} dt$$

$$T_{am\_i} = T_{emp\_inicial}$$

"Hormigón"

$$Q_{cd\_h1} = Q_{cd\_h2} + \rho_h \cdot C_{p\_h} \cdot V_h \cdot \Delta T_{hm}$$

$$T_{hm} = T_{hm\_i} + \int_{time\_i}^{time\_f} \dot{Q}_{cd\_h1} dt$$

$$T_{hm\_i} = T_{emp\_inicial}$$

"Terreno"

$$Q_{cd\_h2} = Q_{cd\_t1}$$

$$Q_{cd\_h2} = Q_{cd\_t2} + \rho_t \cdot C_{p\_t} \cdot V_t \cdot \Delta T_{tm1}$$

$$T_{tm1} = T_{tm1\_i} + \int_{time\_i}^{time\_f} \dot{Q}_{cd\_h2} dt$$

$$T_{tm1\_i} = T_t$$

$$Q_{cd\_t2} = Q_{cd\_t3} + \rho_t \cdot C_{p\_t} \cdot V_t \cdot \Delta T_{tm2}$$

$$T_{tm2} = T_{tm2\_i} + \int_{time\_i}^{time\_f} \dot{Q}_{cd\_t2} dt$$

$$T_{tm2\_i} = T_t$$

$$Q_{cd\_t3} = Q_{cd\_t4} + \rho_t \cdot C_{p\_t} \cdot V_t \cdot \Delta T_{tm3}$$

$$T_{tm3} = T_{tm3\_i} + \int_{time\_i}^{time\_f} \dot{Q}_{cd\_t3} dt$$

$$T_{tm3\_i} = T_t$$

$$Q_{cd\_t4} = Q_{cd\_t5} + \rho_t \cdot C_{p\_t} \cdot V_t \cdot \Delta T_{tm4}$$

$$T_{tm4} = T_{tm4\_i} + \int_{time\_i}^{time\_f} \dot{Q}_{cd\_t4} dt$$

$$T_{tm4\_i} = T_t$$

$$Q_{cd\_t5} = Q_{cd\_t55} + \rho_t \cdot C_{p\_t} \cdot V_t \cdot \Delta T_{tm5}$$

$$T_{tm5} = T_{tm5\_i} + \int_{time\_i}^{time\_f} \dot{Q}_{cd\_t5} dt$$

$$T_{tm5\_i} = T_t$$

{ \$IntegralAutoStep Vary=1 Min=50 Max=2000 Reduce=1e-4 Increase=1e-6 }

\$Integraltable time:1; Tam; Ta; Thm; Th; Ttm1; Ttm2; Ttm3; Ttm4; Ttm5; Tt; Tb; Tbobina; P; phi\_sol; Qcva; Qrda; h\_real; h; Te; Tcielo

{!FLUJOS DE CALOR}

$$Rcda=(esp\_asf/2)/(k\_asf*A)$$

$$Rcdh=(esp\_h/2)/(k\_h*A)$$

$$Rcdt=(esp\_t/(2*5))/(k\_t*A)$$

"Asfalto"

$$Qcda1=(Tb-Tam)/Rcda$$

$$Qcda2=(Tam-Ta)/Rcda$$

"Hormigón"

$$Qcd\_h1=(Tb-Thm)/Rcdh$$

$$Qcd\_h2=(Thm-Th)/Rcdh$$

$$\{Qcdh=(Tb-Th)/Rcdh\}$$

"Terreno"

$$Qcd\_t1=(Th-Ttm1)/Rcdt$$

$$Qcd\_t11=(Ttm1-Tt1)/Rcdt$$

$$Qcd\_t11=Qcd\_t2$$

$$Qcd\_t2=(Tt1-Ttm2)/Rcdt$$

$$Qcd\_t22=(Ttm2-Tt2)/Rcdt$$

$$Qcd\_t22=Qcd\_t3$$

$$Qcd\_t3=(Tt2-Ttm3)/Rcdt$$

$$Qcd\_t33=(Ttm3-Tt3)/Rcdt$$

$$Qcd\_t33=Qcd\_t4$$

$$Qcd\_t4=(Tt3-Ttm4)/Rcdt$$

$$Qcd\_t44=(Ttm4-Tt4)/Rcdt$$

$$Qcd\_t44=Qcd\_t5$$

$$Qcd\_t5=(Tt4-Ttm5)/Rcdt$$

$$Qcd\_t55=(Ttm5-Tt)/Rcdt$$