

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

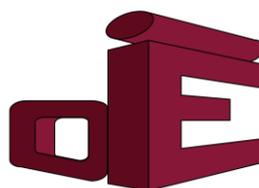
Estudio de la viabilidad funcional de un sensor solar en
la gestión del aire acondicionado de un automóvil

Autor: Jesús Gómez Jacinto

Tutor: Juan de la Cruz García Ortega

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Estudio de la viabilidad funcional de un sensor solar en la gestión del aire
acondicionado de un automóvil

Autor:

Jesús Gómez Jacinto

Tutor:

Juan de la Cruz García Ortega

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Carrera: Estudio de la viabilidad funcional de un sensor solar en la gestión del aire acondicionado de un automóvil

Autor: Jesús Gómez Jacinto

Tutor: Juan de la Cruz García Ortega

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Resumen

El fin de este proyecto será mejorar la climatización de un coche, teniendo en cuenta la radiación del Sol.

El pasajero especificará la temperatura deseada en el interior del coche, y mediante un sistema de control, se conseguirá llegar la temperatura activando en mayor o menor medida el aire acondicionado de un coche.

Para ello, se tendrá en cuenta la radiación del Sol, lo que provocará una sensación de mayor temperatura para el pasajero que esté recibiendo la luz del Sol. En ese momento, con un sistema de aire acondicionado tradicional, para disminuir esa sensación térmica el pasajero subiría el aire acondicionado y sentiría menor calor. Lo que se pretende en este proyecto sea que el sistema sea capaz de medir esa radiación del Sol y actúe en resonancia a esa perturbación provocada por el Sol.

Este se podrá hacer gracias al uso de sensores de radiación solar, que medirán en que medida incide la radiación y subirán, en mayor o menor medida, el aire acondicionado del coche. En nuestro caso, aumentando el caudal de aire acondicionado, manteniendo la temperatura constante.

Se realizará un estudio previo teórico para saber que ocurre con la temperatura del interior de un automóvil cuando incide la radiación solar y con el aire acondicionado, y posteriormente, se realizará un modelo de un sistema en Simulink, controlada por un PID.

Las conclusiones del estudio previo servirán para deducir si es factible implementar un sensor dentro del sistema microcontrolador que gestiona el aire acondicionado de un vehículo con el fin de mejorar su funcionalidad.

Resumen	9
Índice	3
1 Introducción	20
1.1 <i>La climatización en la conducción</i>	20
1.2 <i>Componentes del circuito de climatización</i>	20
1.3 <i>Funcionamiento del climatizador automático</i>	21
1.4 <i>Efecto de la radiación del Sol. Problema a resolver</i>	22
2 Análisis termodinámico	23
2.1 <i>Modelados</i>	23
2.2 <i>Evolución de la temperatura interior, sin ac ni radiación</i>	23
2.3 <i>Efecto de la radiación del sol en la temperatura de un vehículo</i>	27
2.4 <i>Efecto de la climatización en la evolución de la temperatura de un vehículo</i>	28
3 Modelado del sistema	31
3.1 <i>Ecuación termodinámica</i>	31
3.2 <i>Parámetros de la simulación</i>	32
3.3 <i>Modelo en simulink</i>	33
4 Control de la temperatura interior	41
4.1 <i>Concepto de control del sistema</i>	41
4.2 <i>Elección del controlador</i>	42
4.3 <i>Sintonización del controlador</i>	45
5 Estrategia de control usando un sensor de radiación solar	54
6 Análisis de viabilidad	61
7 Conclusiones	63
8 Bibliografía	64
9 Anexo	65

Índice de gráficas

Gráfica 1: Evolución de la temperatura de un coche	26
Gráfica 2: Evolución de la temperatura con radiación y sin radiación	28
Gráfica 3: Evolución de la temperatura con y sin radiación, y con aire acondicionado a baja potencia	29
Gráfica 4: Evolución de la temperatura con y sin radiación, y con aire acondicionado a alta potencia	30
Gráfica 5: Evolución de la temperatura sin radiación ni aire acondicionado	36
Gráficas 6 y 7: Evolución de la temperatura, del calor de radiación y caudal de aire acondicionado del vehículo	37
Gráficas 8 y 9: Evolución de la temperatura, del calor de radiación y caudal de aire acondicionado del vehículo	39
Gráfica 10: Variación de la temperatura con distintas KPs	47
Gráfica 11: Evolución del caudal de AC antes distintas KPs	49
Gráfica 12: Evolución del caudal de AC y del error del sistema	50
Gráfica 13: Evolución de la temperatura ante distintas KIs	51
Gráfica 14: Evolución del caudal de aire acondicionado y del error	51
Gráfica 15: Evolución de la temperatura y del aire acondicionado una vez elegidas KP y KI	52
Gráfica 16: Funcionamiento del sistema con radiación y sin aire acondicionado	54
Gráfica 17: Funcionamiento del sistema con radiación y con aire acondicionado	55

Gráfica 18: Evolución temporal del habitáculo 2 (con radiación) sin sensor solar	57
Gráfica 19: Evolución temporal del habitáculo 2 (con radiación) sin sensor solar	57
Gráfica 20: Evolución temporal del habitáculo 2 (con radiación) con sensor solar	59

Índice de tablas

Tabla 1: Ganancias proporcionales	48
Tabla 2: Ganancias integrales	50

Índice de imágenes

Imagen 1: Circuito de climatización	20
Imagen 2: Control bizona de aire acondicionado	22
Imagen 3: Flujos de calor en el vehículo	24
Imagen 4: Modelo de nuestro sistema a controlar	33
Imagen 5: Sistema de control en lazo cerrado	41
Imagen 6: Bucle de control de nuestro sistema a controlar	42
Imagen 7: Esquema de un controlador PID	44
Imagen 8: Modelo en simulink del controlador PID	46
Imagen 9: Sistema de control	46
Imagen 10: Representación de los dos habitáculos del vehículo sin sensor solar	56
Imagen 11: Representación de los dos habitáculos del vehículo con sensor solar	58
Imagen 1: Sensor de radiación sensor NANO-ISXX	61

1 INTRODUCCIÓN

1.1 La climatización en la conducción

A día de hoy, todos sabemos qué es la climatización de un coche, y todos la utilizamos. No podemos imaginarnos realizar un viaje en coche en verano sin el aire acondicionado del coche funcionando. Pero es mucho más que un elemento de confort, también mejora la seguridad en la conducción.

Además de crear un clima favorable en el interior del vehículo, la climatización también es capaz de eliminar olores, disminuir la humedad del aire, eliminar sustancias...

1.2 Componentes del circuito de climatización

Sin entrar en muchos detalles, definiremos los principales elementos del circuito de climatización que disponen los coches:

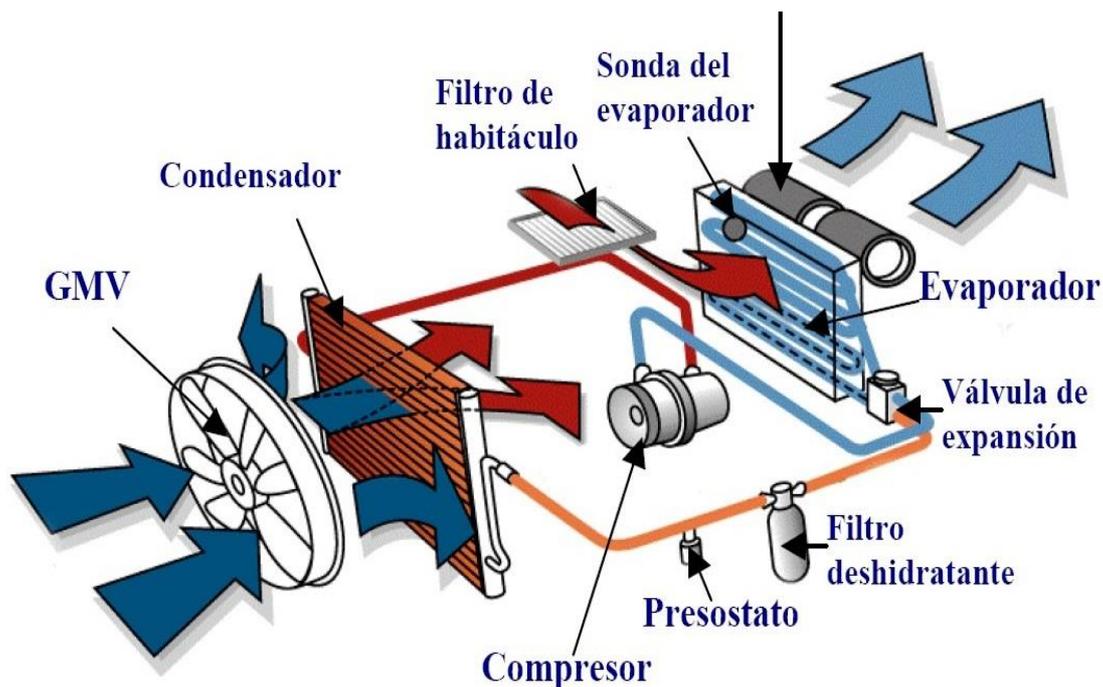


Imagen 2: Circuito de climatización

Compresor: Es el encargado de aumentar la presión del líquido refrigerante, y es impulsado por el motor del vehículo. Cuando el aire acondicionado no está activado, el motor gira una polea que no está conectada al compresor. Pero cuando activamos el botón A/C, un embrague electromagnético unirá la polea con el compresor, y activará todo el mecanismo.

Condensador: Encargado de realizar el cambio de estado del líquido refrigerante de gas a líquido. Es un radiador que es enfriado por el aire proveniente del exterior, lo que permite el mencionado cambio de estado.

Presostato: Elemento de seguridad que calcula la presión del circuito, y es capaz de cortar la alimentación

eléctrica cuando existe algún contratiempo.

Filtro deshidratador: Encargado de eliminar humedades e impurezas del líquido refrigerante, evitando la aparición de burbujas.

Válvula de expansión: Elemento que se coloca en la entrada del evaporador para controlar la expansión del fluido, y permite una rápida evaporación del gas debido a la pérdida de presión.

Evaporador: Radiador que se encarga del cambio de estado del fluido de líquido a gas.

Ventilador del habitáculo: Introduce el aire frío al interior del vehículo, a través de las rejillas de ventilación.

Termostato: Encargado de medir la temperatura del interior del vehículo para activar o desactivar el embrague que activa el circuito de climatización.

1.3 Funcionamiento del climatizador automático

La climatización en los coches ha evolucionado mucho. Hasta hace poco, solo se usaba el aire acondicionado en los vehículos: Al activar el botón A/C, el usuario es capaz de regular la temperatura del aire que entra en el vehículo, y el flujo de aire. Probablemente, algún tiempo después, tengamos que apagar el aire acondicionado o subir la temperatura del mismo, porque hará frío dentro. Otro tiempo después, lo volveremos a encender, pues volveremos a tener sensación de calor. Esto provoca una situación de ineficiencia.

Actualmente, la mayoría de los vehículos utilizan el climatizador automático. Estos son capaces de controlar todas las variables (temperatura del aire introducido en la cabina, cantidad de aire...) para conseguir un confort adecuado. Puede mezclar aire frío y caliente para proporcionar la temperatura deseada dentro del vehículo.

Conocemos lo importante y beneficioso que supone la climatización en un vehículo. Veremos ahora como funciona, a grandes rasgos:

Lo primero que haremos es establecer la temperatura deseada en la unidad de control. En el interior del vehículo disponemos de sensores, capaces de medir la temperatura del aire del interior de la cabina. Si la temperatura medida por estos no es igual a la temperatura deseada por el usuario, se activa el sistema de calefacción o el aire acondicionado para llegar a la temperatura previamente establecida.

Con este sistema, el conductor evitará distracciones configurando temperatura y flujo de salida de aire, será la unidad de control la encargada de actuar sobre las variables para obtener la temperatura deseada.

Algunos de los coches más actuales también pueden ajustar una tempera distinta para las diferentes zonas de un vehículo. Esto es capaz de hacerlo la unidad de control actuando sobre los deflectores que reparten el aire por las diferentes rejillas de ventilación. En estos casos, pueden estar funcionando calefacción y aire acondicionado a la vez.



Imagen 3: Control bizona de aire acondicionado

1.4 Efecto de la radiación del Sol. Problema a resolver

Es una situación muy conocida por todos cuando vamos viajando en el coche con el aire acondicionado encendido y, de repente, entra la radiación solar por uno de los lados del vehículo. Mientras uno de los viajeros del coche está en una situación de confort, el otro pasajero siente sensación de calor por el efecto de la radiación del Sol.

En respuesta a este fenómeno, el pasajero afectado por dicha radiación actuará aumentando el caudal de aire en su lado del vehículo, o disminuyendo la temperatura del aire (en caso de que tuviese control bizona).

A este efecto, es lo que intentaremos dar solución en este proyecto, haciendo uso de un sensor de radiación.

El objetivo de este proyecto será hacer un estudio de viabilidad sobre la inclusión de un sensor de radiación solar en el sistema microcontrolador que gestiona el aire acondicionado del coche.

La forma de realizar este estudio sería, en primer lugar, realizar un estudio previo, haciendo uso de un análisis termodinámico para comprobar la evolución de la temperatura interior de un vehículo, tanto con radiación como con aire acondicionado.

Lo siguiente sería realizar el modelado de nuestro sistema. En esta ocasión tendríamos que realizar nuestro sistema en Simulink de Matlab, ya que será la herramienta que utilizaremos para las diferentes simulaciones.

Posteriormente, pasaríamos a realizar nuestro controlador del sistema, comenzando por la elección de nuestro controlador y la sintonización de sus parámetros.

Luego realizaremos la estrategia de control del aire acondicionado incorporando un sensor de solar, y mostraremos los efectos del uso de este.

En el último capítulo, a partir de las conclusiones de los capítulos anteriores se analiza la viabilidad de incluir en el sistema controlador del aire acondicionado la información procedente de un sensor solar.

2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

2.1 Modelados / Hipótesis

Realizar las simulaciones con el modelo real es muy difícil, por lo que tendremos en cuenta varias hipótesis que nos ayudarán a perfilar nuestro modelo de estudio.

Estas hipótesis son las siguientes:

- Nuestro objeto de estudio será un coche, con dimensiones de 4 metros de largo, 2 metros de ancho y dos metros de altura.
- Los laterales del vehículo tendrán la mitad de superficie de ventanas, y mitad de superficie de la carrocería. Lo mismo sucede por la parte trasera del vehículo.
- Por la parte delantera del vehículo, al ser el espesor de la carrocería hasta llegar al interior del vehículo mucho mayor que la del cristal, solo se tiene en cuenta la entrada de calor al vehículo por el cristal delantero.
- Dividiremos el coche en dos habitáculos de las mismas dimensiones: habitáculo izquierdo y habitáculo derecho. Además, supondremos dichos habitáculos adiabáticos, no habiendo intercambio de calor entre ellos.
- El techo del coche se considera también adiabático, pues el calor y la radiación del sol afectarán por igual a ambos habitáculos del coche y no afectan para nuestro estudio.
- La pared exterior del coche está a la misma temperatura que la pared interior del coche.
- La pared interior del coche está a la misma temperatura que el interior del coche.

2.2 Evolución de la temperatura interior, sin radiación ni Aire acondicionado

Comenzaremos realizando un primer análisis termodinámico del interior de un coche considerándolo como un único habitáculo. Para ello, utilizaremos un script de Matlab, con el objetivo de saber la evolución de la temperatura del interior del coche influenciada solo por el efecto de una temperatura exterior alta.

El coche partirá de una temperatura inicial, en este caso 290 grados Kelvin (17 grados centígrados). Mientras que la temperatura en el exterior será constante, en este caso la impondremos a 330 grados Kelvin (57 grados centígrados). No es una temperatura exterior realista, pero la elegimos así para poder comprobar con notoriedad el efecto de una temperatura exterior alta en la temperatura del coche. Posteriormente, haremos el estudio completo con una temperatura más realista.

Comenzaremos definiendo el calor que se encuentra en el interior del vehículo, al que llamaremos Qint:

$$Q_{int} [J] = \text{Masa aire [kg]} * \text{Calor esp aire [J/Kg*K]} * \Delta T_{int} [K]$$

Esta fórmula, denominada como ecuación del calor, nos muestra la energía transmitida entre un objeto y su entorno, debido a la diferencia de temperatura entre ambos a lo largo del tiempo. La masa de aire a la que se refiere la ecuación es la que hay en el interior del vehículo, y el calor específico lo podemos definir como la cantidad de calor que habría que proporcionar a un objeto para aumentar 1 grado kelvin su temperatura, a una atmósfera de presión. Por otro lado, el incremento de temperatura es la diferencia de temperatura que sufre el aire del interior del vehículo.

En nuestro caso, haremos el estudio en el caso continuo del tiempo. De esta forma, ajustamos la fórmula anterior, quedando con el siguiente aspecto:

$$\text{Pint} \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = \text{Masa aire} [\text{kg}] * \text{Calor esp aire} [\text{J/K} \cdot \text{g} * \text{K}] * \frac{dT_{int}}{dt} \left[\frac{\text{K}}{\text{s}} \right]$$

Definimos así una nueva variable, Pint, como la cantidad de calor por unidad de tiempo que intercambia el aire del coche con su entorno. Debido a sus unidades es un término de potencia, por lo que nos referiremos a ella como potencia calorífica interna del vehículo.

De esta forma, relacionamos como cambia la temperatura en el interior del vehículo temporalmente.

Por otra parte, tenemos que expresar el calor que entra en el vehículo. Se presenta a continuación una representación del vehículo como un único habitáculo:

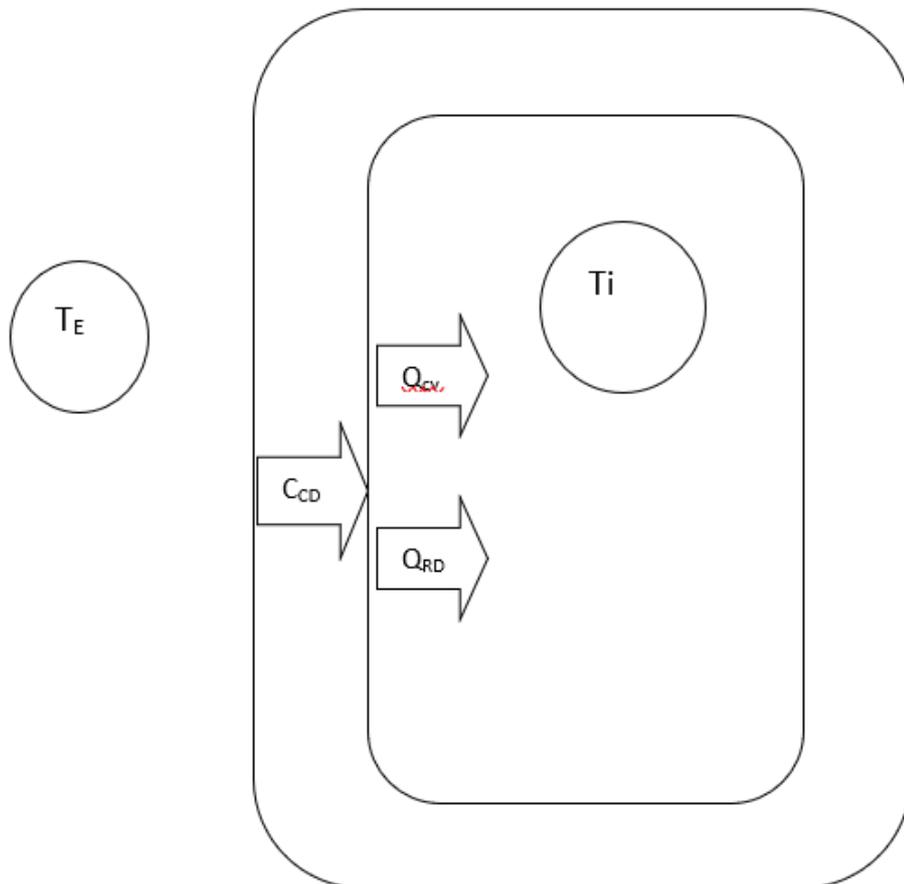


Imagen 4: Flujos de calor en el vehículo

Se muestra un esquema de los intercambios de energía que se producen entre el exterior y el vehículo. Podemos apreciar como el calor que entra al habitáculo por conducción (Q_{CD}) y por radiación (Q_{RD}) es igual al calor que entra en el interior del coche por conducción a través de la carrocería y de las lunas.

Como este primer estudio lo estamos haciendo sobre un habitáculo de un único comportamiento, el calor que entra en el vehículo será la suma de los calores de conducción que entra por ambos laterales del mismo, por la parte delantera y por la trasera.

De esta forma, vemos como el calor que entra desde el exterior, debido a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del coche, se puede resumir como un único flujo de calor por conducción. Pasaremos a continuación a definir el concepto de calor por conducción.

Se define la transferencia del calor por conducción como un proceso de transmisión de calor de dos cuerpos en contacto debido a su diferencia de temperaturas, fluyendo el calor desde el cuerpo de mayor temperatura al de menos temperatura. Este proceso sigue la siguiente ecuación matemática:

$$Q_{CD} \left(\frac{J}{s} \right) = \frac{\Delta T(K) * K \left(\frac{J}{s * K * m} \right) * A(m^2)}{e(m)}$$

Siendo ΔT la diferencia entre las diferentes superficies en las que se transmite el calor, K la conductividad térmica del material, A el área del objeto y e el espesor del mismo. El término Q_{CD} hace referencia al calor de conducción transferido por unidad de tiempo.

Para la implementación de la siguiente ecuación se usa la hipótesis de que la pared exterior está a la misma temperatura que el exterior (T_E) y que la pared interior está a la temperatura del interior del vehículo (T_i).

Otras hipótesis usadas para esta simulación son:

- Por los laterales del vehículo, el área por la cual incide el calor se divide en dos partes iguales (lunas y carrocería).
- Por la parte trasera pasa lo mismo que en las partes laterales del vehículo, despreciando la existencia del maletero del coche.
- Por la parte delantera del vehículo, el calor solo incide por la luna frontal, pues el espesor de la carrocería es demasiado grande, que el cociente se desprecia.

Una vez definidos los dos términos de la ecuación, podemos pasar al siguiente paso: igualar el calor del interior del vehículo con el calor que incide en el vehículo en forma de conducción.

Una vez definidos los dos términos de la ecuación, podemos pasar al siguiente paso: igualar el calor que entra al interior del vehículo con el calor que por conducción entrante por ventanas y carrocería por unidad de tiempo.

$$P_{int} \left(\frac{J}{s} \right) = Q_{CD} \left(\frac{J}{s} \right)$$

Una vez realizado este análisis termodinámico, realizaremos una simulación en Matlab para observar el comportamiento de la temperatura interior de nuestro vehículo. Los valores tomados para esta simulación son los siguientes:

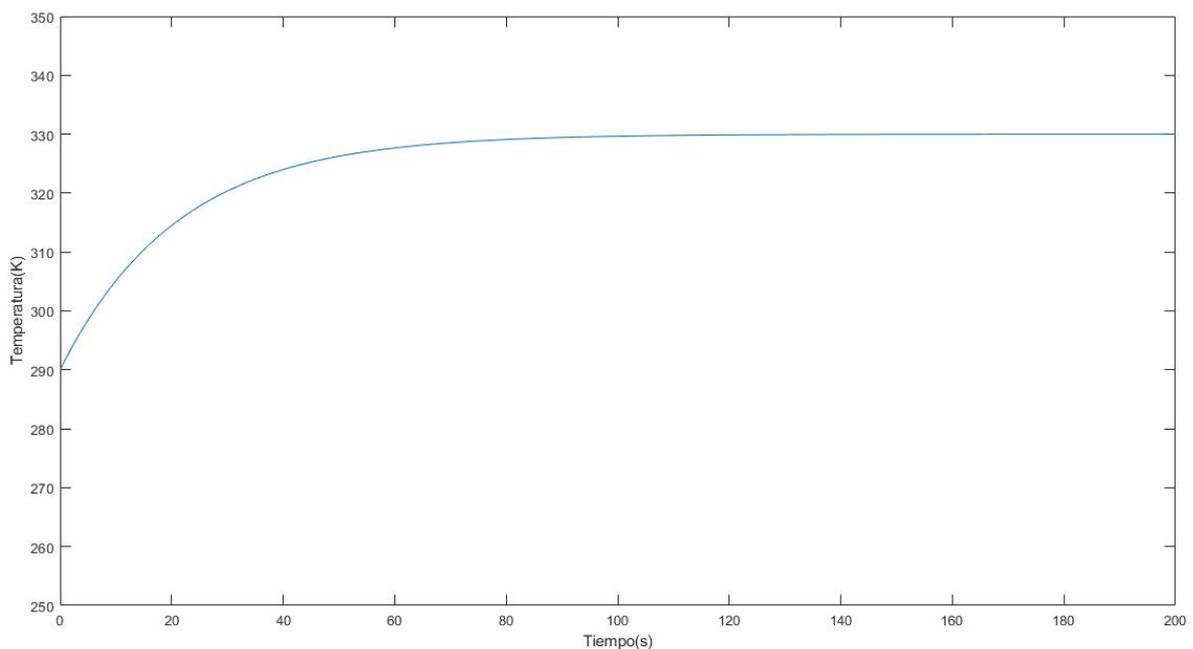
- Dimensiones del coche: 4 x 2 x 2 (m). Corresponden a longitud, altura y anchura, respectivamente.
- Masa de aire = longitud x altura x anchura x densidad aire = 19.2 kg.
- Calor específico aire = 1000 J/Kg*K.
- Temperatura exterior = 330 K.
- Conductividad térmica de la carrocería = 2.53 W/m2*K
- Conductividad térmica de las lunas = 5.12 W/m2*K
- Espesor de la carrocería = 10 cm
- Espesor de las lunas = 2 cm

Pasamos ahora a resolver la ecuación con los valores definidos, resultando la siguiente evolución temporal de la temperatura interior:

$$T_{int} = (T_e - \exp(-(921*t)/(c_{e_aire}*m_{a_aire})))*(T_e - 290))$$

Siendo T_e la temperatura del exterior.

Realizamos a continuación una simulación en MATLAB:



Gráfica 1: Evolución de la temperatura de un coche

Como podemos apreciar, la temperatura del interior del vehículo evoluciona hasta igualar la temperatura exterior (330 K). Si lo pensamos, al dejar nuestro coche al Sol, irá subiendo la temperatura del interior hasta mantenerse constante a una temperatura, al igual que nos muestra la gráfica anterior.

Esto lo podemos fundamentar con la ley de enfriamiento de Newton, que enuncia que, debido a la diferencia de temperatura entre un cuerpo y su entorno, existe un calor transferido por unidad de tiempo hacia el cuerpo aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos. Desarrollando esta idea, se obtiene la ley de enfriamiento como:

$$T = T_A + (T_0 - T_A) * e^{-k*t}$$

Siendo T la temperatura del cuerpo en estudio, T₀ su temperatura inicial, T_A la temperatura del ambiente y K el factor de proporcionalidad.

2.3 Efecto de la radiación del Sol en la temperatura de un vehículo

El siguiente paso será introducir la radiación procedente del Sol.

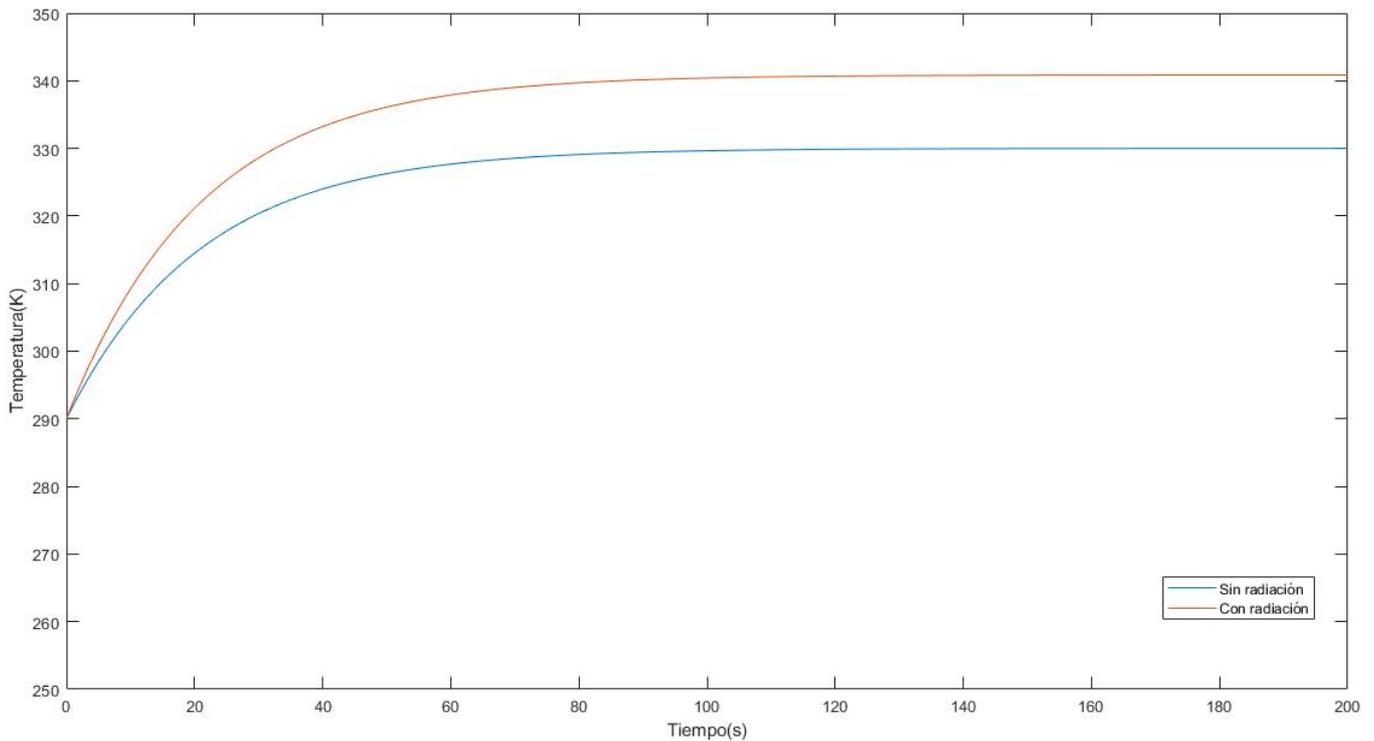
El Sol actuará como una nueva fuente de calor entrante al interior del vehículo. De este modo, la temperatura del interior del coche pasado un tiempo no será la temperatura exterior, sino que habrá un aumento de la misma debido a la radiación del Sol.

Termodinámicamente hablando, esto lo podríamos expresar añadiendo un término constante que represente el calor aportado por el Sol en la ecuación desarrollada anteriormente. De esta forma, la suma de los calores de conducción y de radiación será igual al calor aportado al interior del vehículo:

$$P_{int} \left(\frac{J}{s}\right) = Q_{CD} \left(\frac{J}{s}\right) + Q_{RD} \left(\frac{J}{s}\right)$$

Pasaremos a realizar una simulación para comprobar si sube la temperatura del interior. Para ello, supondremos un calor de radiación de 10.000 W. Es un valor demasiado alto como para ser real, pero nos servirá para realizar un análisis cualitativo de lo que sucede.

Según el Atlas de Radiación Solar de la Agencia Española de Meteorología entre los años, las ciudades Santa Cruz de Tenerife, Almería y Cádiz son las ciudades españolas que representan una mayor radiación solar media, con 5.4, 5.29 y 5.26 KWh/m² respectivamente.



Gráfica 2: Evolución de la temperatura con radiación y sin radiación

En la gráfica anterior se muestra la temperatura del interior del coche, sin radiación (curva azul) y con radiación (curva roja). Observamos como sin radiación, la temperatura del coche se estabiliza a la temperatura del exterior, unos 330 grados Kelvin, mientras que con radiación, esta aumenta en unos 10 grados la temperatura del interior. La velocidad de crecimiento de ambas curvas es la misma debido a que la función exponencial es la misma, añadiendo un término constante que sube la gráfica en el eje y, debido a término de la radiación.

2.4 Efecto de la climatización en la evolución de la temperatura.

Activaremos ahora el aire acondicionado del coche. Esto provocará una entrada de aire a menor temperatura por las rejillas de ventilación del vehículo, lo que hará reducir la temperatura de la cabina.

Como sabemos, un coche no está cerrado herméticamente, sino que hay entrada y salida de aire, de forma que la presión en el interior se mantiene relativamente constante.

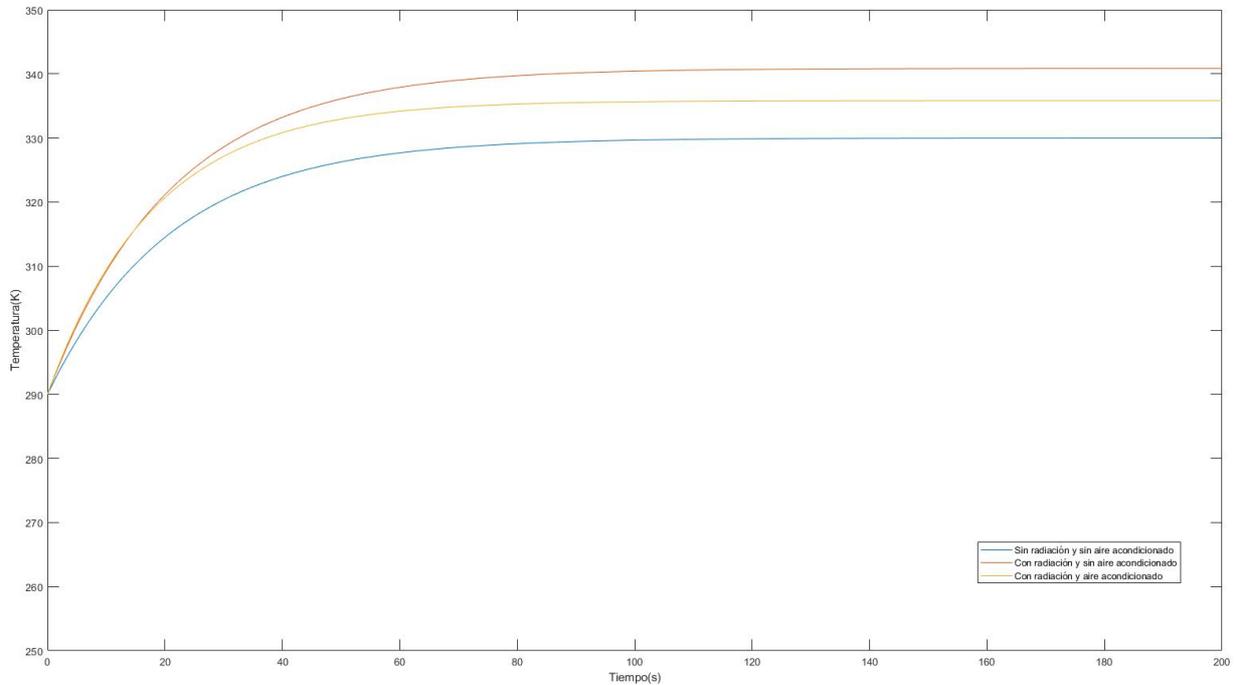
Visto lo cual, se introducirá en el interior del vehículo un caudal de aire a baja temperatura (15 grados centígrados, 288 K). Por lo comentado con anterioridad, también saldrá de la cabina del vehículo una cantidad de aire. En los coches, esto suele ocurrir por la parte trasera del vehículo, mediante unas rejillas de ventilación que suelen tener en el maletero del coche.

Pero a lo que a nuestro primer experimento respecta, nos centraremos en introducir un caudal de aire contante (caudal y temperatura constante), que representa el aire acondicionado del coche. Volviendo a nuestra ecuación de estudio, lo introducimos por ahora como un valor fijo, empezando en el caso de un valor de 5.000 W.

$$P_{int} \left(\frac{J}{s} \right) = Q_{CD} \left(\frac{J}{s} \right) + Q_{RD} \left(\frac{J}{s} \right) - Q_{AC} \left(\frac{J}{s} \right)$$

Donde el término QAC es el que caudal de aire que entra en el interior del vehículo.

Haciendo una representación de los tres apartados anteriores, obtenemos lo siguiente:

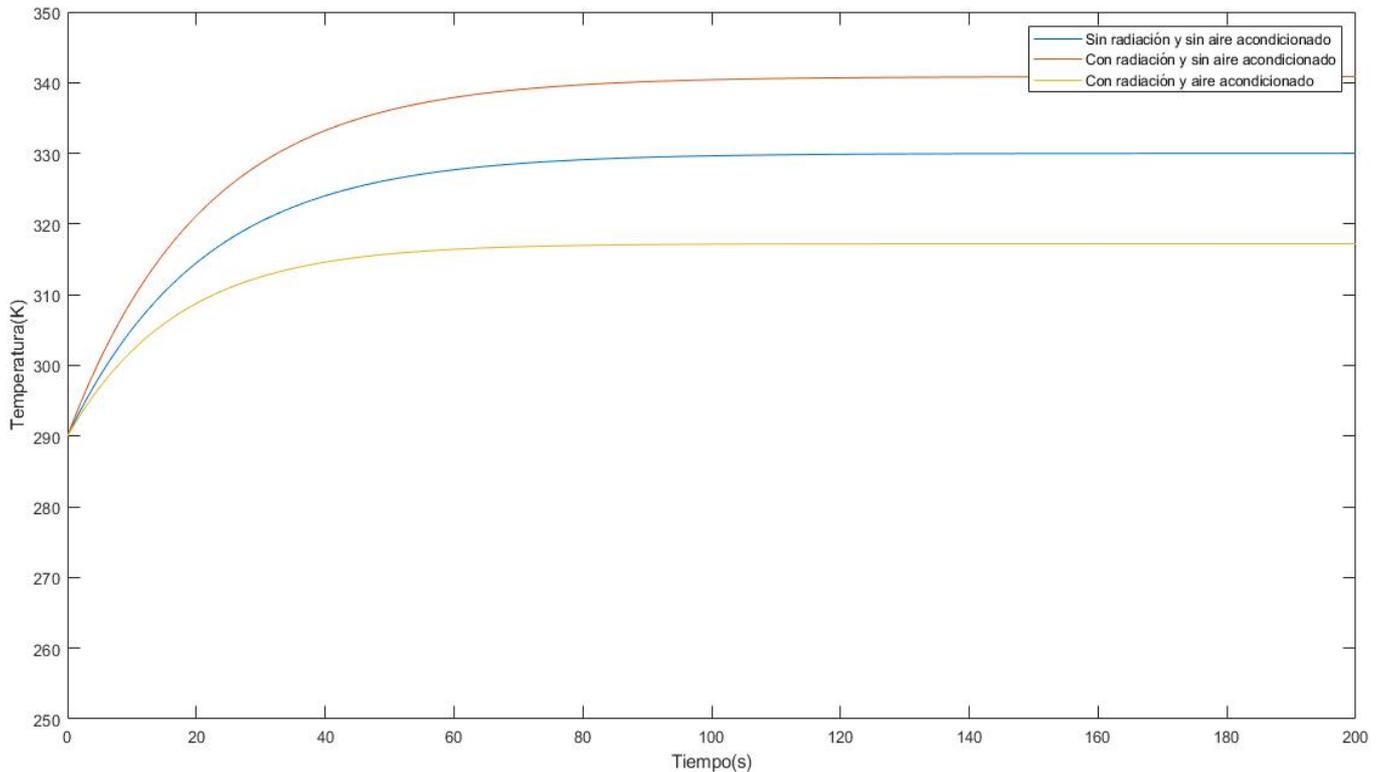


Gráfica 3: Evolución de la temperatura con y sin radiación, y con aire acondicionado a baja potencia

De nuevo, observamos las dos ecuaciones mencionadas anteriormente. La curva azul que presentaba la evolución de la temperatura interior del coche sin radiación, y la azul, que representaba la evolución de la temperatura con radiación. En esta última gráfica se añade la evolución de dicha temperatura con el efecto del aire acondicionado del vehículo.

Como podemos apreciar, el efecto del aire acondicionado logra bajar la temperatura que teníamos. En cambio, el efecto que produce la radiación es mayor, por lo que, con la temperatura y el caudal del aire que hemos utiliza no podemos paliar el efecto del Sol sobre el interior de la cabina.

Visto que no hemos podido paliar el efecto del Sol, lo que tendremos que hacer es aumentar la cantidad de calor que sale del interior del vehículo debido al AC. En nuestra ecuación, es tan fácil como aumentar el QAC a un valor mayor de 10.000 W, que es lo que introduce en nuestro caso la radiación del Sol.



Gráfica 4: Evolución de la temperatura con y sin radiación, y con aire acondicionado a alta potencia

Vemos una representación de lo mencionado anteriormente, con un valor de QAC de 15.000 W. El aire acondicionado puede ahora contrarrestar el efecto de la radiación llegando a bajar incluso la temperatura respecto al valor sin radiación. Por lo que podemos sacar de conclusión que, para bajar la temperatura del interior del vehículo en nuestro experimento, bastaría con extraer más calor del interior del coche del que entra por radiación.

Este hecho lo podríamos llevar a la vida real de dos formas: bajando la temperatura del aire acondicionado, o subiendo el caudal que entra en el interior del vehículo. De ambas formas aumentaría los Watios extraídos del interior del coche, y se traduciría a una disminución de la temperatura interior del vehículo.

Esto es equivalente a tener un control manual del aire acondicionado. Es decir, son los propios pasajeros quienes tendrán que ajustar la potencia del ventilador (aumentar el caudal de aire acondicionado) o disminuir la temperatura del aire frío para conseguir el efecto deseado. No establecemos una temperatura de referencia para que el sistema evolucione hasta ella, sino que son los pasajeros los que accionan sobre el sistema manualmente para llegar hasta esa temperatura, lo que corresponde con un sistema en bucle abierto.

Los sistemas de lazo abierto se basan en cambiar el valor de salida sin tener en cuenta el propio valor de la salida para modificar la acción de control, es decir, no se retroalimentan. Mientras que los sistemas de lazo cerrado tienen en cuenta el valor de la salida para ejercer el control del sistema, por retroalimentación.

3 MODELADO DEL SISTEMA

3.1 Ecuación termodinámica

Una vez realizado un estudio previo sobre el comportamiento de los diferentes fenómenos termodinámicos que se van a dar en el vehículo, pasaremos a modelar el sistema completo. Para ello, haremos uso de SIMULINK de Matlab para desarrollar nuestro sistema, lo que nos proporcionará una visión más específica de nuestro comportamiento del siguiente.

La ecuación a desarrollar es la desarrollada anteriormente:

$$P_{int} \left(\frac{J}{s} \right) = Q_{CD} \left(\frac{J}{s} \right) + Q_{RD} \left(\frac{J}{s} \right) - Q_{AC} \left(\frac{J}{s} \right)$$

En primer lugar, pasaremos a desarrollar el término QAC, el cual ya habíamos mencionado la existencia de un término en nuestra fórmula termodinámica, que representaba el calor extraído del interior del vehículo debido a la entrada de aire frío (QAC). Le habíamos dado un valor constante, pero ahora pasaremos a desarrollar este término.

Como hemos dicho, esto representa el aire acondicionado que entra en el interior del vehículo, y esto no es más que un caudal de aire a menor temperatura que la que hay en el interior, con el objetivo de disminuir así la temperatura del coche. Por lo que, nuestro término del calor extraído por el aire acondicionado lo podemos definir de la siguiente manera:

$$Q_{AC} \left(\frac{J}{s} \right) = \rho * Q_{FRIO} * C_{ESP} * (T_{INT} - T_{FRIA})$$

Siendo ρ la densidad del aire ($\frac{Kg}{m^3}$), Q_{FRIO} el caudal de aire frío que entra por las rejillas de ventilación hasta el interior del vehículo ($\frac{m^3}{s}$), C_{ESP} el calor específico del aire ($\frac{J}{Kg * ^\circ C}$) y el término $(T_{FRIA} - T_{INT})$ representa la diferencia de temperaturas (en $^\circ C$) entre el aire frío y la temperatura interior del vehículo.

Por otro lado, el caso de la potencia calorífica del interior ya lo presentamos con anterioridad, con la única salvedad que ahora sustuiremos la masa del interior del vehículo por el producto del volumen por la densidad, ya que es más fácil hallar el volumen de aire del interior que la masa de aire.

$$P_{int} \left(\frac{J}{s} \right) = \rho * V * C_{ESP} * \frac{dT_{int}}{dt}$$

Continuamos ahora a desarrollar el término del calor de conducción. Como vimos antes, se define de la siguiente forma:

$$Q_{CD} \left(\frac{J}{s} \right) = \frac{\Delta T (K) * K \left(\frac{J}{s * ^\circ C * m} \right) * A (m^2)}{e (m)}$$

Siendo ΔT la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior del vehículo (por la hipótesis definida anteriormente que decía que la temperatura exterior era la misma que la de la pared exterior del

crystal/carrocería, igual que con la temperatura interior), e el espesor del cristal y de carrocería, y A el área en que intercambian calor los dos cuerpos.

Definido esto, podemos apreciar que tenemos dos materiales distintos, con distinto espesor, que intercambian calor, aunque con la misma temperatura. Desarrollando esto, obtenemos:

$$Q_{CD} \left(\frac{J}{s} \right) = \frac{K_{CRISTAL}}{e_{cristal}} * \frac{K_{CRISTAL}}{e_{cristal}} * A * \Delta T$$

Siendo $\Delta T = T_{ext} - T_{int}$.

Para simplificar, posteriormente uniremos los términos constantes de la anterior ecuación $\left(\frac{K_{CRISTAL}}{e_{cristal}} * \frac{K_{CRISTAL}}{e_{cristal}} * A \right)$, y le llamaremos K_{CD} .

$$Q_{CD} \left(\frac{J}{s} \right) = K_{CD} * \Delta T = K_{CD} * (T_{ext} - T_{int})$$

El último de los términos que nos queda por definir es el calor de radiación, al que para la primera simulación dimos un valor constante. Pues a posterior, este calor seguirá siendo un término constante, pues consideramos que el Sol siempre da la misma radiación al coche.

Agrupando todos los términos y simplificando, nuestra ecuación a representar en Simulink es la siguiente:

$$\rho * V * C_{ESP} * \frac{dT_{int}}{dt} = K_{CD} * (T_{ext} - T_{int}) + \rho * Q_{FRIO} * C_{ESP} * (T_{FRIO} - T_{INT}) + Q_{RD}$$

En esta ecuación todos los valores serán constantes, excepto la temperatura interior, que a cada instante tendrá un valor diferente, el caudal de aire frío y la temperatura del aire frío, pues serán las dos posibles variables que nos harán modificar la temperatura del interior del vehículo, y la derivada de la temperatura interior. Esta última será la que intentaremos aislar de la ecuación, dándole para cada instante un valor de la temperatura interior, y al integrarla, tendremos el valor de la temperatura interior del vehículo para cada instante temporal.

3.2 Parámetros de la simulación

Una vez explicada la ecuación que regula nuestro sistema, pasaremos a darle valores para hacer la simulación. Muchos valores están explicados anteriormente, pero los volveremos a nombrar y a darle su valor impuesto.

- ρ : densidad del aire a presión atmosférica y a 25 °C. El valor es de $1.225 \frac{Kg}{m^3}$.
- V: volumen de aire existente en cada habitáculo del coche. Al tener dimensiones 4 x 2 x 2 m como dijimos anteriormente, el habitáculo completo tendrá 16 m³. Dividiremos el coche en dos habitáculos, por lo que cada uno tendrá un volumen de 8 m³.
- CESP: el calor específico del aire se define como la cantidad necesaria que hay que aportar al aire para aumentar en un grado su temperatura, a presión atmosférica. El valor del calor específico del aire

será de $1.000 \frac{J}{Kg \cdot K}$.

- Text: la temperatura en el exterior del vehículo se podrá modificar dependiendo de cada simulación. Por lo general, será un valor que ronda los 30 grados centígrados.
- Qfrio: caudal del chorro de aire acondicionado. Será una de las dos variables que podremos controlar para disminuir la temperatura del vehículo.
- Tfria: temperatura del chorro del aire acondicionado. Es la otra de las variables que será manipulada para disminuir la temperatura del vehículo.
- Qrad: calor que aporta el Sol al interior del vehículo, lo que afectará como una subida de temperatura si no se toma ninguna medida. Tendrá un valor de $100 \frac{J}{s}$.

3.3. Modelo en Simulink

Una vez definida la ecuación y los valores de cada término, pasaremos a realizar el modelo del sistema en Simulink de Matlab

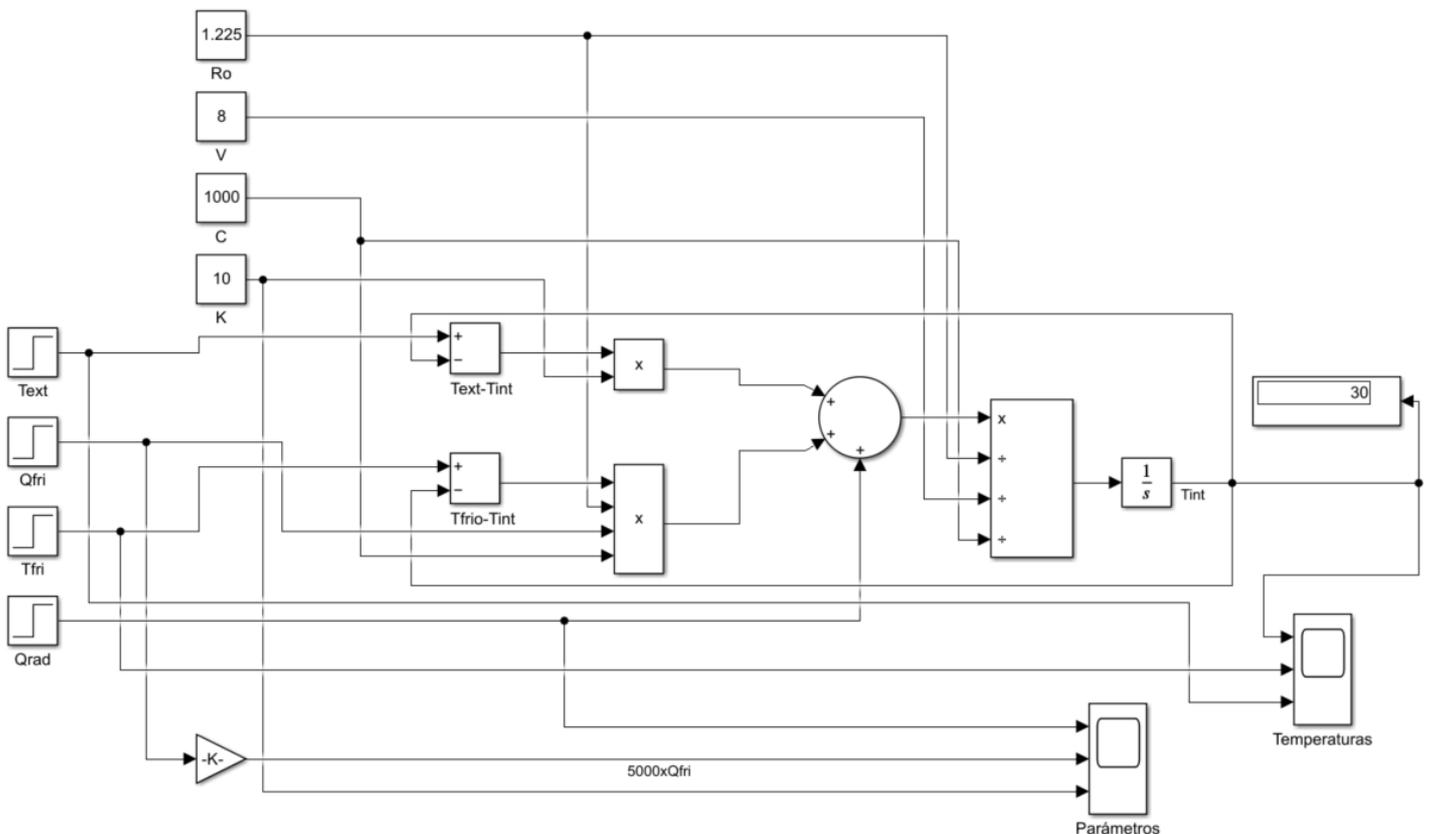


Imagen 5: Modelo del sistema termodinámico correspondiente al habitáculo del vehículo

Debemos tener en cuenta que la ecuación buscamos desarrollar en simulink, como vimos en la sección 3., es la siguiente:

$$\rho * V * C_{ESP} * \frac{dT_{int}}{dt} = K_{CD} * (Text - T_{int}) + \rho * Q_{FRIO} * C_{ESP} * (T_{FRIA} - T_{INT}) + Q_{RD}$$

Despejando el término $\frac{dT_{int}}{dt}$, la ecuación anterior quedaría como:

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{K_{CD} * (Text - T_{int}) + \rho * Q_{FRIO} * C_{ESP} * (T_{FRIA} - T_{INT}) + Q_{RD}}{\rho * V * C_{ESP}}$$

Esto lo hemos hecho en simulink mediante diagrama de bloques, donde vemos que la estructura principal del sistema es un bloque multiplicador, donde el término del numerador entra como factor, y tres entradas del sistema (V, Ro, C, correspondientes a volumen, densidad y calor específico, respectivamente) entran dividiendo en el bloque. Anteriormente, el valor que entra como factor en el bloque mencionado, se compone de tres sumandos, unidos mediante un bloque sumador.

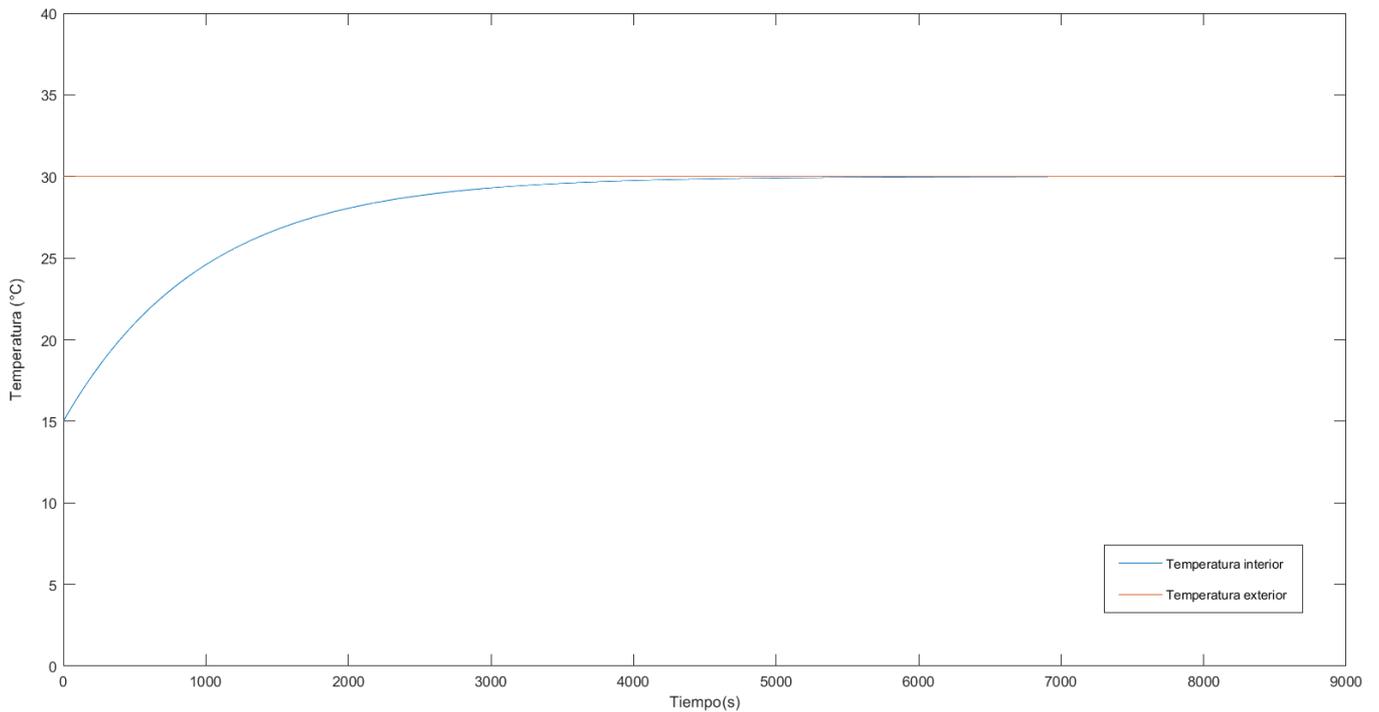
Las entradas del sistema serían Ro (densidad del aire), V (volumen del aire), C (calor específico del aire), Text (Temperatura del exterior del vehículo), Qfri (Caudal de aire acondicionado), Tfri (Temperatura del aire acondicionado), y Qrad (calor de radiación entrante en el vehículo).

Como salida del sistema encontramos Tint, la temperatura interior del vehículo. Esta se obtiene con un bloque integrador para integral el valor $\frac{dT_{int}}{dt}$.

Se incluye también dos bloques Scope, para poder ver la representación de los valores en gráficas, y un bloque Display donde se muestra el valor de la temperatura interior después de cada simulación. En la imagen 4 podemos ver como se muestra el valor de 30 grados.

A partir de este sistema haremos nuestras simulaciones. La primera de ellas será como en el estudio previo hecho con anterioridad en la sección 2.2: no existirá radiación entrando en el coche y el aire acondicionado estará desactivado, por lo que tendremos únicamente la evolución de la temperatura exterior promovida por la mayor temperatura exterior que hay en el exterior.

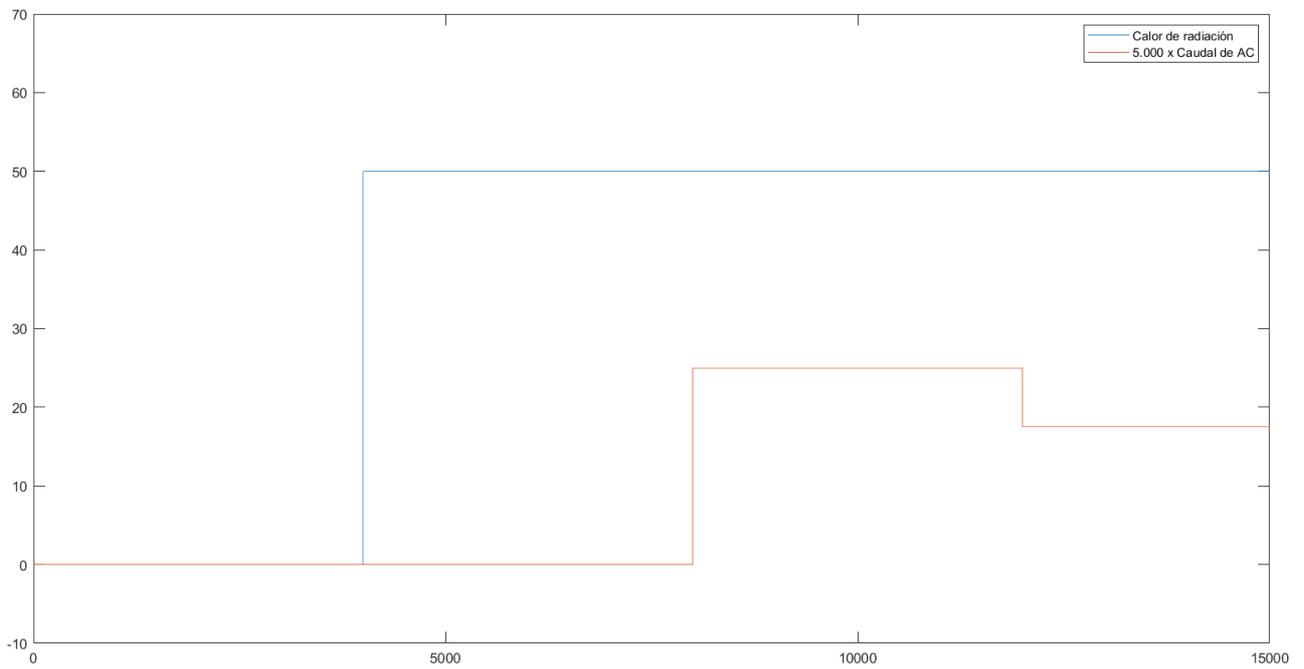
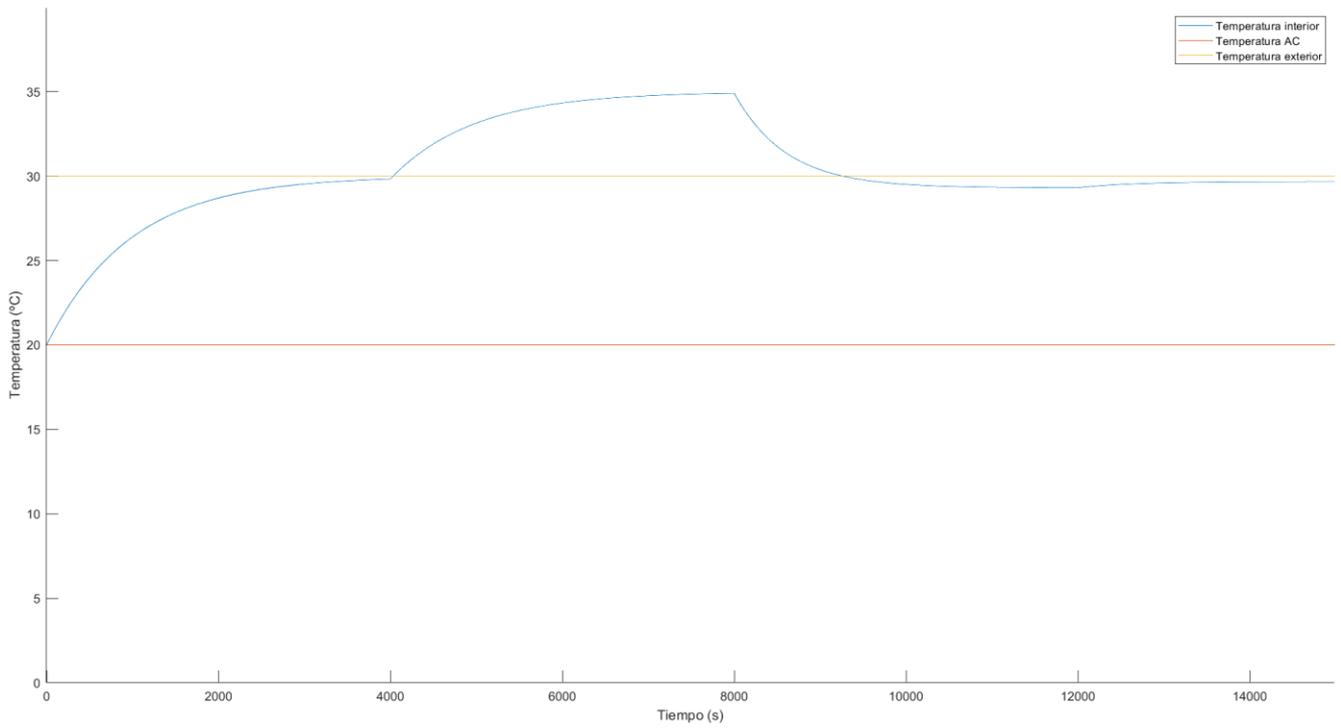
Esto equivale a poner la función escalón de la Qrad a 0, e igual para la Qfri. La temperatura en este caso del aire frío no importa el valor que tenga, ya que el término del aire acondicionado se anulará por ser cero el caudal de aire que está entrando el vehículo.



Gráfica 5: Evolución de la temperatura sin radiación ni aire acondicionado

Como se puede comprobar en la gráfica, la temperatura del interior del vehículo varía de forma exponencial, incrementándose desde su valor inicial hasta alcanzar la misma temperatura del exterior, lo que ocurre en un tiempo característico de unos 3.000 segundos (50 minutos). Nuestro sistema en Matlab presenta el mismo resultado que el obtenido en el estudio previo, realizado en la sección 2.2.

Introducimos a continuación un valor de radiación distinta de cero, y encenderemos el aire acondicionado, que para este primer caso tendrá temperatura y caudal de aire constante.



Gráficas 6 y 7: Evolución de la temperatura con temperatura del aire acondicionado constante

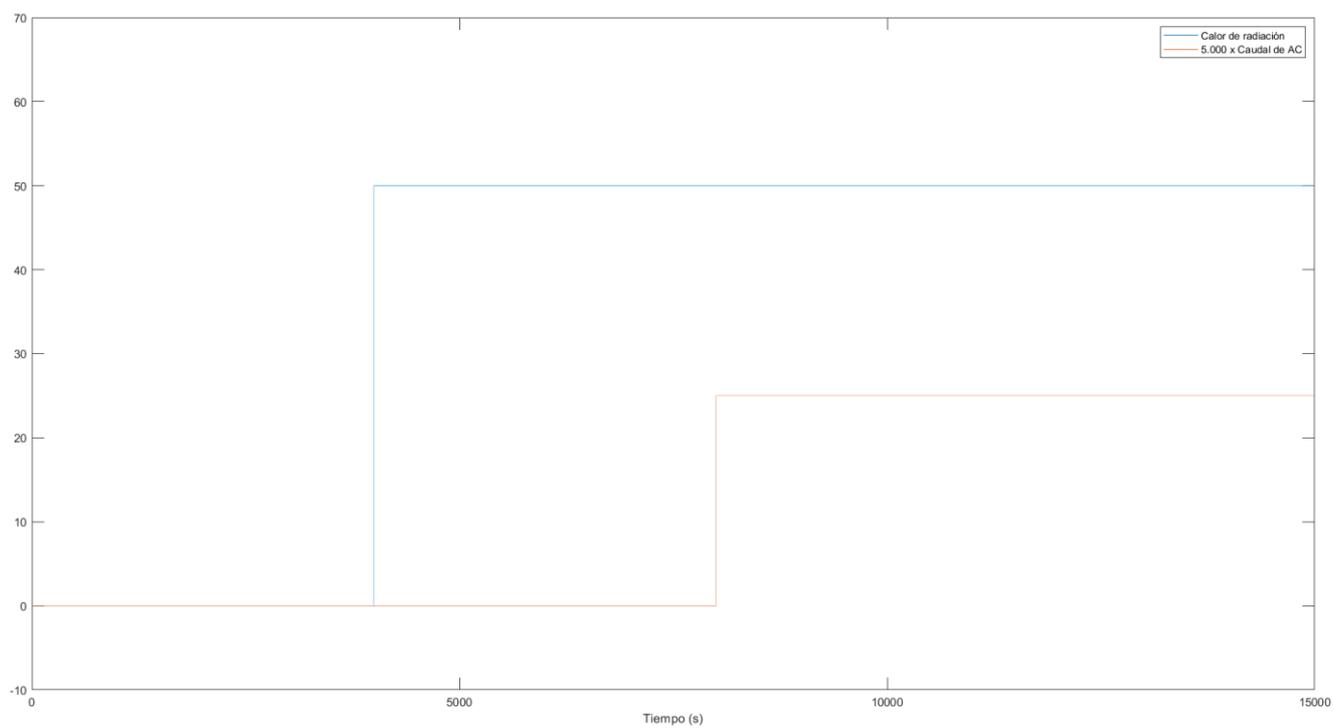
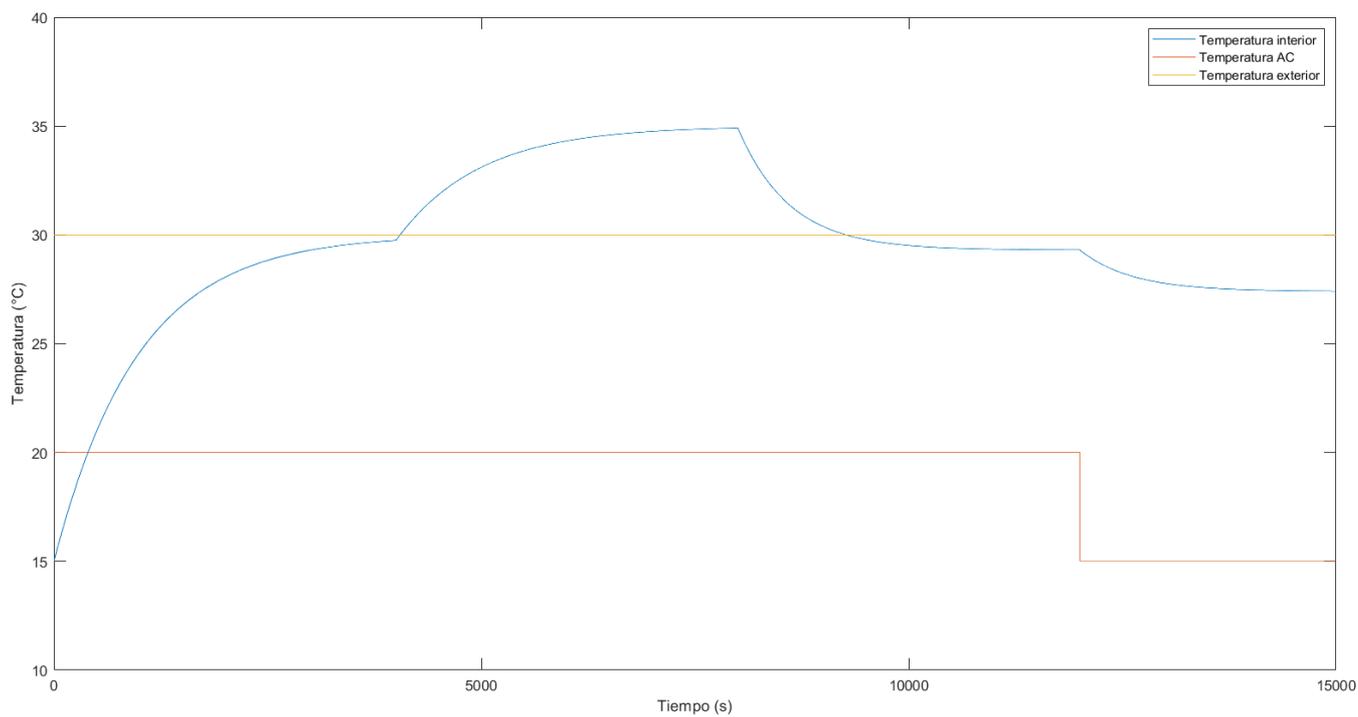
Observando las dos gráficas, podemos ver como al principio el aire acondicionado está apagado y el calor de radiación es cero. Nos encontramos hasta este momento en el caso anterior, en el que la temperatura interior del coche (que inicialmente se encuentra a 15 grados centígrados) evolucionará hasta la temperatura exterior, en este caso a 30 grados centígrados

A partir del segundo 4.000, entra en juego un calor de radiación de 50 J/s, como se puede apreciar en la segunda gráfica. Es en este momento cuando comienza a subir la temperatura del interior del coche debido al efecto provocado por el Sol, hasta estabilizarse en unos 33 grados centígrados.

Es entonces, a los 8.000 segundos, cuando decidimos encender el aire acondicionado, en este caso con una temperatura constante de 20 grados centígrados y con un caudal de 0.005 m³, haciendo bajar la temperatura del coche por debajo de los 30 grados de la temperatura exterior, a unos 28 grados aproximadamente.

La siguiente subida de temperatura, a partir del segundo 1.200 de simulación, viene provocada por el efecto de una bajada de la cantidad de aire expulsado por el aire acondicionado, lo cual se realiza a modo de prueba para comprobar que nuestro sistema funciona de manera correcta. El caudal pasa de 0.05 a 0.04 m³.

De la misma manera, comprobaremos ahora el funcionamiento de nuestro sistema dejando constante el caudal de aire frío. Es decir, con un caudal de aire acondicionado constante, regularemos la temperatura del mismo para ver las consecuencias de la temperatura interior. Según nuestra fórmula termodinámica, al subir la temperatura del aire frío debería subir la temperatura del interior, y al bajarla, debería descender la temperatura del coche (como es lógico que pasara en la realidad).



Gráficas 8 y 9: Evolución de la temperatura con caudal de aire acondicionado constante

En este caso, vemos como el aire acondicionado comienza estando apagado (el caudal de aire acondicionado es 0). La temperatura interior empieza en 15 grados, mientras que la temperatura exterior es de 30 grados. Hasta el segundo 4.000 no hay radiación, por lo que la temperatura interior evoluciona exponencialmente hasta la temperatura exterior.

A partir del segundo 5.000 entra radiación en el automóvil, por lo que aumenta la temperatura del interior hasta los 35 grados. Es entonces cuando se enciende el aire acondicionado, con un caudal constante de 0.005 m³, por lo que empieza a bajar la temperatura del interior del vehículo, hasta llegar a los 29 grados aproximadamente.

En el segundo 12.000 se baja la temperatura del aire acondicionado, por lo que baja la temperatura del interior del vehículo, hasta unos 27 grados.

Vistos estos dos ejemplos, podemos sacar como conclusión que, al bajar la temperatura del aire acondicionado, baja la temperatura del aire interior del coche, el cual es nuestro objetivo. Pero en este proyecto buscamos conseguir un aire acondicionado práctico, el cual sea capaz de obtener la temperatura interior deseada, y no tener que ir modificando manualmente la temperatura del aire frío para regular la temperatura del interior. Es por ello que realizaremos un sistema de control para obtener dicha temperatura deseada.

4 CONTROL DE LA TEMPERATURA INTERIOR

4.1 Concepto de control del sistema

Una vez obtenido un modelo termodinámico que actúe de forma razonablemente parecida a la realidad, continuaremos abordando el control de nuestro sistema.

Un sistema de control lo podemos definir como un conjunto de dispositivos que son capaces de regular el comportamiento de un sistema, y hay dos grandes tipos: sistemas de lazo abierto (la salida del sistema no tiene repercusión en la entrada del mismo) y sistemas de lazo cerrado (el conocimiento de la salida proporciona información a la entrada que repercute posteriormente en la salida del sistema).

Podríamos pensar en hacer el sistema en bucle abierto, pero de este modo el sistema no actuaría a perturbaciones tales como un cambio en la temperatura del exterior o una subida de la radiación, por lo que no nos serviría.

Utilizaremos entonces un sistema en lazo cerrado, que tiene el siguiente esquema:

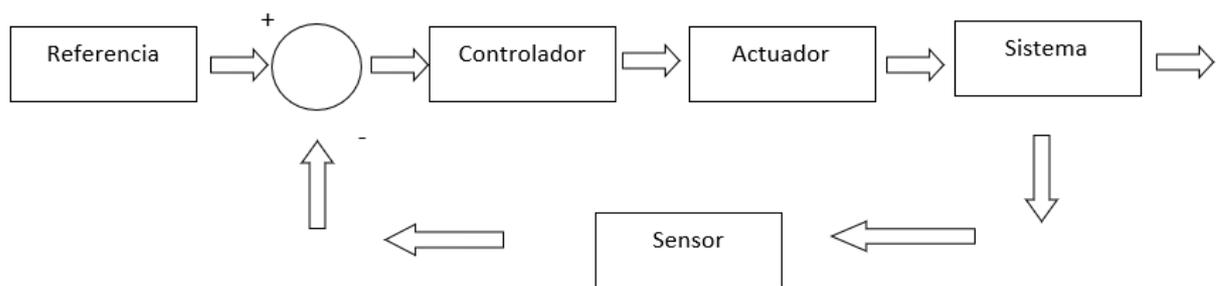


Imagen 6: Sistema de control en lazo cerrado

Como funciona en los coches de la actualidad, lo que queremos es decirle a nuestro coche una temperatura deseada en el interior del vehículo (referencia).

El valor de salida de nuestro sistema será la temperatura en el interior del vehículo, que se conocerá a partir de un sensor que la estará midiendo cada instante.

Una vez conocida la temperatura en un instante y la temperatura de referencia, el comparador se encargará de ver la diferencia entre ambas magnitudes, y le dará esta información al controlador.

El controlador será el encargado de convertir esta diferencia en una señal que le pasa al actuador (el aire acondicionado), la cual consiga que el sistema se acerque a la temperatura de referencia.

Representándolo como un bucle más cercano a lo que sería nuestro estudio:

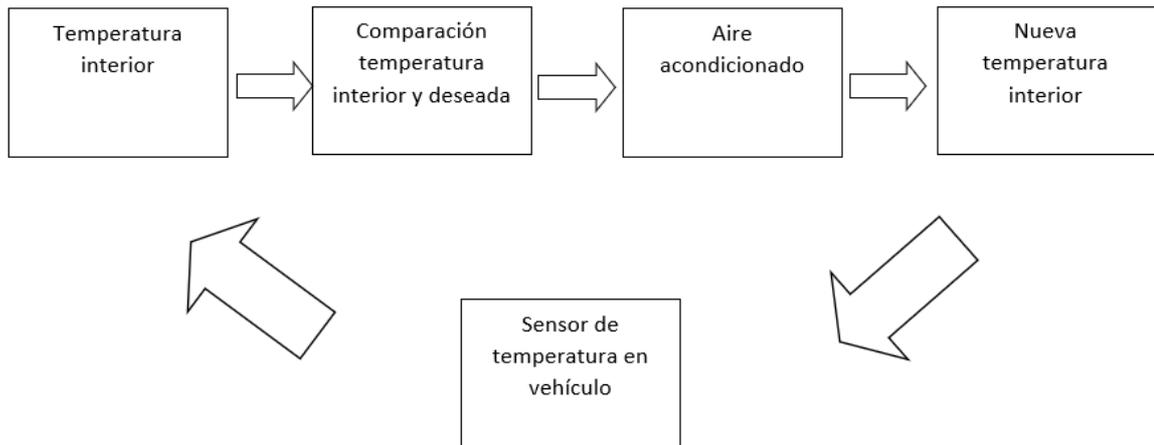


Imagen 7: Bucle de control de nuestro sistema a controlar

Para el control de nuestro sistema, tenemos tres opciones de proceder.

La primera forma sería dejar la temperatura del aire frío constante, y variar el caudal de aire frío para bajar la temperatura del interior. Esta será la forma que elegiremos para nuestro controlador.

La segunda forma sería hacerlo de la forma contraria: mantener constante el caudal de aire que entra en el vehículo y variar la temperatura del aire.

La última forma sería compaginar ambas opciones: bajar la temperatura del aire a la vez que baja el caudal introducido. Esta forma la descartaremos por ser la más compleja, y para llegar a nuestro objetivo, que sería estudiar el efecto de la radiación en el coche, no tenemos por qué proceder de la forma más compleja.

4.2 Elección del controlador

Para la modificación de los parámetros de entrada al sistema, tendremos que elegir un controlador. Veremos a continuación algunas opciones:

- Control Bang-Bang

Control todo o nada. Es el sistema de control más básico, y consiste en la activación o desactivación completa dependiendo de la diferencia entre la referencia y el valor de salida del sistema. En nuestro caso, sería encender el aire acondicionado a su máxima capacidad (el mayor caudal que puede expulsar) o al caudal mínimo (en este caso sería apagado).

Esta no sería la mejor opción, pues aunque el interior del coche llegase a la temperatura deseada, en ese momento el aire acondicionado se apagaría, y volvería a encenderse cuando bajase un poco de esa temperatura.

Una posible solución ante esto sería realizarlo con una banda de temperatura manteniéndola como márgenes. Es decir, si la temperatura deseada es 20 grados, el aire acondicionado estaría encendido hasta llegar a 18 grados y se mantendría apagado hasta llegar a los 22 grados, lo que provocaría un menor gasto energético.

- Control lineal

Consistiría en mantener una linealidad entre la salida y la entrada del sistema. En nuestro caso, sería mantener una proporcionalidad entre la temperatura del interior del vehículo y la cantidad de aire frío introducida en el interior.

Como vimos en la sección 2.2, la evolución de la temperatura interior es exponencial, por lo que este tipo de control, a pesar de ser muy simple, no nos resulta muy útil, por lo que buscaremos otra opción para el diseño de nuestro controlador.

- Control PID

Controlador proporcional, integral y derivativo. Se trata de un sistema de control que por realimentación permite controlar las variables de un proceso, y es el más utilizado en la realidad en muchos procesos industriales. Por lo tanto, es el que utilizaremos para realizar el control a nuestro sistema.

Este modelo de control se compone de tres tipos de controladores, cada uno de los cuales ejercen una función distinta en el control de las variables de un sistema. Intentaremos ajustar los parámetros para nuestro sistema lo mejor posible para un control óptimo del mismo.

Antes de pasar a definir los diferentes tipos de controladores del control PID, debemos conocer los términos de señal de referencia (como indicamos anteriormente, es el valor que queremos conseguir en la salida del sistema, en este caso la temperatura del interior del coche) y la señal de error (entrada al controlador PID, y nos muestra la diferencia entre la referencia y el estado actual de la variable que se quiere controlar).

1. Control proporcional

Esta es una acción de control proporcional a la señal de error, e intenta minimizarlo. Si el error es muy grande, como la diferencia entre la referencia y el estado actual es grande, la actuación del sistema sobre la planta será también grande para llegar a la referencia. La expresión de este controlador es:

$$PD = Kp * e(t)$$

Donde Kp es una ganancia que depende de cada sistema, denominada ganancia del controlador.

2. Control integral

Este controlador calculará la integral de la señal de error. Esto es debido a que, con el tiempo, se van acumulando pequeños errores que hace que cada vez el error sea mayor y no lo pueda contrarrestar la acción proporcional, los cuales serán contrarrestados por la acción integral.

El problema de utilizar este tipo de controladores es que el sistema obtiene cierta inercia, por lo que se hace más inestable hasta llegar a régimen permanente.

$$PI = Ki * \int_0^t e(t) dt$$

Donde Ki se conoce como la constante integral.

3. Control derivativo

Esta acción de control será proporcional a la derivada del error, y se encargará de controlar la velocidad del cambio del error. Es decir, cuando un sistema evoluciona muy rápido hacia el valor de referencia, el sistema puede pasarse, añadiendo así una sobreoscilación. Este controlador será el encargada de paliar ese efecto.

$$PD = Kd * \frac{de(t)}{dt}$$

Donde Kd será la constante derivativa, propia de cada sistema.

Por lo tanto, la ecuación completa del controlador PID, que será el que utilizemos en nuestro sistema de control, será la siguiente:

$$P = Kp * e(t) + Ki * \int_0^t e(t) dt + Kd * \frac{de(t)}{dt}$$

Donde Kp, Ki y Kd serán las constantes del controlador, propias de cada sistema, y e(t) el error del sistema, siendo en nuestro caso la diferencia de temperaturas entre el interior del vehículo y la deseada.

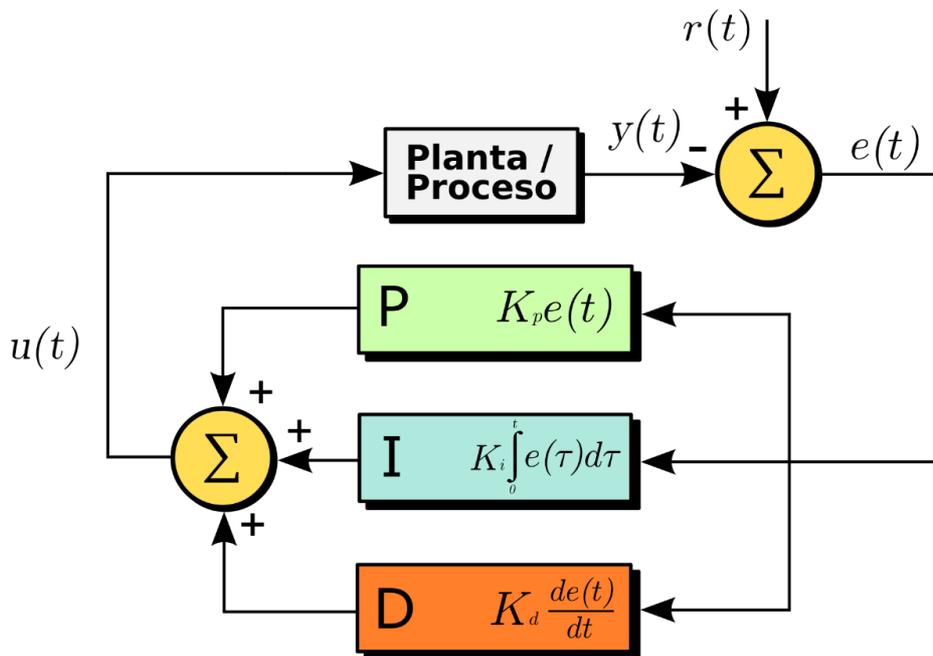


Imagen 8: Esquema de un controlador PID

Se muestra en la imagen anterior el esquema general de un controlador PID, donde $r(t)$ es la referencia, $e(t)$ el error, $y(t)$ la salida del proceso y $u(t)$ la acción controlada.

4.3 Sintonización del controlador PID

Para la sintonización de controladores PID hay métodos específicos que se usan en la actualidad, como el método de Ziegles y Nichols o el método de Tyreus y Luyben, aunque lo más utilizado hoy en día es la sintonización por ajuste manual.

Esto consiste en ir ajustando los valores del controlador uno a uno, hasta que la respuesta del sistema tenga el menor error posible frente a la referencia, y en el menor tiempo y con la mayor estabilidad posible.

Una regla sencilla que se aplica es seguir estos pasos:

1. Ajuste de la acción proporcional. Se va aumentando la ganancia K_p poco a poco hasta disminuir el error y aumentar la velocidad de respuesta del sistema lo máximo posible.
Si el sistema adquiere mucha inestabilidad antes de llegar a la referencia, habría que aumentar la acción realizada por el control derivativo.
2. Se va aumentando poco a poco la constante K_d para aumentar la acción derivativa, y conseguir estabilidad en la salida de nuestro sistema.
3. Si no se consigue llegar a la salida de referencia debido a la acumulación de errores anteriormente mencionado, iremos aumentando la acción integral hasta que consigamos minimizar dicho error. Haciendo esto puede que el sistema alcance la inestabilidad de nuevo, por lo que habría que pasar a aumentar la acción derivativa.

Otra cosa a tener en cuenta a la hora de diseñar los controladores son los límites físicos que existen en los accionadores reales. Puede que para llegar a una determinada referencia, no sea posible llegar físicamente con nuestro accionador real a esa referencia, aunque sí lo sea teóricamente.

En nuestro caso concreto, pensemos el caso en que la temperatura del exterior sea extremadamente alta, y el aire acondicionado de nuestro vehículo no sea capaz a los valores de temperatura del aire acondicionado o al caudal de aire acondicionado necesarios para alcanzar esa referencia. Por ejemplo, el aire acondicionado no podrá echar aire frío a una temperatura menor de 8 grados centígrados, o no podrá introducir 1 m³ de aire para llegar a una temperatura deseada muy baja.

Pasaremos ahora a la sintonización de nuestro controlador PID.

Realizaremos el control de nuestro sistema dejando la temperatura del aire frío constante, y variando el caudal de aire acondicionado. El esquema del controlador es el siguiente:

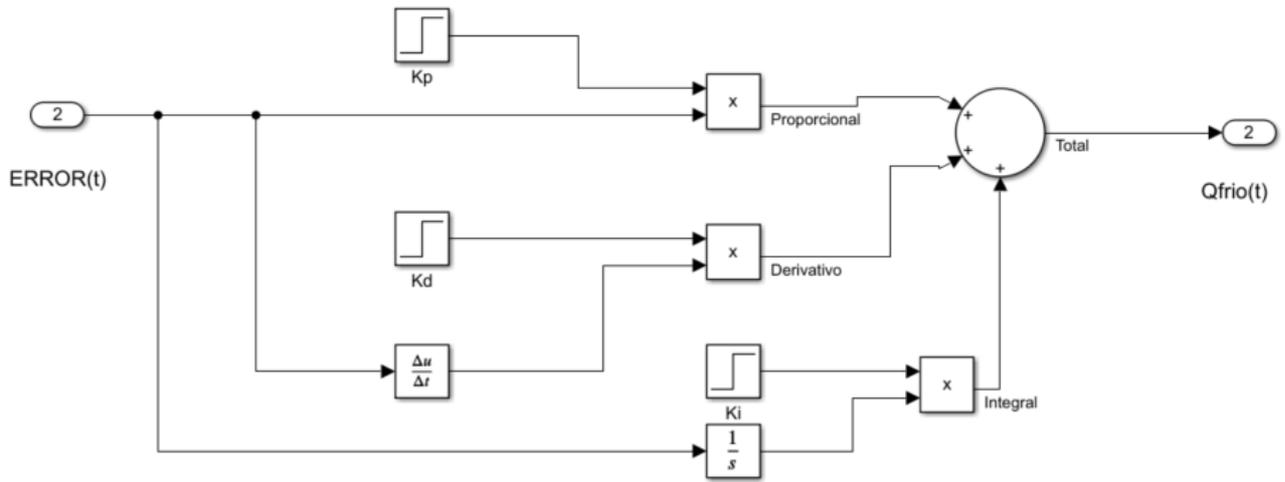


Imagen 9: Modelo en simulink del controlador PID

Como hemos comentado, la entrada del controlador será el error y la salida será el caudal de aire frío. Por otra parte, siguiendo la fórmula vista anteriormente, vemos como actuamos sobre el error (entrada) para conseguir la acción de control óptimo.

Se muestra una representación ahora del sistema de control completo.

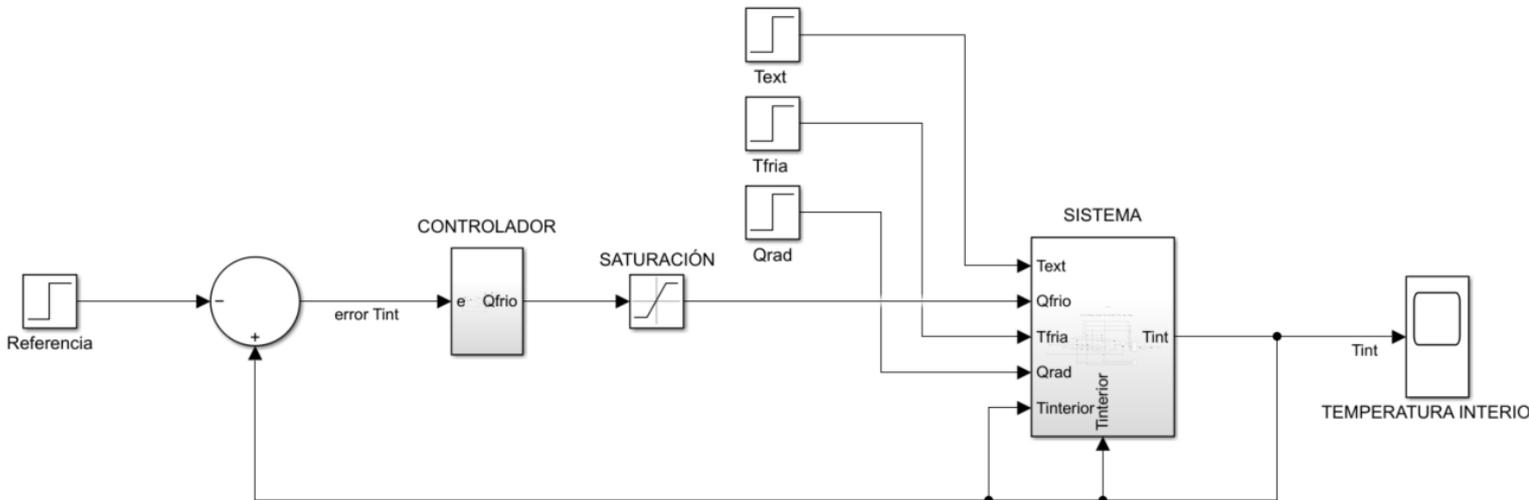


Imagen 10: Sistema de control

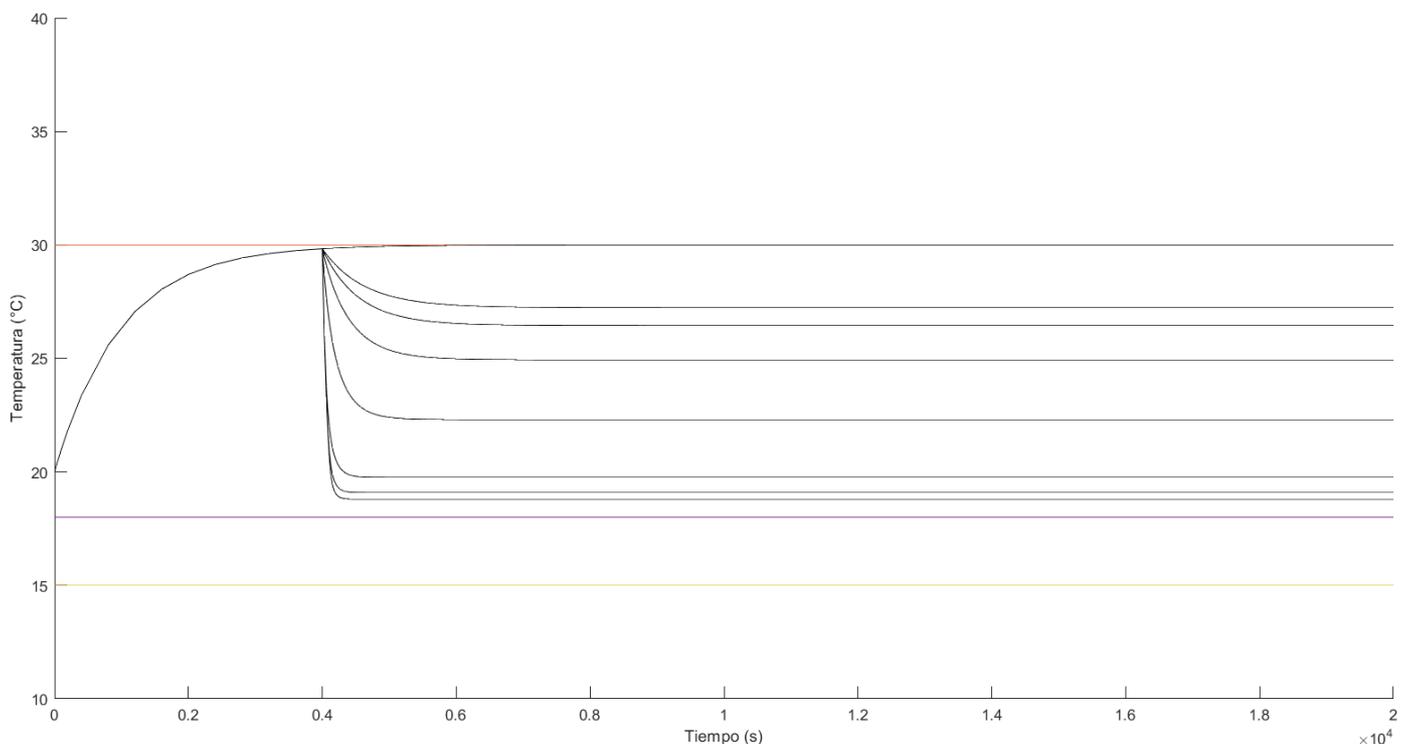
Comenzaremos a continuación las simulaciones para poder ajustar los parámetros de nuestro controlador PID siguiendo el esquema anterior. Lo realizaremos primero sin introducir radiación.

Lo primero que haremos es ajustar la acción proporcional. Partiremos de una ganancia muy pequeña, e iremos subiendo hasta que consigamos llegar a la temperatura de referencia. El valor del calor de radiación será siempre nulo para la sintonización de nuestro controlador.

Para nuestra simulación, fijaremos la temperatura del aire frío a 15 grados, la temperatura exterior a 30 grados y la temperatura inicial del vehículo a 20. El caudal de aire será la variable controlada y lo limitaremos atendiendo a sus limitaciones físicas. De esta forma, el caudal mínimo de aire que podrá suministrar el aire acondicionado será de 0 m³ de aire, mientras que para el caudal máximo supondremos un valor de 0.04 m³.

Intentaremos que la simulación sea una situación cotidiana, en el que un coche está en un garaje (a 15 grados) y al salir a la calle, como la temperatura exterior es de 30 grados, su temperatura tiende a 30 grados. Hasta que el usuario siente calor y activa el aire acondicionado.

De esta forma iremos variando primero la ganancia K_p hasta obtener en la salida un valor lo más cercano posible a la temperatura de referencia.



Gráfica 10: Variación de la temperatura ante distintas KPs

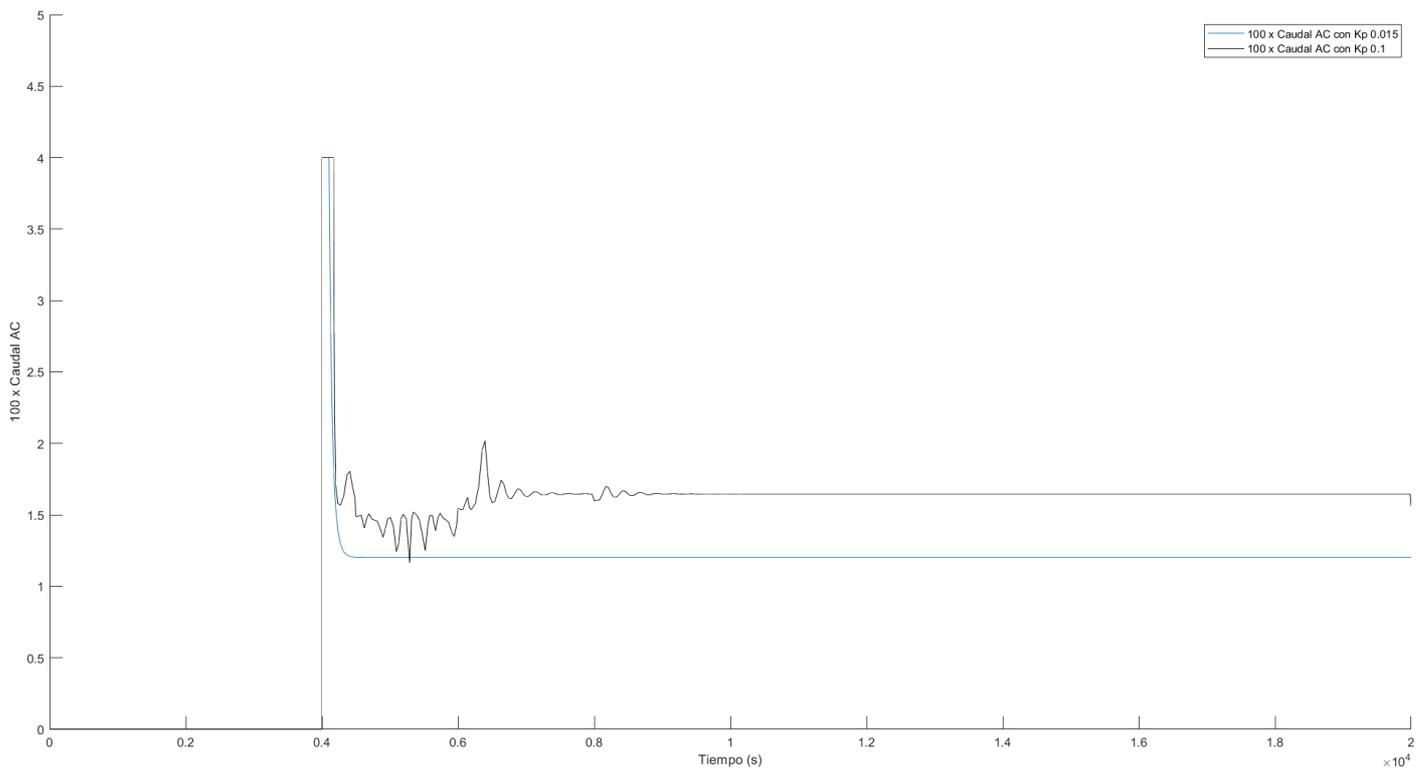
Kp	Tint	Qfrio
0	30	0
0.0001	27.23	0.0009233
0.00015	26.45	0.001267
0.0003	24.94	0.002081
0.001	22.3	0.004302
0.005	19.76	0.008787
0.01	19.09	0.01089
0.015	18.8	0.01197
0.1	18.16	0.01558

Tabla 1: Ganancias proporcionales

Se representa en la gráfica anterior la temperatura exterior (30 °C), de referencia (18°C) y del aire acondicionado (15°C). También se representa la temperatura interior con los distintos valores dados en la tabla. A mayor valor de Kp, más abajo en la gráfica, pues la temperatura interior será menor.

Comenzamos con valores de Kp pequeños, y vamos aumentando este valor porque vemos que se va acercando a la temperatura de referencia, hasta llegar a la Kp con valor de 0.015 que es la que elegiremos.

Podríamos pensar que el siguiente valor de Kp, que es 0.1, se acerca aún más a la temperatura de referencia, pero esto desestabiliza la temperatura interior y, sobre todo, el caudal de aire que tiene que expulsar el aire acondicionado para llegar a esta temperatura. Se representa en la siguiente gráfica la evolución del caudal de aire acondicionado de estos dos últimos valores de Kp para compararlos:



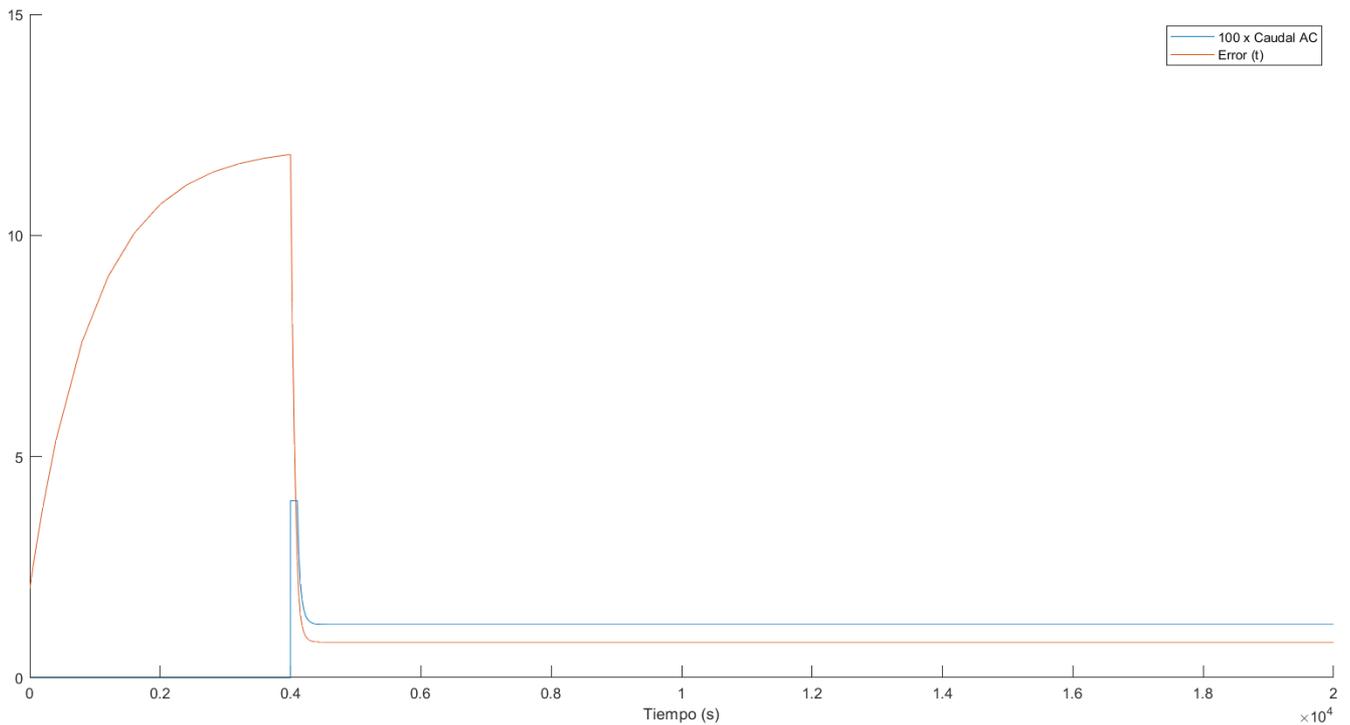
Gráfica 11: Evolución del caudal de AC ante distintas KPs

Se aprecia como con el controlador con ganancia 0.015 el valor del caudal introducido al interior el coche es estable, mientras que con ganancia 0.1 se vuelve más inestable. Esto se traduce en que la temperatura interior del coche (la salida de nuestro sistema) también presenta inestabilidad, aunque no se pueda apreciar tan alejado en la gráfica anterior.

Además, con la ganancia 0.1 podemos ver como el aire acondicionado está bastante tiempo estabilizándose, por lo que el aumento y la disminución del aire acondicionado puede causar bastante ineficiencia energética.

Por estas razones, se decide fijar la K_p de nuestro controlador como 0.015, y le introduciremos un valor de K_i para contrarrestar esa diferencia que hace que la temperatura interior no llegue a los 18 grados que marca la diferencia.

De la última gráfica cabe destacar también como se ha fijado el límite del caudal que se puede expulsar el aire acondicionado en 0.04 m^3 , tal como habíamos planteado. Se muestra a continuación la misma gráfica del caudal del aire acondicionado, pero acompañado del error para comprobar la acción de la saturación del controlador.



Gráfica 12: Evolución del caudal de AC y del error del sistema

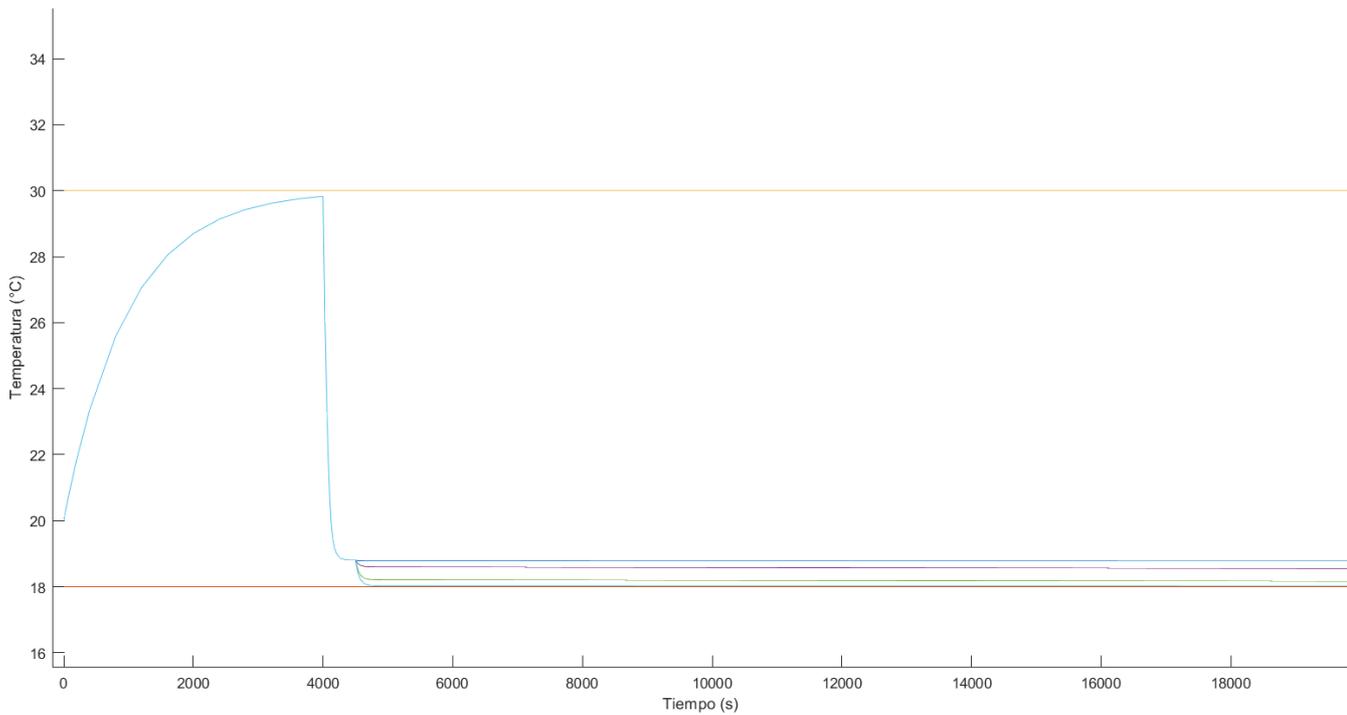
Se aprecia como el error parte de dos grados, pues es la diferencia entre la temperatura inicial del vehículo (20 grados) y la referencia (18 grados). Como al inicio no actúa el aire acondicionado, la temperatura sigue alejándose de la referencia, por lo que el error cada vez se hace mayor.

En el segundo 4.000 entra en juego el aire acondicionado, y en ese momento el error es muy grande, por lo que el controlador intenta expulsar mucho caudal. Vemos aquí el efecto de la saturación, pues no se permite expulsar más de 0.04 m3 de aire, por lo que durante un tiempo se mantiene constante con ese caudal.

Una vez elegida la ganancia proporcional de nuestro controlador (0.015), pasaremos a diseñar la acción integral de nuestro controlador. Decidimos incluir esta acción integral instantes después de la acción proporcional, para poder ver el efecto de la misma con respecto a la acción proporcional.

Ki	Tint	Qfrio
0.00000001	18.77	0.01214
0.00000001	18.55	0.01315
0.00000003	18.17	0.01524
0.00000004	18.02	0.0162

Tabla 2: Ganancias integrales

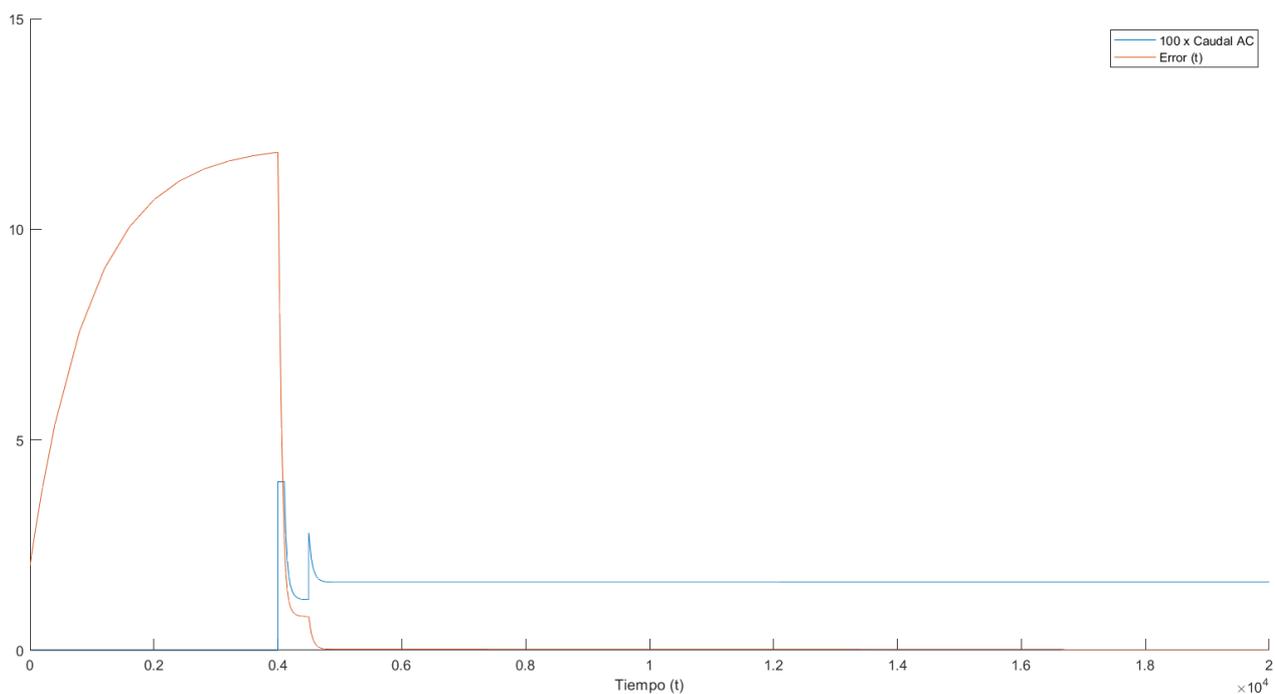


Gráfica 13: Evolución de la temperatura ante distintas KIs

Vemos en la gráfica la representación de la temperatura exterior (30 grados) y la temperatura de referencia (18 grados), además de las representaciones de las temperaturas interiores dependiendo de las constantes K_i de nuestro controlador.

A mayor K_i , más caudal de aire expulsa el aire acondicionado, por lo que más baja la temperatura del interior. Vemos como para un valor de K_i de 0.0000004, el sistema es capaz de llegar a la temperatura de referencia perfectamente, por lo que elegiremos este valor para la constante integral.

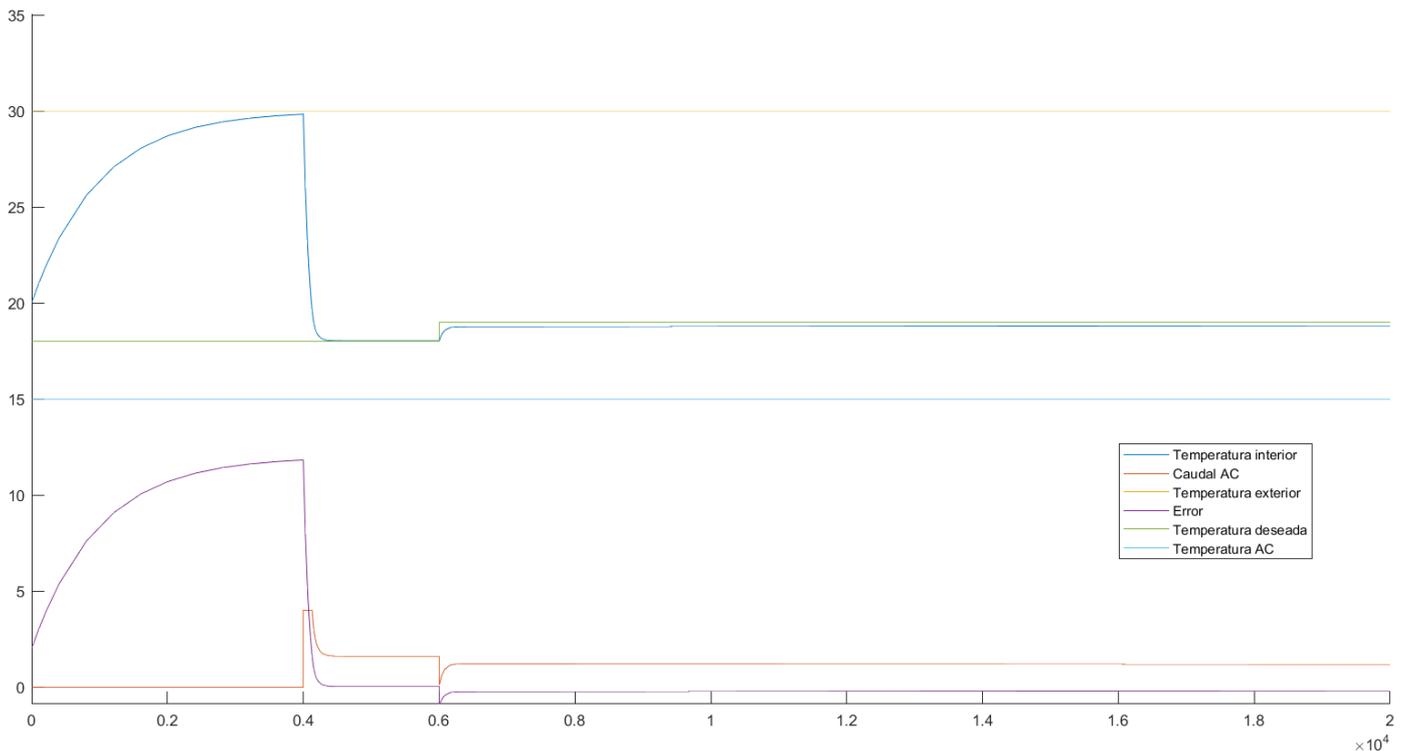
Veremos a continuación como se comporta el caudal de aire acondicionado con este nuevo valor introducido de nuestro controlador:



Gráfica 14: Evolución del caudal de aire acondicionado y del error

La diferencia de este caso con el controlador anterior (que solo tenía acción proporcional) es que ahora el error si converge a cero. Vemos como en el instante que comienza la acción integral, el caudal de aire sube hasta lograr estabilizarse y mantener la temperatura del interior del coche muy próxima al valor de referencia.

Una vez diseñadas las acciones proporcional e integral de nuestro controlador, nos quedaría diseñar la parte derivativa. La acción de control derivativa se usa para evitar oscilaciones de la variable controlada, por lo que mejora la estabilidad de la salida del sistema. Pero como podemos apreciar, nuestro sistema es ya muy estable, no presenta muchas perturbaciones, por lo que no incluiremos parte derivativa a este controlador.



Gráfica 15: Evolución de la temperatura y del aire acondicionado una vez elegidas KP y KI

Vemos en la gráfica anterior una representación del funcionamiento del controlador con las acciones proporcional e integral que empiezan en el mismo tiempo.

La temperatura interior empieza en 20 grados, y va subiendo hasta la temperatura exterior, ya que no hay radiación ni se enciende el aire acondicionado, lo que tarda unos 4.000 segundos. En este periodo, vemos como el error hasta 12, ya que el error resulta de realizar la diferencia entre la temperatura deseada (18 grados) y la temperatura en el vehículo (30 grados). Buscamos que el error sea cero, o lo más cercano posible a este valor, pero este aumenta hasta tal punto debido a que nuestro controlador no entra en juego y no enciende el aire acondicionado.

A partir del instante 4.000 vemos como se enciende el aire acondicionado. La respuesta del sistema es encender el aire acondicionado con un caudal de 0.005 m³ y hace que la temperatura interior del coche baje a la temperatura de referencia, 18 grados. Una vez alcanzada dicha temperatura, mantiene el caudal sobre un valor aproximado de 0.0025 m³, lo necesario para mantener la temperatura al valor deseado por el usuario, haciendo que el error sea 0 o un valor muy cercano a este.

El siguiente cambio ocurre en el segundo 8.000 de la simulación, donde los pasajeros deciden aumentar la temperatura en el interior, por lo que la referencia pasa a ser 19 grados. En este preciso instante, el error aumenta hasta un valor negativo de aproximadamente 1 (según la gráfica, el error sería negativo, pero los errores los tomamos como el valor absoluto de la diferencia entre el valor actual y el valor de referencia), y el controlador detecta que no es necesario tanto caudal de aire acondicionado, por lo que disminuye el caudal hasta un valor de 0.002 m³. El error va evolucionando hasta un valor muy cercano a cero, por lo que podemos afirmar que el funcionamiento de nuestro controlador es correcto.

5 ESTRATEGIA DE CONTROL USANDO UN SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR

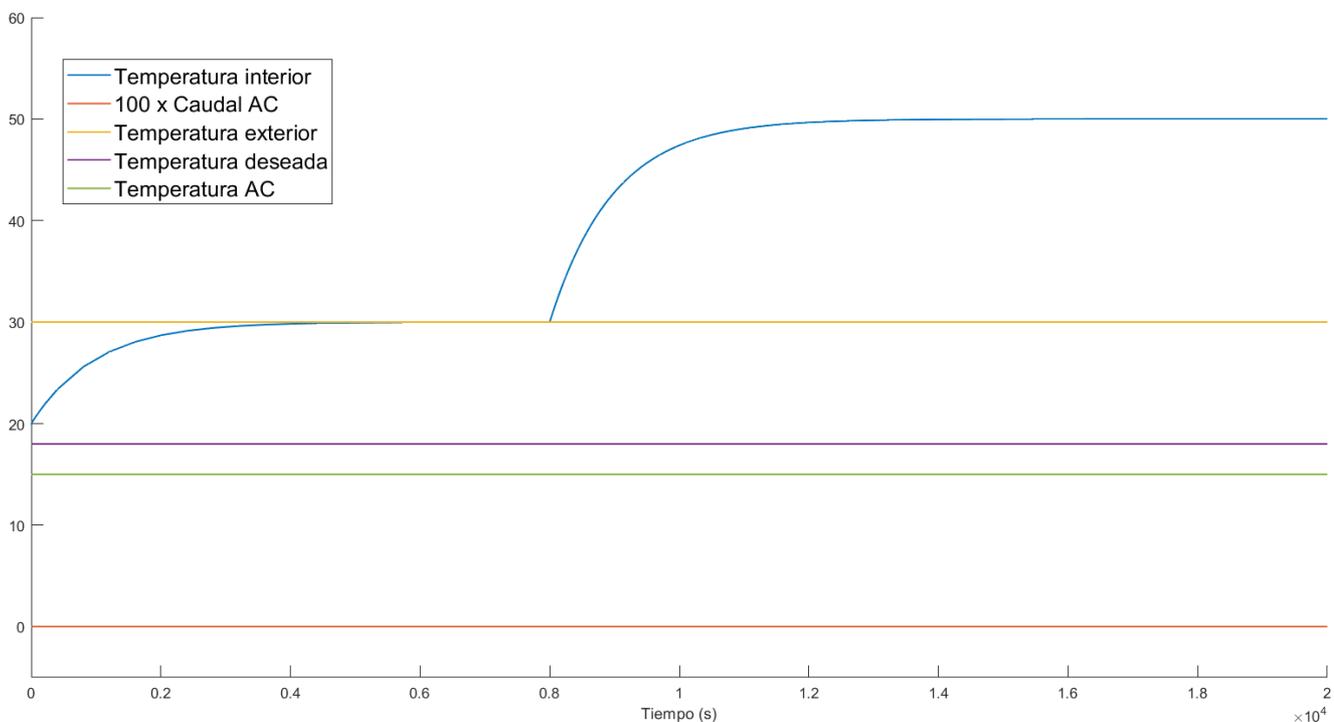
Una vez diseñado nuestra planta del sistema y el controlador PID que regulará la temperatura del interior del vehículo a gusto de los pasajeros del coche, pasaremos a desarrollar nuestra estrategia para intentar contrarrestar el efecto de la radiación del Sol a partir de la información recibida por un sensor solar.

En primer lugar, definiremos lo que es un sensor solar: es un instrumento destinado a medir la radiación solar. Generalmente está compuesto por un diodo de silicio, cuya misión es convertir la energía de la radiación Solar a un voltaje con el fin de obtener una salida analógica.

Dividiremos ahora el coche en dos habitáculos adiabáticos, controlados por un solo controlador. En el caso de que no haya radiación del Sol no existiría problema alguno, pues el sistema controlaría para llegar a la temperatura deseada. Pero veamos en esta sección el efecto que tendría la existencia de radiación en uno solo de los habitáculos del vehículo.

En las siguientes gráficas, cambiaremos el valor de saturación del caudal de aire acondicionado de 0.04 a 0.06 m³, solo por ver mejor el efecto producido.

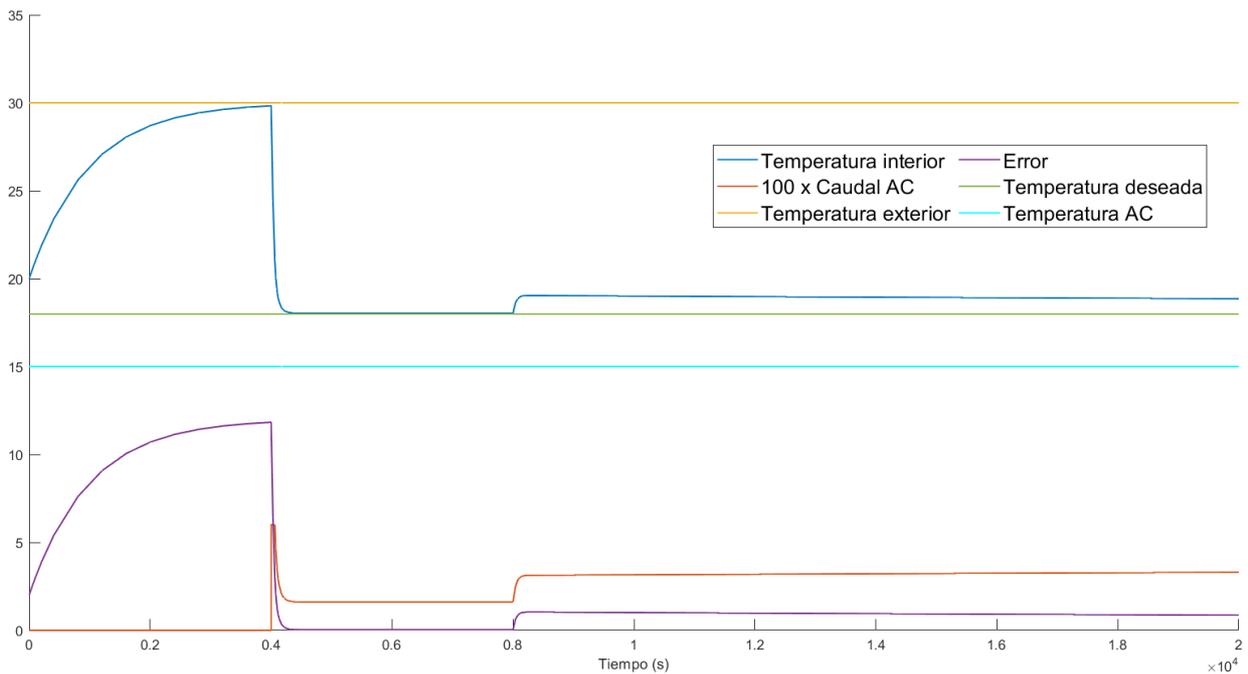
Mostramos primero el efecto de la radiación con el aire acondicionado apagado. Daremos el valor del calor de radiación alto, para hacer un efecto notable del mismo. El valor será 100 J/s, y comenzará a actuar en el instante 8.000. El coche estará a una temperatura inicial de 20 grados, y la temperatura exterior será de 30 grados.



Gráfica 16: Funcionamiento del sistema con radiación y sin aire acondicionado

Como podemos ver, la temperatura interior del coche sin encender el aire acondicionado sube a causa de la radiación hasta los 50 grados (quizás sea un valor irreal un valor tan alto de temperatura, pero lo hacemos para destacar y hacer énfasis en el efecto de la radiación, por lo que se le da a esta un valor demasiado alto (100 J).

Una vez visto el efecto, encendemos el aire acondicionado del coche en el instante 4.000, con el controlador diseñado anteriormente, y con las mismas condiciones que hemos mencionado en la gráfica anterior (entra una radiación de 100 J/s al interior en el instante 8.000).



Gráfica 17: Funcionamiento del sistema con radiación y con aire acondicionado

En este escenario, la situación cambia. Vemos como la temperatura sube a partir del segundo 8.000 debido a la radiación que entra en el habitáculo en ese momento. El controlador sí actúa, como podemos ver por la subida del caudal de aire aportado por el aire acondicionado, y vemos también como la temperatura del interior va bajando lentamente (aunque no se aprecie muy bien en la gráfica), bajando así el error en la salida del sistema, y que el caudal del aire acondicionado va subiendo también poco a poco.

Si le diésemos un tiempo muy grande al controlador, lograría controlar y llegar a la temperatura deseada, pero intentaremos dar una solución para que el efecto sea óptimo para los pasajeros del vehículo.

Podríamos intentar mejorar el controlador para que actuase más rápido, pero aún así tardaría un tiempo hasta controlar la temperatura a la deseada cuando hay radiación solar.

En ese tiempo de estabilización de la temperatura, el pasajero sentiría una mayor temperatura a la deseada, por lo que tendría que bajar él mismo la temperatura de referencia manualmente. Lo que intentaremos es paliar el efecto de la radiación solar de manera automática.

Las gráficas 16 y 17 han servido para ilustrarnos la idea de que, aún con radiación, el sistema funciona e intenta que la temperatura interior siga a la temperatura de referencia (en la gráfica 16 no se enciende el aire acondicionado y la temperatura se eleva muchísimo, mientras que en la gráfica 17 el aire acondicionado se enciende y la temperatura interior intenta seguir a la de referencia, pero no llega por la radiación entrante en el vehículo).

Pasaremos a representar un esquema de nuestro sistema actual para ver lo que está ocurriendo en los dos habitáculos del vehículo, con las siguientes condiciones de entrada:

Para el habitáculo 1, la temperatura exterior es de 30 grados, la temperatura de referencia es de 18 grados, la temperatura del aire acondicionado es constante de 15 grados y la radiación es nula.

Para el habitáculo 2, la temperatura exterior es de 30 grados, la temperatura de referencia es de 18 grados, la temperatura del aire acondicionado es constante de 15 grados y la radiación es de 100 J, que empieza actuar en el instante 8.000.

Es decir, todos los valores de entrada son iguales excepto la radiación. Simulamos lo que ocurre dentro del coche mediante el siguiente sistema de Matlab:

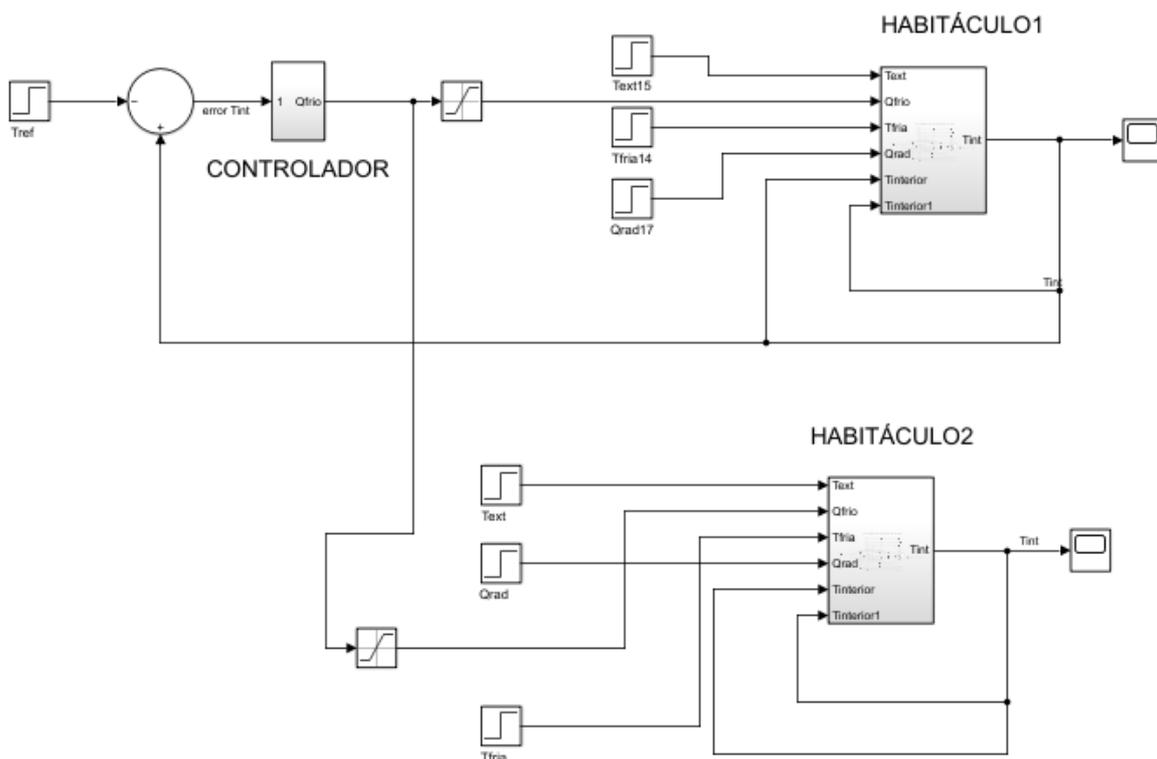
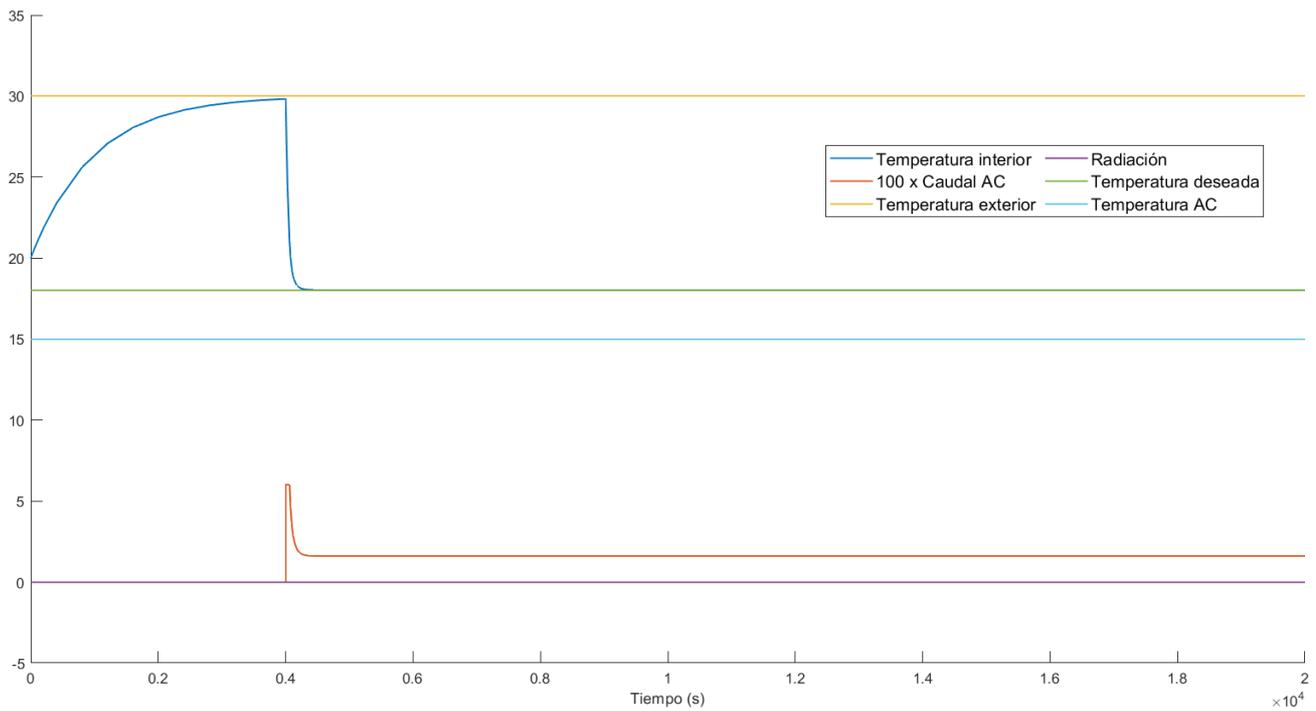


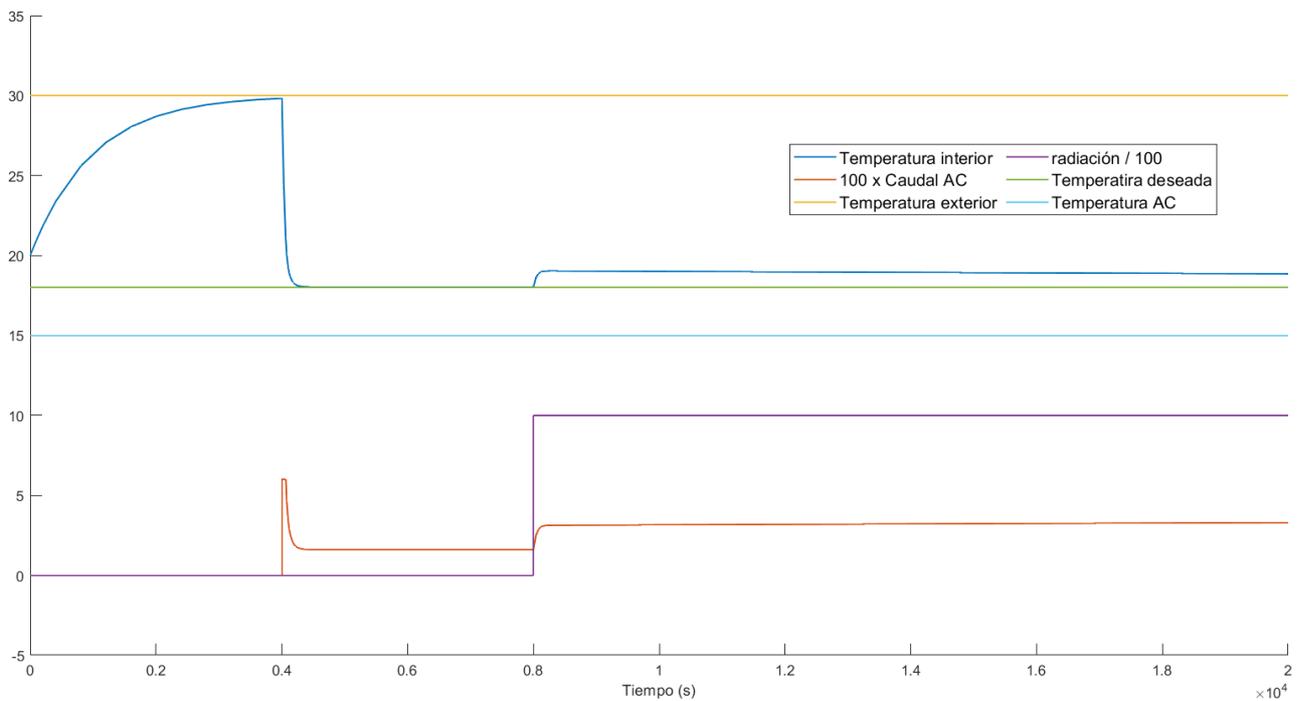
Imagen 11: Representación de los dos habitáculos del vehículo sin sensor solar

Por un lado, nos encontramos el habitáculo 1. Nuestro controlador está sintonizado para ese habitáculo, en el que la radiación que le entra es nula. En este caso, nuestro controlador PID controlaría el sistema de forma adecuada, consiguiendo que la temperatura interior del coche siga a la temperatura de referencia, como se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 18: Evolución temporal del habitáculo 1 (sin radiación) sin sensor solar

Por otro lado, nos encontramos el habitáculo 2, en el que entrará radiación. Como hemos razonado anteriormente, al no estar el controlador sintonizado para estos datos de entrada con radiación, se verá como la temperatura interior no consigue seguir a la referencia. Esto lo podemos ver como una perturbación que hace que el sistema tarde mucho tiempo en actuar sobre ella y conseguir disminuir su efecto. Lo vemos en la siguiente simulación:



Gráfica 19: Evolución temporal del habitáculo 2 (con radiación) sin sensor solar

La única diferencia entre los valores usados para las dos anteriores simulaciones es el valor de la radiación, como hemos mencionado. Por lo que nuestro objetivo será minimizar ese error producido por la radiación, y es entonces cuando entra en juego el sensor de radiación solar.

En la realidad, el problema que entre radiación solar por uno de los habitáculos y nos de el Sol directamente, es la sensación térmica que obtenemos, que nos hace sentir una mayor sensación térmica. El sensor de radiación es capaz de detectar este fenómeno (reconociendo la radiación solar que entra en el vehículo) y hace que el sistema actúa para contrarrestar el efecto del Sol y bajar así nuestra sensación térmica, acabando con ese tiempo de regularización de la temperatura tan alto comentado anteriormente.

En nuestro sistema, lo simularemos de la siguiente forma:

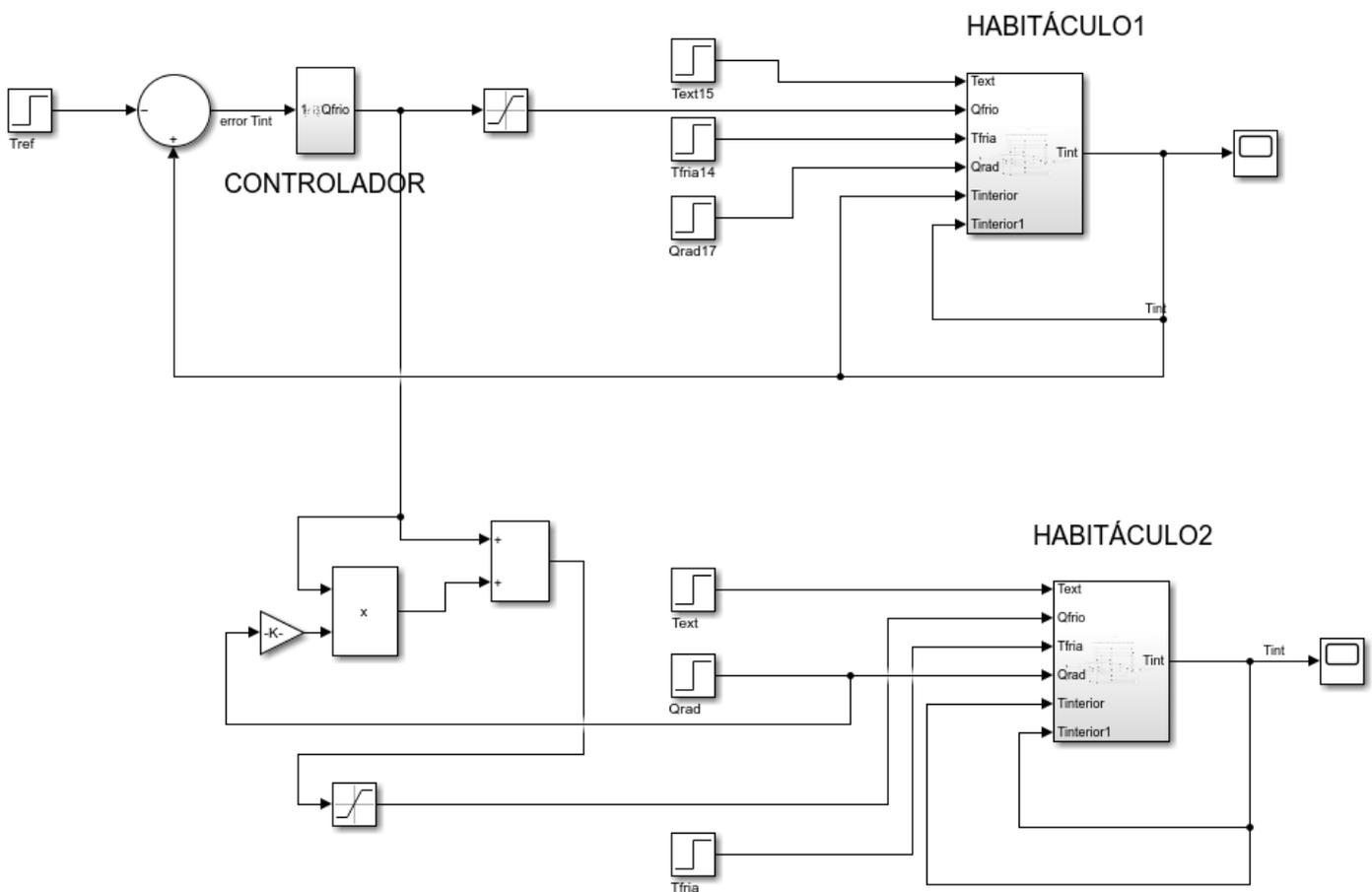
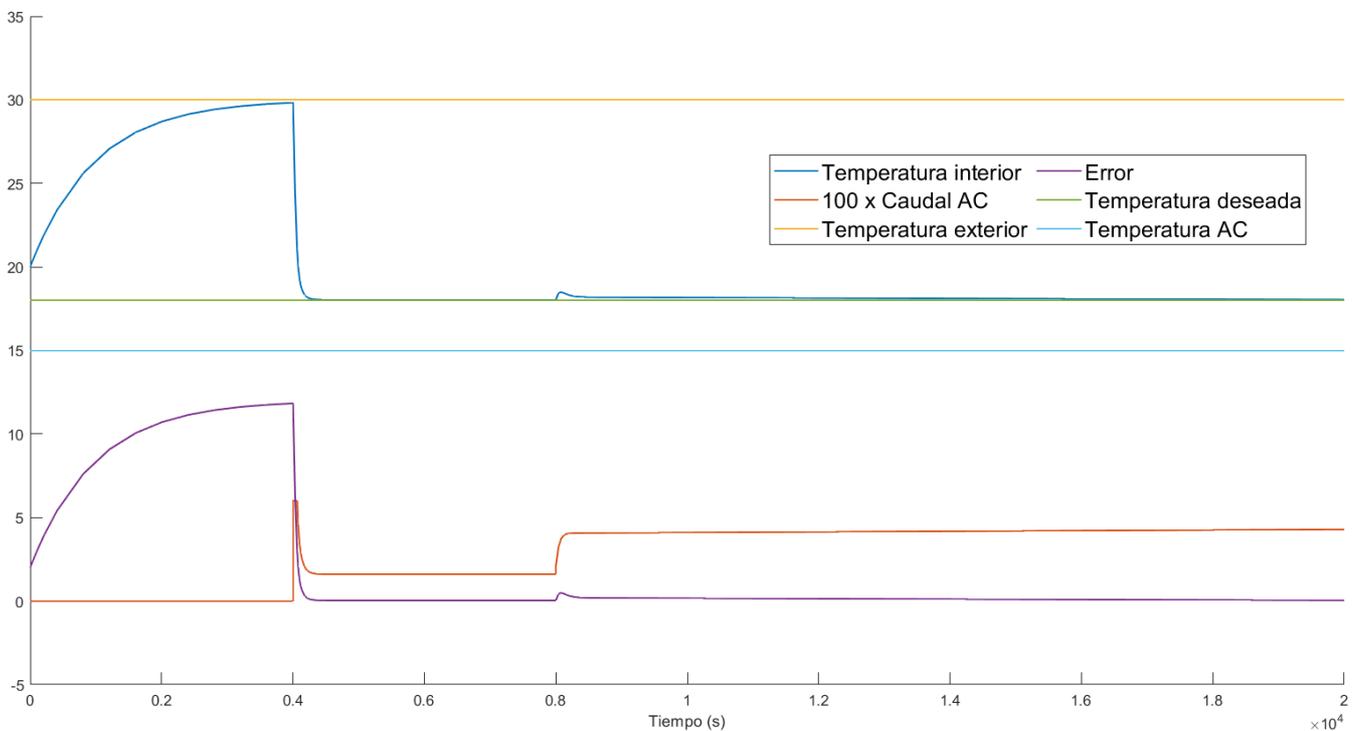


Imagen 12: Representación de los dos habitáculos del vehículo con sensor solar

Como hemos comentado antes, solo hay un controlador para todo el vehículo, cuyos valores están diseñados para el caso de que no haya radiación en el habitáculo en cuestión. El otro habitáculo, al que le llega la radiación, aumentaría su temperatura como hemos visto antes.

La idea ahora es que, al caudal de aire calculado por el controlador, se le suma un término para contrarrestar la radiación solar. Esto lo hacemos multiplicando dicha radiación por una ganancia, y sumándolo al caudal suministrado por el controlador. Si el calor de radiación es mayor, la suma total sobre el habitáculo 2 (al que le llega la radiación) será mayor. Este concepto se aprecia mejor en la imagen 10.

En nuestro caso, el valor elegido para la ganancia es 0.015. Realizaremos ahora una simulación del habitáculo 2, donde al habitáculo 1 no le llega radiación y al 2 le llega una radiación de 100 J/s, para ver si el exceso de temperatura que vimos en la gráfica anterior sigue pasando o se consigue corregir.



Gráfica 20: Evolución temporal del habitáculo 2 (con radiación) y con sensor solar

Se aprecia como, al llegar el calor de radiación en el segundo 8.000, sube la temperatura del interior del vehículo. El término de la ganancia que hemos introducido hace reaccionar al sistema de inmediato, controlando la temperatura a la de referencia. Hemos reducido el tiempo mucho con el factor de radiación.

Este papel es el que haría el sensor de radiación. Detectaría a qué habitáculo le llega radiación y con qué intensidad, y actuaría en resonancia, ya sea subiendo el caudal de aire AC o bajando la temperatura del mismo para contrarrestar este efecto.

6 ANÁLISIS DE VIABILIDAD

Comenzaremos presentando el sensor de radiación solar que vamos a utilizar. Elegiremos el sensor NANO-ISXX, del fabricante Solar MEMS Technologies S.L. Este sensor es muy utilizado en energías renovables, automotor, sistemas de aire acondicionado y otras aplicaciones domóticas.

Es un sensor que nos permite medir el vector incidente del rayo solar, proporcionando su ángulo de proyección en los ejes ortonormales de referencia, teniendo un campo de visión global mediante las dimensiones geométricas de su diseño. Se caracteriza por su diseño compacto, su fácil integración y su bajo consumo de energía.

Las dimensiones del sensor deben ser reducidas para poder colocarla en la tapicería del coche sin que moleste para la conducción. Las dimensiones de nuestro sensor son 18x18x3.85 mm, por lo que cumplirían estas especificaciones. El peso es de menos de 10 gramos.

Necesitamos que no tenga un consumo excesivo para asegurar la viabilidad económica. El consumo medio de este sensor está en 5 mW. La tensión de alimentación varía entre 3 y 12 voltios.

El rango de temperaturas en el que trabaja correctamente dicho sensor es entre -40 y 85 grados, lo que es más que suficiente para nuestro uso.

En el anexo 1 se incluye la ficha técnica de nuestro producto, por si resultara necesario consultar alguna característica del mismo.

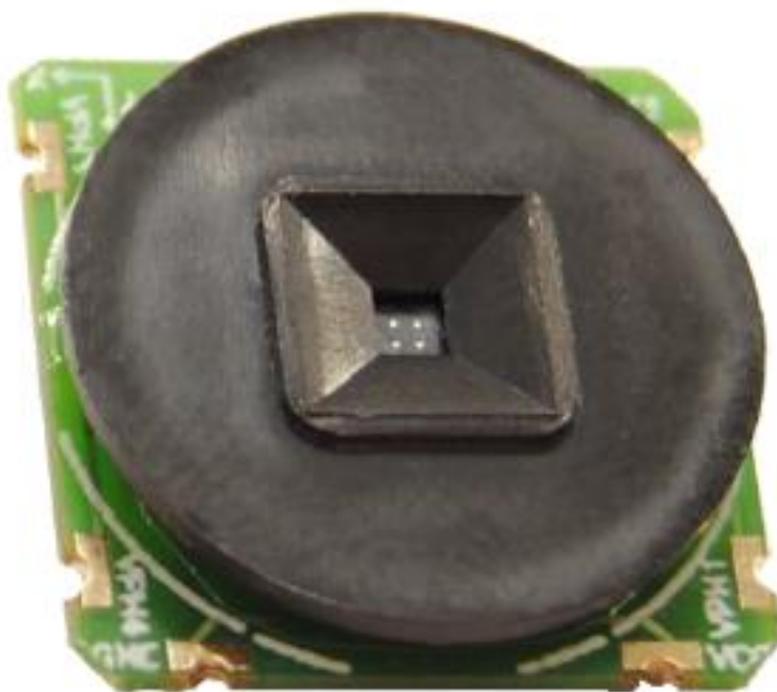


Imagen 13: Sensor de radiación sensor NANO-ISXX

El precio de este producto es de alrededor de 1 euro, siendo un instrumento que cumple las especificaciones para el uso que le daremos y a un precio muy económico.

Cabe destacar también que solo necesitaremos la utilización de un solo controlador PID, lo que no compromete la viabilidad económica de nuestro proyecto.

Por otro lado, debemos asegurarnos que el microcontrolador usado tenga las suficientes entradas como para poder actuar de manera correcta (temperatura interior, temperatura de referencia, temperatura exterior, temperatura, calor de radiación, temperatura de aire acondicionado, sensor solar), y las suficientes salidas (caudal de aire frío, temperatura interior).

Con el microcontrolador MSP430FG4618IPZ 16 cumplimos con nuestro objetivo, con un precio aproximado de 1.60 euros.

Por lo que podemos afirmar que es viable incluir en el sistema controlador del aire acondicionado la información procedente del sensor solar y, además, resulta económicamente rentable sus resultados.

Como conclusión, podemos afirmar que hemos conseguido nuestro objetivo: disminuir el tiempo de respuesta ante la perturbación producido por la radiación entrante en el vehículo, con un tiempo de respuesta casi inmediata. También podemos observar como el caudal de aire acondicionado deberá aumentar su valor para poder cumplir el objetivo de disminuir la temperatura del interior del coche, como haríamos manualmente cuando sentimos esa sensación de calor provocada por la radiación del Sol.

7 CONCLUSIONES

Sabiendo la importancia de un clima favorable en la conducción con respecto a la seguridad y el confort, considero una óptima mejora del sistema de climatización la implementación de este modelo con sensores solares.

El precio a pagar por la implementación del sensor solar se puede considerar despreciable con respecto al coste de un vehículo completo, teniendo en cuenta la mejora de la confortabilidad y la seguridad de la autoregulación de la temperatura del interior por parte del sistema.

Tras las conclusiones que hemos obtenido a lo largo de los diferentes capítulos de este proyecto podemos afirmar la factibilidad de la implementación de un sistema microcontrolador con un sensor de radiación solar, lo que mejora la gestión del aire acondicionado de un vehículo.

Saliéndonos del propio proyecto, se destaca también la importancia y la gran utilidad de los controladores PID en la industria y la ingeniería. Son herramientas cada vez más usadas por su gran comportamiento y su facilidad de sintonización para los diferentes sistemas usados, tal como hemos visto en este proyecto.

8 BIBLIOGRAFÍA

[1] www.mathworks.com para información sobre comandos y funcionalidades de MATLAB y SIMULINK.

[2] www.wikipedia.org para información termodinámica y otros conceptos desarrollados.

[3] www.chu.es para el desarrollo de las distintas leyes termodinámicas

[4] www.youtube.com para ejemplos de implementación de controladores para distintos sistemas.

[5] www.autofacil.es para información sobre el funcionamiento del aire acondicionado de un coche.

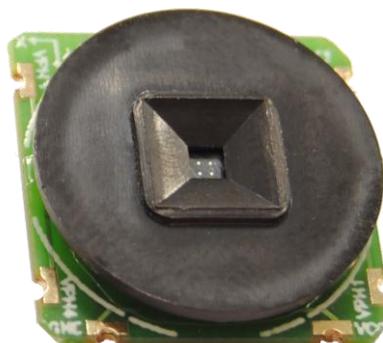
9 ANEXO

Se incluye el datasheet del sensor de radiación solar NANO-ISXX elegido para la consulta de todas sus características.

Solar MEMS Technologies S.L.

Sun Sensor NANO-ISSX/c

Technical Specifications



Features

Two orthogonal axes sun sensor
Different fields of view version: 60,25,15 and 5
Low power consumption: 5 mW
Wide operating voltage range: 3,3÷12 V
Industrial temperature range: - 40° to 85°C
Compact design: 18x18x3,85 mm (LxWxH)
Low weight: < 5 g
Surface mountable

Applications

Renewable energies
Automotive
Air conditioning systems
Domotic applications
Attitude control systems for vehicles
Sun tracking

NANO-ISSX sun sensor allows the measurement of the sun ray incident vector by providing its projection angles in orthogonal reference axes by means of a simple calculation procedure.

The field of view is achieved by the geometrical dimensions of the design. Its compact pattern, ease integration and low power consumption, makes it a suitable tool for renewable energies or low cost intelligent sensing applications.

NANO-ISSX is available in two formats: one designed for PCB surface mounting and one with a disconnectable type wire-to-board crimp style connector (NANO-ISSX-c).

1. Specifications

1.1. General Specifications

Parameter	NANO-60	NANO-25	NANO-15	NANO-5	Unit
Sensor type	2 axes	2 axes	2 axes	2 axes	Orthogonal
Field of view (FOV)	120x120	50x50	30x30	10x10	°
Average consumption	5	5	5	5	mW
Dimensions (LxWxH)	18x18x3,85	18x18x5,15	18x18x6,35	18x18x10,15	mm
Weight	<10	<10	<10	<10	g

Table 1. General Specifications

1.2. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Minimum value	Maximum value	Unit
VDD	Supply voltage	0	14	V
TOP	Operating temperature	-40	85	°C

Table 2. Absolute maximum ratings

1.3. Recommended operating conditions

Symbol	Parameter	Minimum value	Maximum value	Unit
VDD	Supply voltage	3	12	V
V _r	Supply voltage ripple	0	100	mVpp
TOP	Operating temperature	-40	85	°C

Table 3. Recommended operation conditions

2. Sun Sensor NANO-ISSX

NANO-ISSX measures the incidence angles of a sun ray based on a quadrant photodetector device. The sunlight is guided to the detector through a window above the sensor. Depending on the angle of incidence, the sunlight induces photocurrents in the four quadrants of the detector.

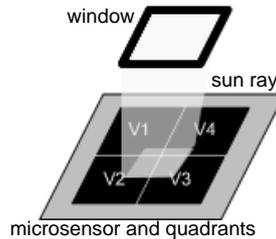


Fig 1. Microsensor of NANO-ISSX

2.1. NANO-ISSX parameters

2.1.1. Reference Axes

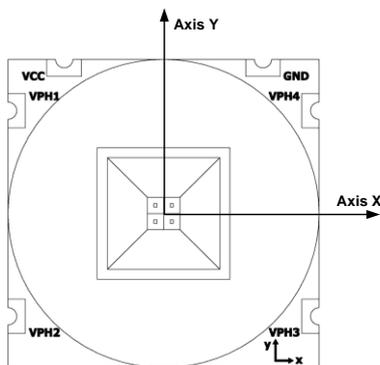


Fig 2. Front view NANO-ISS60 reference system

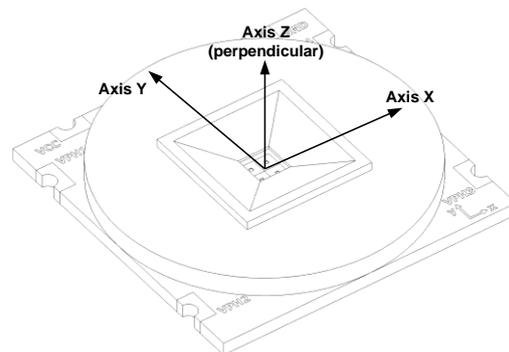


Fig 3. Isometric view NANO-ISS60 reference system

Z axis is perpendicular to the sensor base plane.

2.1.2. Incident angle calculation

The *angle x* and *angle y* specify the angular position of the incident sun ray inside the field of view of the NANO-ISSX sensor according to references given in Fig. 5.

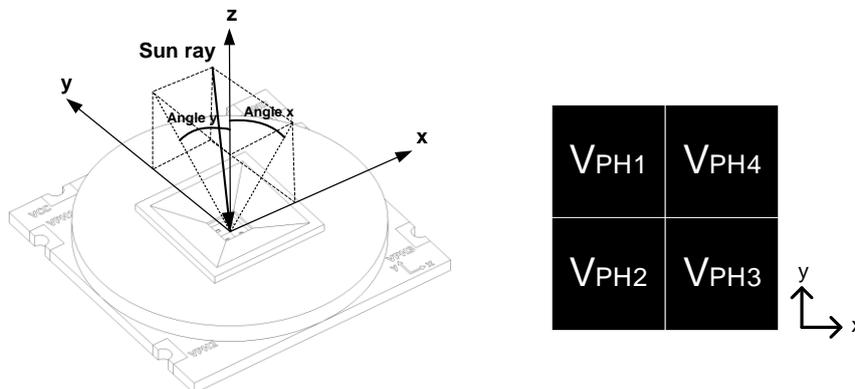


Fig 4. Reference for angles calculation

Angles X and Y of the incidence ray can be obtained with a simple set of equations involving the four photodiode voltages generated by the sensor (V_{PH1} , V_{PH2} , V_{PH3} , V_{PH4}):

$$X_1 = V_{PH3} + V_{PH4}$$

$$Y_1 = V_{PH1} + V_{PH4}$$

$$X_2 = V_{PH1} + V_{PH2}$$

$$Y_2 = V_{PH2} + V_{PH3}$$

$$F_X = \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1}$$

$$F_Y = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_1}$$

$$\text{Angle } X = \arctg(C \cdot F_X)$$

$$\text{Angle } Y = \arctg(C \cdot F_Y)$$

Type	Value
NANO-ISS60	1,889
NANO-ISS25	0,477
NANO-ISS15	0,273
NANO-ISS5	0,125

Table 4. Values of the parameter C according to the type of sensor NANO-ISSX

The accuracy of the measurements depends on the integration and the calibration processes. The NANO-ISSX sun sensors are not calibrated.

3. Electrical interface

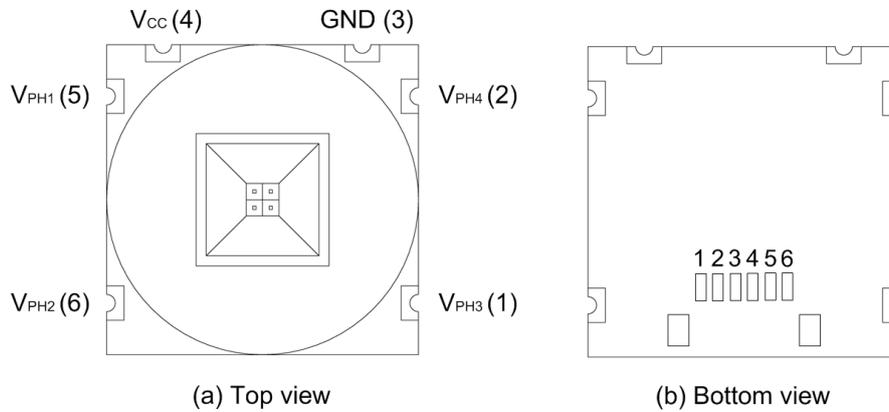


Fig 5. NANO-ISSX pin configuration

Pin	Symbol	Description
1	V_{PH3}	Lower-right photodiode voltage (3)
2	V_{PH4}	Upper-right photodiode voltage (4)
3	GND	Ground
4	V_{cc}	Power supply
5	V_{PH1}	Upper-left photodiode voltage (1)
6	V_{PH2}	Lower-left photodiode voltage (2)

Table 5. Pin description

4. Mechanical drawings

4.1. NANO-ISS60

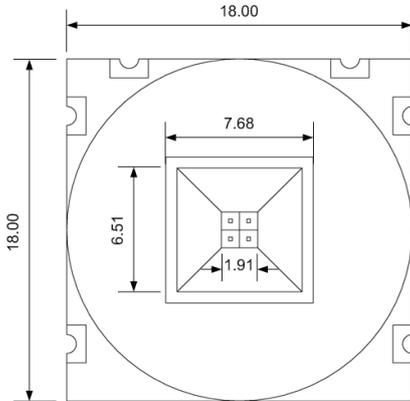


Fig 6. Top view

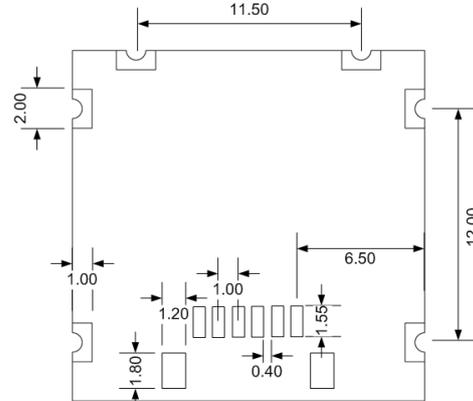


Fig 7. Bottom view



Fig 8. Side view

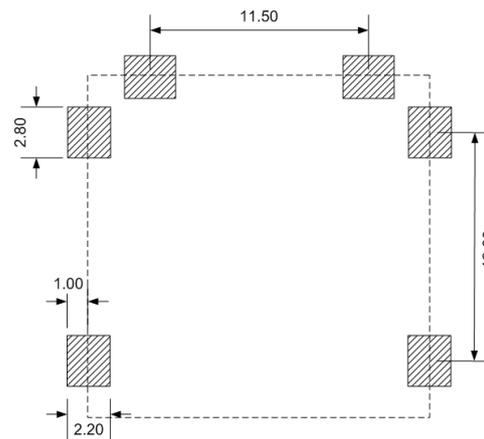


Fig 9. Recommended land pattern

- Notes: (a) Dimensions are in millimetres.
(b) Tolerances are non-cumulative: ± 0.05 mm for all centers.
(c) The dimensions above should serve as a guideline. Contact Solar MEMS Technologies for details.

Dimensions of NANO-ISS25, NANO-ISS15 and NANO-ISS5 versions are the same as NANO-ISS60 except height. See table 1.

4.2. NANO-ISS60-c

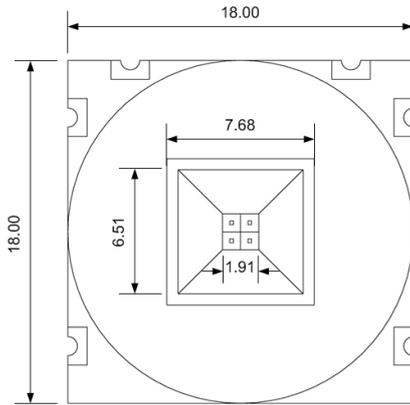


Fig 10. Top view

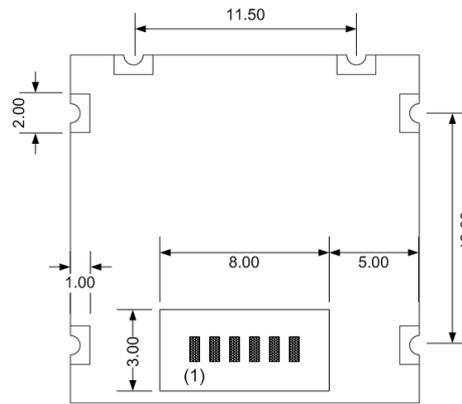


Fig 11. Bottom view

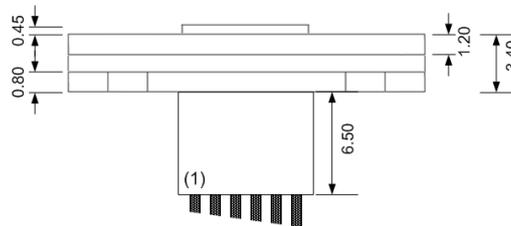


Fig 12. Side view

- Notes:
- (a) Dimensions are in millimetres.
 - (b) Tolerances are non-cumulative: ± 0.05 mm for all centers.
 - (c) The dimensions above should serve as a guideline. Contact Solar MEMS Technologies for details.
 - (d) SH connector supplied is wire-to-board 1 mm pinch crimp style.

Dimensions of NANO-ISS25, NANO-ISS15 and NANO-ISS5 versions are the same as NANO-ISS60 except height. See table 1.

5. Warranty

Solar MEMS Technologies S.L. warrants the NANO-ISSX sun sensor to the original consumer purchaser any product that is determined to be defective for the following terms will be repaired, or replaced.

The warranty is one year from date of purchase.

The product in question must be sent to Solar MEMS Technologies S.L. (address is shown below) within the warranty period and the original consumer purchaser must comply with the following conditions, to be eligible for repair or replacement under this warranty:

- The product must not have been modified or altered in any way by an unauthorized source.
- The product must have been installed in accordance with the installation instructions and the technical specifications.

This limited warranty does not cover:

- Damage due to improper installation;
- Accidental or intentional damages;
- Misuse, abuse, corrosion, or neglect;
- Product impaired by severe conditions, such as excessive wind, ice, storms, lightning strikes or other natural occurrences;
- Damage due to improper packaging on return shipment.

Any and all labor charges for troubleshooting, removal or replacement of the product are not covered by this warranty and will not be honored by Solar MEMS Technologies S.L.

Return shipping to Solar MEMS Technologies S.L. must be pre-paid by the original consumer purchaser. Solar MEMS Technologies S.L. will pay the normal return shipping charges to original consumer purchaser within the European Union countries only.

Address of Solar MEMS Technologies S.L.

Solar MEMS Technologies S.L.
Parque Científico Tecnológico Cartuja 93.
Tecnoincubadora Marie Curie.
C/ Leonardo da Vinci 18, Planta 1, Módulo 2.
C.P. 41092, Seville, Spain.
E-mail: smt@solar-mems.com
Phone: (+34) 954 460 113



Solar MEMS has a system of quality and environment according to the ISO 9001 and ISO 14001 standards, provided by the certification company Applus CTC.