



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO DE AISLAMIENTO
TÉRMICO EN PLANTAS INDUSTRIALES

OPTIMIZATION OF THE CALCULATION OF THERMAL
INSULATION IN INDUSTRIAL PLANT

Autor/es

Julia Alonso Martín

Director/es

Javier Blasco Alberto

Titulación del autor

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura / Universidad de Zaragoza

2021-2022

RESUMEN

Las condiciones de vida del planeta en el que habitamos se están deteriorando rápidamente debido a la contaminación y al uso indiscriminado de recursos naturales. El elevado consumo de energía es uno de los aspectos que más contribuyen a este deterioro.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se desarrolla un programa de cálculo online sobre aislamiento térmico en equipos de plantas industriales, que utiliza como base la normativa más habitual, tanto la europea ISO EN 12241, como la americana ASTM C-680.

Se trata de un software sencillo e intuitivo al alcance de cualquier usuario, con el que se realizan diversos cálculos como son hallar el flujo de calor transferido a través de un elemento, la temperatura superficial exterior, el espesor mínimo de aislante necesario para un determinado forma límite de flujo de calor o temperatura superficial, o la variación longitudinal de temperatura a través de una tubería o de un conducto.

De esta manera, se unifican las dos normas en un solo programa y, adicionalmente, se ha realizado una comparación de resultados entre ambas.

Por otra parte, se ha creado un extenso listado de productos dedicados al aislamiento térmico de las empresas punteras en el sector a nivel internacional.

ABSTRACT

The life conditions of the planet we inhabit are rapidly deteriorating due to pollution and the indiscriminate use of natural resources. High energy consumption is one of the aspects that most contributes to this deterioration.

In this Final Degree Project, an online calculation program on thermal insulation in industrial plant equipment is developed, which uses the most common regulations as a basis, both the European ISO EN 12241 and the American ASTM C-680.

It is a simple and intuitive software available to any user, with which various calculations are carried out, such as finding the heat flow transferred through an element, the external surface temperature, the minimum thickness of insulation necessary for a certain shape heat flux limit or surface temperature, or the longitudinal variation of temperature through a pipe or duct.

In this way, the two standards are unified in a single program and, in addition, a comparison of results between the two has been made.

On the other hand, an extensive list of products dedicated to thermal insulation has been created by leading companies in the sector at an international level.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Objetivo	6
1.2. Motivación.....	6
1.3. Metodología.....	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Transferencia de calor.....	7
2.2. Aislamiento térmico.....	7
2.3. Normas.....	8
2.3.1. Elementos en una planta industrial	8
2.3.2. Coeficiente superficial de transferencia de calor	9
2.3.3. Resistencia térmica.....	12
2.3.4. Flujo de calor	13
2.3.5. Temperatura superficial exterior.....	13
2.3.6. Variación de la temperatura longitudinal en una tubería o conducto.....	13
3. BASE DE DATOS DE AISLANTES COMERCIALES.....	14
4. REVISIÓN DE LOS PROGRAMAS DE CÁLCULO EXISTENTES.....	15
4.1. TechCalc	15
4.2. CINICalc	16
5. TIPOS DE CÁLCULO.....	16
5.1. Flujo de calor y temperatura superficial exterior.....	16
5.2. Espesor de aislamiento para un valor límite de flujo de calor.....	17
5.3. Espesor de aislamiento para un valor límite de temperatura superficial exterior	17
5.4. Variación longitudinal de temperatura en una tubería o conducto	17
6. SOFTWARE DE CÁLCULO ONLINE.....	18
7. RESULTADOS	24
7.1. Comparación con CINICalc	24
7.2. Comparativa entre la ISO 12241 y la ASTM C-680	25
7.2.1. Pared.....	25
7.2.2. Tubería.....	26
7.2.3. Tanque esférico	27
7.2.4. Tanque cilíndrico	28
8. CONCLUSIONES	29

9. LÍNEAS FUTURAS.....	29
BIBLIOGRAFÍA	30
ÍNDICE DE TABLAS	31
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	31

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de un programa online de cálculo, al alcance de cualquier usuario, con el que poder realizar diversos cálculos sobre aislamiento térmico en componentes de plantas industriales. Los cálculos del programa se basan en dos normas: la europea ISO 12241 y la americana ASTM C-680.

Adicionalmente, también se busca una comparación y validación de ambas normas.

Por último, otro de los objetivos es investigar en el campo de los aislantes comerciales y realizar un extenso listado con los productos dedicados al aislamiento térmico de las empresas punteras en el sector a nivel mundial.

1.2. Motivación

Un tema muy presente y de gran importancia en la actualidad es el ahorro energético, además de la disminución del impacto ambiental. Por ello, el aislamiento térmico en la industria es de alto interés. Además, este es necesario para proporcionar seguridad en el ambiente de trabajo a los operarios.

La motivación para realizar este Trabajo de Fin de Grado es aprender e instruirme más en este sector y realizar un programa de cálculo completo, sencillo e intuitivo relacionado con el aislamiento térmico en la industria.

1.3. Metodología

La metodología seguida para el presente proyecto se divide en tres partes diferenciadas:

- **Análisis de normas y creación de casos de cálculo**
 - Estudio y análisis de las normas ISO 12241 y ASTM C-680, extracción de sus fórmulas y planteamiento de diversos casos de cálculo.
 - Autoaprendizaje del lenguaje de programación PHP.
 - Programación de los cálculos en PHP.
 - Validación de las normas entre ellas y con otros programas de aislamiento comerciales a partir de los casos de cálculo creados.

- **Desarrollo de la interfaz gráfica**
 - Autoaprendizaje de los lenguajes HTML, CSS y JavaScript.
 - Creación y diseño de la interfaz gráfica, con sus correspondientes formularios y conexión con los distintos casos de cálculo.

- **Creación de base de datos de aislamientos comerciales**
 - Búsqueda en el tema de aislamiento y revestimientos comerciales en empresas internacionales.
 - Realización de la base de datos sobre aislantes.

2. MARCO TEÓRICO

En este punto se van a explicar brevemente los conceptos teóricos en los que se basa el Trabajo de Fin de Grado.

2.1. Transferencia de calor

La transferencia de calor es el intercambio de energía debido a un gradiente térmico. Esta transmisión siempre se produce de la parte que presenta una mayor temperatura a la de menor. Existen tres mecanismos de transferencia de calor:

- **Conducción:** Ocurre por contacto entre sólidos y se produce debido a los choques entre partículas, las cuales ceden parte de su energía cinética entre ellas.
- **Convección:** Sucede entre un sólido y un fluido que se encuentran a diferente temperatura y se transmite el calor en el fluido como consecuencia del movimiento de partículas en su seno. Se pueden producir dos tipos de convección en función de cómo se genera el movimiento del fluido:
 - **Convección natural o libre:** El gradiente de temperatura produce un gradiente de densidad en el fluido que, debido al efecto de la gravitación, genera un desplazamiento de masas de fluido en el propio fluido.
 - **Convección forzada:** Una fuerza exterior, no relacionada con la temperatura del fluido, mueve el fluido sobre una superficie a una temperatura diferente.
- **Radiación:** Es debida a la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, que se propaga a la velocidad de la luz.

Para reducir la transferencia de calor en un elemento, se usan los aislantes térmicos.

2.2. Aislamiento térmico

Un material aislante térmico se caracteriza por tener una conductividad térmica muy baja y, por lo tanto, una elevada resistencia térmica. En la realidad nunca va a existir un aislante perfecto, pero sí que reduzca de forma considerable el flujo de calor transferido a través de un elemento.

La conductividad térmica es una propiedad intrínseca de cada material y, cabe destacar, que varía en función de la temperatura: a mayor temperatura el material conduce peor.

Por otra parte, es importante y necesario que el aislamiento esté protegido de la corrosión, lo cual se consigue mediante la adición de un revestimiento exterior, mayormente conocido como “cladding”. Consiste en añadir una capa de un espesor adecuado del material resistente escogido. Además de impedir que penetre el agua, también protege al aislante de tensiones o cargas mecánicas, abrasión u otros fenómenos.

2.3. Normas

Los cálculos sobre aislamiento térmico que se realizan en el presente proyecto se basan en las dos normas siguientes:

- EN ISO 12241:2008 “Thermal insulation for building equipment and industrial installations - Calculation rules”
- ASTM C-680 “Standard Practice for Estimate of the Heat Gain or Loss and the Surface Temperatures of Insulated Flat, Cylindrical, and Spherical Systems by Use of Computer Programs”

Tanto ISO como ASTM son dos organismos mundialmente conocidos que desarrollan normas a nivel internacional de consenso voluntario.

ISO significa “International Organization for Standardization”. Una norma EN ISO indica que se trata de una norma europea, que ha sido adaptada de una ISO.

Por otra parte, las siglas ASTM significan “American Society for Testing and Materials”.

Ambas normas proporcionan reglas para realizar cálculos relacionados con la transferencia de calor en equipos de plantas industriales. Siguen un mismo procedimiento de cálculo, pero cada una con sus ecuaciones correspondientes, por lo que al final se realiza una comparación de resultados.

Las dos toman las siguientes hipótesis:

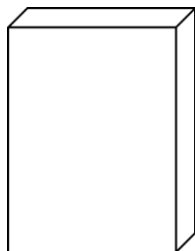
- Estado estacionario.
- Gradiente de temperatura y flujo de calor unidimensionales, es decir, existen en una sola dirección.
- Temperatura constante en los planos perpendiculares a esa dirección.

A continuación, se explican diversos apartados que comprenden las normas y las similitudes o diferencias entre ellas. En el ANEXO I se indican explícitamente las fórmulas que proporcionan.

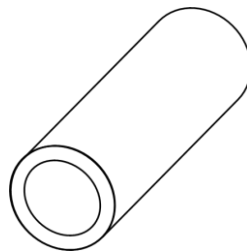
2.3.1. Elementos en una planta industrial

En primer lugar, se considera que los elementos básicos que se pueden encontrar en una planta industrial son los que se muestran a continuación:

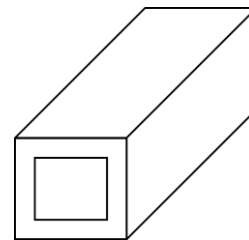
Pared



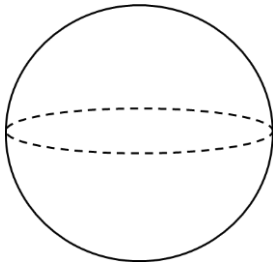
Tubería



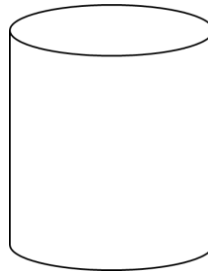
Conducto



Tanque esférico



Tanque cilíndrico



Tanque cúbico

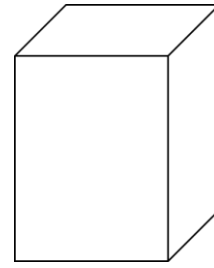


Ilustración 1. Elementos en una planta industrial.

La norma ISO indica cómo realizar los cálculos en paredes planas, cilindros huecos, esferas huecas y conductos de sección rectangular. A semejando dichas figuras a los componentes industriales comentados anteriormente, los cálculos se van a efectuar en los seis elementos. Se consideran el tanque cilíndrico como una tubería (cuerpo) y dos paredes (tapas superior e inferior), y el tanque cúbico como un conducto (cuerpo) y dos paredes (tapas). Por lo tanto, en los dos últimos, se efectúa un cálculo para el cuerpo y otro para las tapas.

Por otra parte, la norma ASTM explica los cálculos a realizar en paredes planas, cilindros huecos y esferas huecas. A diferencia de la norma europea, esta no tiene en consideración los conductos de sección rectangular. Por lo tanto, en este caso se van a descartar los cálculos para conductos y tanques cúbicos. Para el tanque cilíndrico se procederá exactamente igual que lo explicado en la ISO.

2.3.2. Coeficiente superficial de transferencia de calor

El coeficiente superficial de transferencia de calor, h , cuantifica la influencia de las propiedades del fluido, el flujo y la superficie cuando se produce transferencia de calor por los tres mecanismos. Se mide en $\frac{W}{m^2 K}$.

$$h = h_c + h_r \quad (1)$$

Donde h_c es la parte debida a la convección y la conducción y h_r la parte debida a la radiación.

En primer lugar, la parte debida a la radiación depende de la temperatura de la superficie exterior, la temperatura ambiente y la emisividad del revestimiento. En ambas normas se termina usando la ecuación mostrada a continuación, cada una con su nomenclatura correspondiente.

$$h_r = \frac{\sigma \varepsilon (T_{sup}^4 - T_{amb}^4)}{T_{sup} - T_{amb}} \quad (2)$$

Constante de Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

Con respecto al coeficiente superficial de transferencia de calor por convección y conducción, no existe una solución analítica que englobe a la mayoría de las situaciones, por lo que la solución se basa en datos experimentales a través de correlaciones. Las ecuaciones de carácter empírico son distintas y dependen de diferentes factores para cada norma.

En este coeficiente existe una diferencia entre el coeficiente superficial de transferencia de calor interior, h_{int} , y el exterior, h_{ext} . El primero se asume que tiene un valor muy elevado, tal que la resistencia de la superficie interior es nula, $R_{sup\ int} = 0$, y la temperatura de la superficie interior es la misma que la del fluido.

$$R_{sup\ int} = \frac{1}{h_{int}} = 0 \quad (3)$$

En ambas normas, se considera que el fluido ambiente es siempre aire.

La EN ISO 12241 consta de ocho fórmulas distintas que se aplican una u otra en función de varios factores:

- Tipo de elemento.
- Localización: interior o exterior de un edificio. Cuando se trata de un elemento situado en el exterior, se tiene en cuenta la velocidad del aire. Mientras que, si el elemento se sitúa en el interior, la ecuación depende de la diferencia de temperatura absoluta entre la superficie exterior y el ambiente y, las ecuaciones para interior solo se pueden aplicar para esta diferencia menor de 100 K.
- Orientación: horizontal o vertical. Esto solo influye para las tuberías localizadas en interior, el resto de elementos no dependen de ello.
- Flujo de aire: laminar o turbulento.

En cuanto a la ASTM C-680, el coeficiente superficial de transferencia de calor debido a convección y conducción depende del número adimensional de Nusselt, la conductividad térmica del fluido ambiente y la dimensión característica del elemento:

$$\bar{h}_c = \frac{\overline{Nu} k_f}{Dim} \quad (4)$$

Para calcular el número de Nusselt, la norma proporciona once ecuaciones distintas que se aplican según una serie de factores:

- Tipo de elemento.
- Tipo de convección: forzada o natural.
- Orientación: horizontal o vertical. Para el tanque esférico, este factor no influye.
- Tipo de flujo de aire: laminar o turbulento.

Previamente, es necesario obtener el valor de algunas propiedades del fluido ambiente a través de las fórmulas proporcionadas por la norma. Las propiedades del aire varían con la temperatura, por lo que las fórmulas dependen de esta. En el caso de la esfera con convección forzada, depende de la temperatura ambiente, a diferencia del resto de casos, en los que se tiene en cuenta únicamente la temperatura de película, la cual es la media entre la temperatura superficial exterior y la temperatura ambiente.

A partir de las propiedades del aire, se hallan los números adimensionales de Rayleigh, Reynolds y Prandtl y, en consecuencia, el número de Nusselt.

En ambas normas se identifica un tipo de flujo u otro dependiendo de qué condiciones se cumplen. A continuación, se describe el funcionamiento de cada tipo de flujo:

En el flujo laminar las diferentes capas del fluido discurren de forma ordenada, en dirección paralela a la dirección del movimiento y sin mezclarse entre ellas. Esto se debe a que las fuerzas viscosas predominan sobre las de inercia. Una partícula de fluido no cambia su trayectoria en la interacción viscosa con otras partículas, ya que es frenada por las partículas más lentas y acelerada por las más rápidas.

Por otra parte, en el flujo turbulento las fuerzas de inercia predominan sobre las viscosas. Además de ser arrastrada por la interacción viscosa con otras partículas, también existen intercambios de cantidad de movimiento que la desplazan por su trayectoria, originando un fuerte intercambio de cantidad de movimiento entre las distintas capas del fluido, generando turbulencia.

En la siguiente tabla se indica, según norma y elemento, la dimensión característica usada de cada elemento para realizar los cálculos del coeficiente por convección y conducción.

Elemento	ISO 12241	ASTM C-680
Pared	➤ <i>Altura, H</i>	➤ <i>Altura, L</i> ➤ Excepción: caso de convección natural y orientación horizontal: $Dim = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}}$ $= \frac{LH}{2L + 2H}$ Siendo <i>H</i> la anchura
Tubería	➤ <i>Diámetro exterior, D_e</i>	➤ <i>Diámetro exterior, D_e</i> ➤ Excepción: caso de convección natural y orientación vertical: <i>Longitud, L</i>
Tanque esférico	➤ <i>Diámetro exterior, D_e</i>	➤ <i>Diámetro exterior, D_e</i>
Conducto	➤ <i>Perímetro exterior, P_e</i>	-0-

Tabla 1. Dimensiones características de cada elemento para las normas ISO 12241 y ASTM C-680.

Para calcular tanto el diámetro exterior como el perímetro externo, son necesarios esos mismos datos en el interior y el espesor de aislante:

$$D_e = D_i + 2d \quad (5)$$

$$P_e = P_i + 8d \quad (6)$$

2.3.3. Resistencia térmica

La resistencia térmica es la capacidad de un material de oponerse al paso de un flujo de calor producido por un gradiente térmico.

Seguidamente, se explica el procedimiento de cálculo de la resistencia térmica para un elemento con una capa de aislamiento:

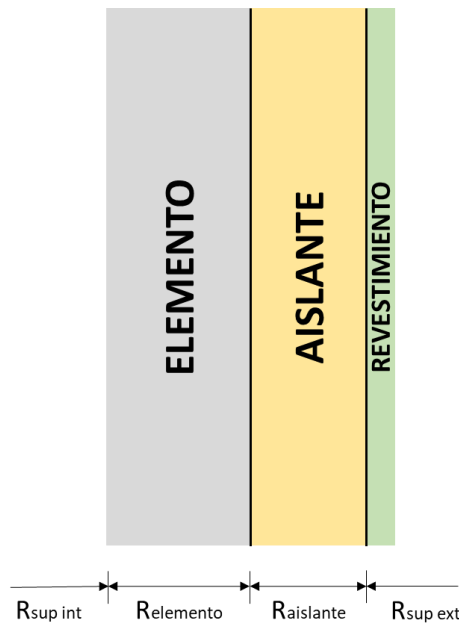


Ilustración 2. Resistencias térmicas en un elemento con una capa de aislamiento.

Cada parte tiene una resistencia térmica asociada y, cuando intervienen varias resistencias en serie, se obtiene el valor de la total mediante la suma de todas ellas.

$$R_T = R_{sup\ int} + R_{elemento} + R_{aislante} + R_{sup\ ext} \quad (7)$$

Como ya se ha explicado anteriormente, $R_{sup\ int}$ se considera igual a cero.

Los materiales de los que están fabricados los elementos a aislar presentan conductividades térmicas muy elevadas, dando lugar a resistencias térmicas muy pequeñas. Por ello, la resistencia asociada al elemento, $R_{elemento}$, se suele despreciar.

Con respecto a la resistencia térmica del aislante, $R_{aislante}$, las normas proporcionan diversas ecuaciones para calcularla dependiendo del tipo de elemento del que se trate. Esta siempre es inversamente proporcional a la conductividad térmica del material aislante, además de depender del espesor y dimensiones del aislamiento.

Por último, la resistencia térmica de la superficie exterior $R_{sup\ ext}$ se calcula como el inverso del coeficiente superficial de transferencia de calor exterior.

$$R_{sup\ ext} = \frac{1}{h_{ext}} = 0 \quad (8)$$

Por lo tanto, la resistencia total asociada para todos los elementos con una sola capa de aislante resulta:

$$R_T = R_{aislante} + R_{sup\ ext} \quad (9)$$

2.3.4. Flujo de calor

El valor de la resistencia térmica total permite calcular el flujo de calor que se produce por una diferencia de temperatura:

$$q = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (10)$$

En el caso de la EN ISO 12241, la variación de temperatura es entre las superficies interior y exterior:

$$\Delta T = T_{si} - T_{se} \quad (11)$$

Sin embargo, la ASTM C-680 toma la diferencia entre la temperatura del fluido que circula por el interior y la temperatura del fluido ambiente externo:

$$\Delta T = T_{int} - T_{amb} \quad (12)$$

2.3.5. Temperatura superficial exterior

El cálculo de la temperatura de la superficie exterior depende de la temperatura ambiente, la resistencia de la superficie exterior y la temperatura del fluido que circula por el interior.

$$T_{se} = T_{amb} + R_{sup\ ext} \left(\frac{T_{int} - T_{amb}}{R_T} \right) \quad (13)$$

2.3.6. Variación de la temperatura longitudinal en una tubería o conducto

En ciertos procesos, se debe controlar que la temperatura del fluido no disminuya de un determinado valor. Para ello, la norma ISO 12241 indica como calcular la variación de la temperatura longitudinal en tuberías o conductos, es decir la diferencia que existe entre la temperatura final del fluido θ_{fm} y la temperatura ambiente θ_a .

$$|\theta_{fm} - \theta_a| = |\theta_{im} - \theta_a| e^{-\alpha l} \quad (14)$$

Donde α es el coeficiente de caída de temperatura longitudinal, el cual depende de la transmitancia térmica de la tubería o conducto, y el flujo másico y el calor específico del fluido que circula por el interior.

$$\alpha = \frac{U_{T,l} 3,6}{\dot{m} c_p} \quad (15)$$

Por otra parte, la transmitancia térmica, U , es el inverso de la resistencia térmica total. Esta es la medida del calor que fluye por un material que presenta un gradiente de temperatura.

$$U_{T,l} = \frac{1}{R_T} \quad (16)$$

3. BASE DE DATOS DE AISLANTES COMERCIALES

En general, los materiales aislantes se pueden clasificar en tres grupos según su composición:

- **Lanas minerales:** Se compone de filamentos o fibras de diámetro diminuto de materiales pétreos formando un fieltro que mantiene el aire inmóvil entre ellas. Es un tipo de aislamiento muy eficaz ya que, además de ofrecer un buen aislamiento térmico, también proporciona aislamiento acústico y presentan un elevado nivel de protección contra el fuego.

Los aislamientos de este tipo más utilizados son la lana de roca (SW) y la lana de vidrio (GW). La primera se fabrica a partir de roca volcánica y la segunda fundiendo arena a altas temperaturas y uniendo las fibras de vidrio con resina o aglomerante.

- **Aislantes sintéticos:** Compuestos por materiales sintéticos, polímeros procedentes del petróleo. Los más comunes son el poliestireno expandido (EPS), poliestireno extruido (XPS), poliuretano y polietileno.
- **Aislantes naturales:** Se trata de un tipo de aislante más ecológico, ya que no contiene sustancias ni aditivos y son reciclables y biodegradables. Los más comunes son corcho, lino, celulosa, lana de oveja, arlita, perlita, vermiculita, fibra de coco y algodón.

Existen una infinidad de industrias que se dedican a la fabricación y comercio de materiales aislantes. Se han recopilado los datos sobre los productos que ofrecen tres de ellas punteras en el sector a nivel mundial: PAROC, ISOVER y KNAUF INSULATION. Todos los productos destinados al aislamiento térmico de PAROC y KNAUF INSULATION están hechos de lana de roca y los de ISOVER además de lana de roca, también ofrece otros de lana de vidrio.

En la base de datos se han reflejado las propiedades principales relacionadas con el aislamiento térmico:

- **Nombre del fabricante:** En este caso PAROC, ISOVER O KNAUF INSULATION
- **Nombre del producto:** Según el nombre que proporciona el fabricante.
- **Tipo de producto:** Los aislantes se pueden presentar de diversas formas: placas o paneles rígidos, paneles no rígidos, rollos, mantas o granulado/suelto.
- **Material:** Se indica el material del que está compuesto.
- **Densidad:** Densidad del material en kilogramos por metro cúbico.
- **Conductividad térmica:** Esta varía con la temperatura, por lo que para cada producto se asocia con una tabla que relaciona temperaturas y conductividades. Se mide en W/m K.
- **Máxima temperatura de servicio:** Es la máxima temperatura que puede soportar el producto sin que se degraden sus propiedades. Indicada en grados centígrados.

Para cada fabricante, se han agrupado distintos tipos de producto con las mismas propiedades (material, densidad, conductividad térmica y máxima temperatura de servicio) para unificar y simplificar esta base de datos.

En el ANEXO II se puede ver con detalle la base de datos recopilada sobre aislantes comerciales.

4. REVISIÓN DE LOS PROGRAMAS DE CÁLCULO EXISTENTES

Existen diversos softwares para realizar cálculos relacionados con el aislamiento térmico con los que poder comparar el desarrollado en el presente proyecto.

4.1. TechCalc

TechCalc es una herramienta de cálculo desarrollada por ISOVER y su nombre completo es “Thermal Calculation Software for Technical Insulation”. Se puede usar de forma online o descargar la aplicación.

Este permite realizar cálculos simples de aislamiento térmico en la industria, HVAC¹ y aplicaciones de marina en elementos tales como tuberías, paredes, conductos, tanques, recipientes y calderas. Se basa en las fórmulas y condiciones dadas por las normas ISO 12241, ISO 23993 y VDI 2055.

En concreto, según indica ISOVER en su página web, recoge todos los posibles cálculos que aparecen en la norma ISO 12241:

¹ Heating, Ventilation and Air Conditioning.

- Flujo de calor y temperatura superficial.
- Espesor requerido de aislamiento en función del flujo de calor y/o la temperatura superficial.
- Aislamiento mínimo para prevenir la condensación superficial.
- Caída de temperatura para líquidos en reposo.
- Efecto de la humedad en los valores de U y R en tuberías de refrigeración y enfriamiento.
- Cálculo del tiempo de congelación del agua en una tubería.
- Cálculo de los costes de operación, reducción de CO₂ y amortización de la instalación del aislamiento.

Dispone de un amplio conjunto de bases de datos de productos, materiales y revestimientos mediante el que se consigue obtener un resultado rápido y preciso.

4.2. CINICalc

CINICalc es un programa de pago desarrollado por CINI² mediante la que se pueden realizar los siguientes cálculos:

- Espesor de aislamiento económico.
- Pérdida de energía y emisión de CO₂ en sistemas aislados y no aislados.
- Cambios de temperatura en el fluido.

Todos ellos se basan en normas internacionales: ISO 12241 para el cálculo del espesor del aislamiento e ISO 23993 para el factor de conversión.

Dispone de una base de datos con los aislantes más actuales para que el usuario pueda seleccionarlos y sus conductividades están determinadas de acuerdo a la norma EN 12667.

5. TIPOS DE CÁLCULO

A continuación, se presentan los diversos casos de cálculo desarrollados en el software.

5.1. Flujo de calor y temperatura superficial exterior

El objetivo es hallar el flujo de calor que se transfiere a través del elemento aislado y la temperatura en su superficie exterior. Este se puede considerar el caso principal y, a partir de él, se obtendrán los siguientes.

Las variables de entrada son prácticamente las mismas para ambas normas. Se indican a continuación:

- Datos del elemento: tipo, dimensiones, orientación.

² Committee INdustrial Insulation Standards.

- Condiciones del ambiente y del fluido: localización (ISO) o tipo de convección (ASTM), temperatura del fluido, temperatura del ambiente, velocidad del aire.
- Datos del aislamiento: espesor, conductividad térmica, emisividad del revestimiento.

Para aplicar las fórmulas correspondientes, independientemente de la norma, es necesaria la temperatura de la superficie exterior, siendo esta uno de los datos que se va a obtener como resultado. Por lo tanto, se trata de suponer dicha temperatura, realizar los cálculos y reiterar hasta que el error absoluto entre la temperatura supuesta y la obtenida sea mínimo.

5.2. Espesor de aislamiento para un valor límite de flujo de calor

A la hora de diseñar un sistema de aislamiento puede interesar limitar la pérdida o ganancia de calor, ya sea por razones técnicas, energéticas o económicas.

Mediante este cálculo se halla el mínimo espesor necesario de aislante para evitar que exista un flujo de calor mayor que el valor límite impuesto.

Se realizan los mismos cálculos que en el primer caso, pero probando con distintos espesores yendo de menor a mayor. Cuando se cumple la condición de calor límite, se deja de probar con más espesores. Si no se cumple para ningún espesor, entonces el material aislante no es válido y hay que cambiarlo por otro distinto.

5.3. Espesor de aislamiento para un valor límite de temperatura superficial exterior

Por otra parte, también puede interesar limitar la temperatura de la superficie exterior cuando el componente contenga un fluido caliente, para proporcionar una mayor seguridad al personal de la planta. Si, al contrario, encierra un fluido frío, conviene limitar y tener controlada esta temperatura para evitar la condensación.

En cuestión de cálculos y programación, el tercer caso es muy similar al anterior ya que se realiza exactamente el mismo procedimiento, pero esta vez el valor límite impuesto es la temperatura superficial exterior. Sucede lo mismo, si no se cumple la condición de temperatura para ningún espesor, el material aislante no es válido y se ha de cambiar por otro.

5.4. Variación longitudinal de temperatura en una tubería o conducto

Por último, también es interesante controlar y conocer la variación de temperatura del fluido durante el proceso para evitar que se salga de su rango operativo.

Este cálculo solo se ha implementado para la norma ISO 12241, ya que la ASTM C-680 no proporciona las reglas necesarias para ello, y se aplica únicamente en tuberías o conductos.

Simplemente se realiza el primer tipo de cálculo y, al finalizar, se aplican las dos ecuaciones adicionales indicadas en el punto 2.3.6 con las que se calcula la diferencia entre la temperatura final del fluido y la temperatura ambiente.

6. SOFTWARE DE CÁLCULO ONLINE

En primer lugar, los cuatro cálculos expuestos en el apartado anterior se han implementado en el lenguaje de programación PHP.

Para ello, se han creado dos archivos PHP: uno que almacena las fórmulas indicadas en el ANEXO I y otro en el que se desarrollan los diversos cálculos descritos anteriormente.

En cuanto al primero, para cada fórmula se ha escrito una función distinta, componiendo así un total de 70 funciones. La mayoría de fórmulas se usan un número elevado de veces y, de esta forma, queda un programa menos tedioso y más limpio.

Con respecto al segundo, se ha actuado de forma similar, para cada caso de cálculo se ha desarrollado una función diferente que llama a las fórmulas del otro archivo. Hay un total de 32 funciones, una para cada elemento, caso y norma aplicada.

Posteriormente, se ha desarrollado la interfaz gráfica en la que el usuario debe introducir los datos para realizar los cálculos y el programa devuelve los resultados. Se ha realizado mediante el lenguaje de programación de etiquetas HTML. Además, con CSS se le ha dado formato y con JavaScript se han añadido las animaciones necesarias.

La página principal muestra los diferentes casos de cálculo que se pueden realizar según una norma u otra. El usuario escoge qué norma desea seguir y qué cálculo realizar clicando con el ratón sobre él, y la página le lleva a otra pantalla en la que se muestra un formulario donde introducir las variables de entrada.

Cálculos sobre aislamiento térmico

Norma ISO 12241

- [Cálculo del flujo de calor y la temperatura superficial exterior](#)
- [Cálculo del espesor de aislamiento para un valor límite de flujo de calor](#)
- [Cálculo del espesor de aislamiento para un valor límite de temperatura superficial exterior](#)
- [Cálculo de la variación longitudinal de temperatura en una tubería o un conducto](#)

Norma ASTM C-680

- [Cálculo del flujo de calor y la temperatura superficial exterior](#)
- [Cálculo del espesor de aislamiento para un valor límite de flujo de calor](#)
- [Cálculo del espesor de aislamiento para un valor límite de temperatura superficial exterior](#)

Ilustración 3. Página principal del software.

Para cada caso de cálculo se han creado dos archivos: un formulario de HTML para que el usuario introduzca los datos y, otro archivo que recoge dichos datos y llama a las funciones correspondientes del archivo PHP para realizar los cálculos.

Por lo tanto, se han implementado 15 archivos para el desarrollo de la interfaz gráfica: uno para la página principal, 7 para los formularios y otros 7 para la recogida de datos y ejecución de los cálculos.

Para los distintos tipos de cálculo existentes, la pantalla que muestra el formulario es prácticamente igual, simplemente cambia alguna de las variables de entrada en función del caso y de la norma aplicada, como ya se ha explicado anteriormente.

A continuación, se muestran los formularios para cada caso de la norma ISO 12241. Los de la ASTM C-680 son similares, con sutiles diferencias sobre las variables de entrada, ya explicadas en el punto 2.3.

- **Cálculo del flujo de calor y la temperatura superficial**

Cálculo del flujo de calor y la temperatura superficial

Según la norma ISO 12241

Datos del elemento

Elemento de cálculo ▼

Orientación Horizontal Vertical

Diámetro exterior (D_e) m

Longitud (l) m

Condiciones del ambiente y del fluido

Localización Interior Exterior

Temperatura del fluido (θ_i) °C

Temperatura ambiente (θ_a) °C

Velocidad del aire (v) m/s * Dato necesario solo si se encuentra en el exterior

Datos del aislamiento

Espesor (d) m

Conductividad térmica (λ) W/m·K

Coefficiente de emisividad del revestimiento (ϵ)

Sí quiero ver el procedimiento de cálculo

Ilustración 4. Formulario del software para el cálculo del flujo de calor y de la temperatura de la superficie exterior con la norma ISO 12241.

- **Cálculo del espesor de aislamiento para un valor límite de flujo de calor**

Cálculo del espesor de aislamiento para un valor límite de flujo de calor

Según la norma ISO 12241

Datos del elemento

Elemento de cálculo ▼

Orientación Horizontal Vertical

Diámetro exterior (D_e) m

Longitud (l) m

Condiciones del ambiente y del fluido

Localización Interior Exterior

Temperatura del fluido (θ_i) °C

Temperatura ambiente (θ_a) °C

Velocidad del aire (v) m/s * Dato necesario solo si se encuentra en el exterior

Datos del aislamiento

Conductividad térmica (λ) W/m·K

Coefficiente de emisividad del revestimiento (ε)

Valores límite

Flujo de calor máximo (q_{lim}) W/m

Sí quiero ver el procedimiento de cálculo

Ilustración 5. Formulario del software para el cálculo del espesor de aislamiento para un valor límite de flujo de calor con la norma ISO 12241.

- **Cálculo del espesor de aislamiento para un valor límite de temperatura superficial exterior**

El formulario en este caso es idéntico al anterior, con la diferencia del último recuadro, en el que hay que introducir el valor límite de la temperatura en lugar del flujo de calor máximo.

- Cálculo de la variación longitudinal de temperatura en una tubería o conducto

Cálculo de la variación longitudinal de temperatura en una tubería o un conducto

Según la norma ISO 12241

Datos del elemento

Elemento de cálculo ▼

Orientación Horizontal Vertical

Diámetro exterior (D_e) m

Longitud (l) m

Condiciones del ambiente y del fluido

Localización Interior Exterior

Temperatura del fluido (θ_i) °C

Flujo másico del fluido (m_{dot}) kg/h

Calor específico del fluido (c_p) kJ/kg·K

Temperatura ambiente (θ_a) °C

Velocidad del aire (v) m/s * Dato necesario solo si se encuentra en el exterior

Datos del aislamiento

Espesor (d) m

Conductividad térmica (λ) W/m·K

Coefficiente de emisividad del revestimiento (ϵ)

Sí quiero ver el procedimiento de cálculo

Ilustración 6. Formulario del software para el cálculo de la variación longitudinal de la temperatura en una tubería o conducto con la norma ISO 12241.

Este formulario solo aparece para la norma ISO 12241, como se ha comentado anteriormente, la ASTM no proporciona reglas para realizar el cálculo.

Además de las variables de entrada del primer caso, se añade el flujo másico y el calor específico del fluido que circula por el interior.

Cabe destacar que se puede seleccionar una casilla para que muestre todo el procedimiento de cálculo. Si se marca, se muestran las fórmulas usadas según su numeración en la norma y con la misma nomenclatura, los resultados obtenidos paso a paso y todo el procedimiento. Esto es de gran importancia a la hora de poder comprobar y revisar los cálculos, y validar los resultados.

Finalmente, tras introducir todos los datos y darle a Enviar, se muestra una tercera pantalla distinta donde aparecen los resultados, con o sin procedimiento de cálculo. Esto se lleva a cabo mediante el archivo de recogida de datos y llamamiento de funciones comentado anteriormente.

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo, los resultados en un cuadro con borde rojo y una parte del procedimiento.

Cálculo del flujo de calor y la temperatura superficial

Según la norma ISO 12241

TUBERÍA

Temperatura superficial (θ_{se}) = 25.54 °C

Flujo de calor (q_1) = 387.05 W/m (1935.25 W)

Calor total (Q) = 1935.25 W

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

ITERACIÓN Nº 0

Fórmula 19: $a_r = (T1^4 - T2^4)/(T1 - T2) = 204498572.361 [K^3]$

Fórmula 21: $C_r = \epsilon \cdot \sigma = 1.134E-8 [W/m^2 \cdot K^4]$

Fórmula 18: $h_r = a_r \cdot C_r = 2.3190138105737 [W/m^2 \cdot K]$

Fórmula 29 verificación: $v \cdot D_e > 8,55E-3 [m^2/s] \rightarrow$ Flujo turbulento

Fórmula 29: $h_{cv} = 8,9 \cdot (v^{0,9}) / (D_e^{0,1}) = 62.195613570671 [W/m^2 \cdot K]$

Fórmula 17: $h = h_r + h_{cv} = 64.514627381244 [W/m^2 \cdot K]$

Fórmula 7: $R_1 = \ln(D_e/D_i) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda) = 0.70774090234067 [m \cdot K/W]$

Fórmula 33: $R_{le} = 1 / (h \cdot \pi \cdot D_e) = 0.0013705327988074 [m \cdot K/W]$

Fórmula 6: $q_1 = (\theta_{si} - \theta_{se}) / R_T = 193.90464345418 [W/m]$

Fórmula 48: $\theta_{se} = \theta_a + R_{le} \cdot (\theta_i - \theta_a) / R_T = 25.53150534739 [°C]$

ITERACIÓN Nº 1

Fórmula 19: $a_r = (T1^4 - T2^4)/(T1 - T2) = 106298116.70712 [K^3]$

Ilustración 7. Pantalla de resultados del software.

El programa de cálculo online es libre y se puede acceder a través de la siguiente URL:

<https://rotating.unizar.es/insu/principal.php>

En el ANEXO III se incluyen detalladamente todas las líneas de código que conforman software.

7. RESULTADOS

Por último, se procede a validar el software online de cálculo de aislamiento térmico.

7.1. Comparación con CINICalc

Se ha realizado el cálculo del flujo de calor y de la temperatura superficial exterior con el programa CINICalc y con el programa de cálculo online desarrollado en este Trabajo de Fin de Grado. CINICalc basa sus cálculos en la norma ISO 12241.

Los datos son los siguientes:

- Elemento: Tubería
- Orientación: Horizontal
- Localización: Interior
- Convección: Natural
- Diámetro exterior de la tubería = 0.324 m
- $T_{fluido} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{ambiente} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Velocidad del aire = 3 m/s
- Espesor del aislamiento = 0.2 m
- Conductividad térmica del material aislante = $0.062\frac{W}{m\text{ }K}$
- Emisividad del revestimiento = 0.44

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los dos softwares:

	CINICalc	Software ISO 12241	Software ASTM C-680
Temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$)	31.74	31.15	30.08
Flujo de calor (W/m)	144.65	125.07	130.78

Tabla 2. Resultados del cálculo de flujo de calor y temperatura superficial exterior con CINICalc y el programa de cálculo online.

Para un mayor detalle de los cálculos realizados ver ANEXO IV.

Se observa que las tres temperaturas son prácticamente idénticas, mientras que en el flujo de calor se aprecia una mayor diferencia. Esto puede ser debido a la mayor precisión en el cálculo por parte del programa CINICalc, al número de iteraciones realizadas o a las hipótesis que se hayan tomado. Igualmente, los resultados no difieren demasiado, por lo que se dan por válidas las funciones creadas para el programa de cálculo online.

7.2. Comparativa entre la ISO 12241 y la ASTM C-680

Una vez validado el software, se procede a comparar resultados entre las dos normas para la mayoría de casos.

Se ha realizado el cálculo del flujo de calor y la temperatura superficial exterior para ambas normas en los elementos que tienen en común: pared, tubería, tanque esférico y tanque cilíndrico. En cada elemento se comparan los resultados de localización en interior de la ISO con la convección natural de la ASTM, y la localización exterior con la convección forzada.

Se han considerado los siguientes datos comunes con respecto al fluido, al ambiente y al material aislante:

- $T_{fluido} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{ambiente} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Velocidad del aire = 10 m/s
- Conductividad térmica del material aislante = $0.042 \frac{W}{m \cdot K}$
- Emisividad del revestimiento = 0.1

A continuación, para cada elemento se indica que dimensiones y que espesor de material aislante se han utilizado

7.2.1. Pared

- Alto = 5 m
- Ancho = 7 m
- Espesor del aislamiento = 0.5 m

En la ISO, cuando la pared se localiza en el interior, los cálculos son los mismos independientemente de su orientación. Sin embargo, en la ASTM cuando la convección se produce de forma natural, existe diferencia entre una pared vertical y una horizontal y, además, en el último caso también importa en qué sentido fluye el calor.

Se han realizado los cuatro cálculos y, fijándose en los resultados de temperatura y calor, se aprecia que los datos obtenidos son muy similares. En los tres casos de la ASTM, la diferencia con la ISO es menor de un 3% y, concretamente el resultado que más se ajusta es para la pared en horizontal con el calor fluyendo hacia abajo.

	ISO	ASTM		
	Loc. interior	Conv. natural		
	Vertical / Horizontal	Vertical	Horizontal Calor fluye hacia arriba	Horizontal Calor fluye hacia abajo
$h_r (W/m^2 K)$	0.5839	0.5849	0.5837	0.5897
$h_c (W/m^2 K)$	2.2810	1.8993	2.3494	0.9117
$R_T (m^2 K/W)$	12.2538	12.3073	12.2457	12.5708
Temperatura superficial ($^{\circ}C$)	23.2503	23.5839	23.1994	25.1857
Flujo de calor (W/m^2)	6.2631	6.4189	6.4512	6.2844

Tabla 3. Resultados de una pared localizada en interior para la ISO 12241 y con convección natural para la ASTM C-680.

La otra comparación se muestra en la siguiente tabla y es independiente de la orientación de la pared u otros factores. Se observa que los resultados en ambas normas son prácticamente idénticos.

	ISO	ASTM
	Loc. exterior	Conv. forzada
$h_r (W/m^2 K)$	0.5779	0.5780
$h_c (W/m^2 K)$	26.3408	23.9001
$R_T (m^2 K/W)$	11.9419	11.9456
Temperatura superficial ($^{\circ}C$)	21.2457	21.2701
Flujo de calor (W/m^2)	6.5949	6.6133

Tabla 4. Resultados de una pared localizada en exterior para la ISO 12241 y con convección forzada para la ASTM C-680.

7.2.2. Tubería

- Diámetro exterior de la tubería = 0.4 m
- Largo = 5 m
- Espesor del aislamiento = 0.1 m

En el caso de la tubería, cuando se localiza en interior y la convección es natural, también hay que diferenciar si se encuentra orientada en vertical u horizontal. Se muestran los resultados en la siguiente tabla:

	ISO Loc. interior		ASTM Conv. natural	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
h_r ($W/m^2 K$)	0.6020	0.6029	0.6004	0.5997
h_c ($W/m^2 K$)	2.4468	2.3364	2.6861	2.7966
R_T	1.4242 $m K/W$	1.4297 $m K/W$	3.1082 $m^2 K/W$	3.0984 $m^2 K/W$
Temperatura superficial ($^{\circ}C$)	29.2732	29.5485	28.7337	28.5074
Flujo de calor (W/m)	49.6674	49.2795	55.9015	56.0774

Tabla 5. Resultados de una tubería localizada en interior para la ISO 12241 y con convección natural para la ASTM C-680.

Observando los datos obtenidos, se aprecia que en cada norma los resultados para las dos orientaciones son muy similares, pero al comparar las dos normas hay una diferencia mayor en cuanto al flujo de calor. Respecto a la temperatura, la diferencia es simplemente de 1 $^{\circ}C$ aproximadamente, pero en el flujo de calor llega a variar hasta en un 14% su valor.

A diferencia de ello, para la localización exterior en la ISO y la convección forzada en la ASTM, los resultados difieren muy poco entre las dos normas.

	ISO Loc. exterior	ASTM Conv. forzada
h_r ($W/m^2 K$)	0.5783	0.5803
h_c ($W/m^2 K$)	74.4003	24.9926
R_T	1.5435 $m K/W$	2.9353 $m^2 K/W$
Temperatura superficial ($^{\circ}C$)	21.3621	22.0524
Flujo de calor (W/m)	50.9466	50.7241

Tabla 6. Resultados de tubería localizada en exterior para la ISO 12241 y con convección forzada para la ASTM C-680.

7.2.3. Tanque esférico

- Diámetro exterior del tanque esférico = 5 m
- Espesor del aislamiento = 0.5 m

Solo se realizan dos comparaciones para el tanque esférico, ya que la orientación no influye en ningún caso.

	ISO Loc. interior	ASTM Conv. natural
h_r ($W/m^2 K$)	0.5830	0.5870
h_c ($W/m^2 K$)	2.1730	1.0236
R_T	0.1295 K/W	14.9066 $m^2 K/W$
Temperatura superficial ($^{\circ}C$)	22.9568	24.2905
Flujo de calor (W)	594.8987	599.42

Tabla 7. Resultados de un tanque esférico localizado en interior para la ISO 12241 y con convección natural para la ASTM C-680.

	ISO Loc. exterior	ASTM Conv. forzada
h_r ($W/m^2 K$)	0.5778	0.5790
h_c ($W/m^2 K$)	25.3976	8.6138
R_T	0.1266 K/W	14.2857 $m^2 K/W$
Temperatura superficial ($^{\circ}C$)	21.2123	21.5970
Flujo de calor (W)	622.0791	620.90

Tabla 8. Resultados de tubería localizada en exterior para la ISO 12241 y con convección forzada para la ASTM C-680.

Según se observa en las dos tablas anteriores, los resultados de temperatura superficial y flujo de calor son prácticamente los mismos entre ambas normas, en especial para el caso de localización en exterior y convección forzada.

7.2.4. Tanque cilíndrico

No se han ejecutado los cálculos para el tanque cilíndrico ya que, como se ha explicado anteriormente, se realizan dos cálculos: el cuerpo como si fuera una tubería y las tapas equivalentes a una pared. Y las comparaciones para tubería y pared ya se han efectuado.

Se puede deducir que ambas normas llevan a resultados muy similares y, más todavía cuando el elemento se localiza en el exterior o está sometido a una convección forzada.

8. CONCLUSIONES

El presente Trabajo de Fin de Grado ha tenido dos objetivos principales: desarrollo de un software online de cálculo de aislamiento térmico y creación de una base de datos de aislantes comerciales de varios fabricantes.

En cuanto al primero, se ha creado el programa de cálculo mediante su programación en PHP, desarrollando un total de 102 funciones: 70 para introducir las fórmulas de las normativas y 32 para programar los diferentes tipos de cálculos.

Posteriormente, se ha creado la interfaz gráfica del programa con el lenguaje de programación de etiquetas HTML, componiéndose esta de 15 archivos diferentes: uno para la página principal, 7 formularios para introducir datos y 7 archivos para su recogida y realización de los cálculos.

Todos los cálculos se basan en las normas internacionales ISO 12241 y ASTM C-680. Se han estudiado y analizado dichas normas, adquiriendo sus hipótesis y ecuaciones para realizar los cálculos. Es decir, se ha desarrollado un programa de cálculo en el que se han unificado ambas normas, el usuario tiene a su disposición las dos para realizar cualquiera de los cálculos.

Adicionalmente, se han comparado resultados entre ambas normas y se ha comprobado que los datos obtenidos son muy similares, como era de esperar. Cabe destacar que, cuando se trata de elementos de plantas industriales localizados en el exterior o se produce una convección forzada, los resultados de ambas normas son todavía más próximos entre sí.

Para terminar de validar el programa, se ha realizado el cálculo del flujo de calor y la temperatura superficial exterior con CINICalc y se ha comparado con el mismo cálculo ejecutado con el software del presente TFG.

Con respecto a la base de datos de aislantes comerciales, investigando los productos de diversos fabricantes, se han deducido las propiedades necesarias para definir a un material aislante y, así, introducirlas en dicha base de datos. Por lo tanto, esta incluye nombre del fabricante, nombre del producto, tipo de producto, material del que se compone, densidad, conductividad térmica y máxima temperatura de servicio. La conductividad varía con la temperatura, por lo que se ha realizado una tabla aparte para indicar todas ellas.

Como fabricantes se han escogido PAROC, ISOVER y KNAUF INSULATION. Se han agrupado todos los productos con las mismas propiedades en un total de 98 materiales y, se puede concluir que los materiales más comunes son la lana de roca o lana de vidrio.

9. LÍNEAS FUTURAS

- Añadir mejoras al programa de cálculo online.
- Realizar más tipos de cálculo.
- Ampliar y actualizar la base de datos con productos de más fabricantes.
- Proponer materiales aislantes de la propia base de datos al realizar cálculos con el software.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Incropera, F. and Witt, D., 1999. *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Pearson Educación.
- [2] Rougeron, C., 1977. *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*. Barcelona: Técnicos asociados.
- [3] EN ISO 12241:2008 Thermal insulation for building equipment and industrial installations - Calculation rules
- [4] ASTM C-680 Standard Practice for Estimate of the Heat Gain or Loss and the Surface Temperatures of Insulated Flat, Cylindrical, and Spherical Systems by Use of Computer Programs
- [5] TIAC. Mechanical Insulation Best Practises Guide. 2022 [Documento PDF] Disponible en: <https://vdocument.in/mechanical-insulation-best-practice-guide.html>
- [6] PAROC. Insulation and other products. <https://www.paroc.com/products>
- [7] ISOVER. Technical Insulation Products. <https://www.isover-technical-insulation.com/products>
- [8] KNAUF INSULATION. Technical Solutions. <https://www.knaufinsulation-ts.com/products>
- [9] CINI. Economic insulation thickness, Thermal Insulation Calculations. CINI 6.1.01.2007.
- [10] ISOVER. TechCalc 2 User Guide. Thermal Calculation Software. 2015.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones características de cada elemento para las normas ISO 12241 y ASTM C-680.	11
Tabla 2. Resultados del cálculo de flujo de calor y temperatura superficial exterior con CINICalc y el programa de cálculo online.	24
Tabla 3. Resultados de una pared localizada en interior para la ISO 12241 y con convección natural para la ASTM C-680.	26
Tabla 4. Resultados de una pared localizada en exterior para la ISO 12241 y con convección forzada para la ASTM C-680.	26
Tabla 5. Resultados de una tubería localizada en interior para la ISO 12241 y con convección natural para la ASTM C-680.	27
Tabla 6. Resultados de tubería localizada en exterior para la ISO 12241 y con convección forzada para la ASTM C-680.	27
Tabla 7. Resultados de un tanque esférico localizado en interior para la ISO 12241 y con convección natural para la ASTM C-680.	28
Tabla 8. Resultados de tubería localizada en exterior para la ISO 12241 y con convección forzada para la ASTM C-680.	28

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Elementos en una planta industrial.	9
Ilustración 2. Resistencias térmicas en un elemento con una capa de aislamiento.	12
Ilustración 3. Página principal del software.	19
Ilustración 4. Formulario del software para el cálculo del flujo de calor y de la temperatura de la superficie exterior con la norma ISO 12241.	20
Ilustración 5. Formulario del software para el cálculo del espesor de aislamiento para un valor límite de flujo de calor con la norma ISO 12241.	21
Ilustración 6. Formulario del software para el cálculo de la variación longitudinal de la temperatura en una tubería o conducto con la norma ISO 12241.	22
Ilustración 7. Pantalla de resultados del software.	23