

Anexo D: Análisis térmico y fluidodinámico de fachadas de doble piel

Isabel Pérez Grande

Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva", IDR/UPM
E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid
28040 Madrid, España

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS	2
D1. INTRODUCCIÓN	3
D2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	4
D3. COMPORTAMIENTO CONJUNTO DE DOS VIDRIOS.....	7
D4. PROBLEMA TERMOFLUIDODINÁMICO	10
D5. ANÁLISIS PARAMÉTRICO	12
D6. CONCLUSIONES	35
D7. REFERENCIAS	35

NOTA

Aunque el contenido de este anexo corresponde a material elaborado con anterioridad para otros propósitos, es posible que en el proceso de adaptación a este curso se hayan deslizado erratas e inconsistencias no detectadas por el momento. Para consultar la posible lista de erratas véase <http://www.idr.upm.es/sita>

LISTA DE SÍMBOLOS

- $A_{12,1}$: Coeficiente de absorción del vidrio 1, definido como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente.
- $A_{12,2}$: Coeficiente de absorción del vidrio 2, definido como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente.
- c : Gradiente vertical de temperatura en la troposfera terrestre según la atmósfera estándar, $c = 6,5 \text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$
- c_p : Calor específico a presión constante, para el aire $c_p = 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- d : Separación entre las superficies de vidrio [m]
- h : Altura de las superficies de vidrio [m]
- \dot{m} : Gasto másico de aire originado en el conducto formado por las superficies acristaladas 1 y 2 [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
- p : Presión [Pa]
- p_{amb} : Presión en el exterior [Pa]
- q_1 : Flujo de calor absorbido por el vidrio 1 (exterior) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
- q_2 : Flujo de calor absorbido por el vidrio 2 (interior) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
- q_{ext} : Irradiación externa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
- R_1 : Coeficiente de reflexión del vidrio 1
- R_2 : Coeficiente de reflexión del vidrio 2
- R_{12} : Coeficiente de reflexión del conjunto formado por dos vidrios 1 y 2, definido como el cociente entre la energía reflejada y la energía incidente
- R_a : Constante de los gases ideales, $R_a = 287 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- T : Temperatura [K]
- T_1 : Coeficiente de transmisión del vidrio 1
- T_2 : Coeficiente de transmisión del vidrio 2
- T_{12} : Coeficiente de transmisión del conjunto formado por dos vidrios 1 y 2, definido como el cociente entre la energía transmitida y la energía incidente
- T_{amb} : Temperatura en el exterior [K]
- T_{max} : Temperatura máxima alcanzada por la corriente de aire en el conducto formado por las superficies acristaladas 1 y 2 [K]
- u : Velocidad del aire en el conducto formado por las superficies acristaladas 1 y 2 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
- ΔT_m : Aumento medio de temperatura de la corriente de aire en el conducto formado por las superficies acristaladas 1 y 2 [K]
- ρ : Densidad del aire [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

D1. INTRODUCCIÓN

La utilización de grandes superficies acristaladas como fachadas de edificios es una práctica arquitectónica cada vez más frecuente. Las razones que han conducido a este creciente uso del vidrio son muy diversas, pudiéndose citar entre ellas factores meramente estéticos, mejoras en el bienestar obteniendo una mayor comodidad de los ocupantes (mejor iluminación y más sensación de espacio abierto en recintos con gran ocupación, como aeropuertos, oficinas, etc.) y motivos económicos a través del ahorro energético que se puede conseguir. Este ahorro proviene de dos fuentes: en primer lugar de los costes de iluminación, que se ven notablemente reducidos respecto a los de las fachadas convencionales, y en segundo lugar de la disminución de los costes energéticos de climatización del edificio (siempre que el ahorro en gastos calefacción sea superior a la penalización que aparece en gastos de refrigeración).

Dentro de las fachadas acristaladas se va imponiendo cada vez más el uso de lo que se ha dado en llamar fachadas de doble piel, en las que existe una primera superficie de cristal (que forma la verdadera fachada exterior) separada de una segunda superficie de cristal (que constituye el límite del espacio habitable de la edificación), permitiéndose, con más o menos restricciones, el movimiento del aire en la cámara que definen ambas superficies

Los sistemas de acristalamiento de doble piel actuales proporcionan muy buenas soluciones en regiones climáticas frías y en regiones cálidas. Sin embargo, el diseño es más complejo en aquellas regiones que requieren calefacción en invierno y climatización en verano. En estos casos es necesario estudiar con detalle el comportamiento de la fachada considerando condiciones extremas con el fin de obtener el rendimiento óptimo de la misma (Pérez-Grande y otros, 2005).

La tarea de diseño de una superficie de doble piel, enfocada desde el punto de vista energético, consiste en seleccionar la fachada adecuada para cada ubicación, orientación y clima, es decir, consiste en elegir la geometría adecuada (anchura de la cámara de aire y espesor de los cristales) y las propiedades térmicas y ópticas que deben tener las dos superficies acristaladas.

El objetivo de este trabajo consiste, por tanto, en analizar el problema termofluidodinámico que aparece en este tipo de fachadas, para determinar, entre otras propiedades, las siguientes:

- El flujo neto de calor que llega al interior del edificio a través de la fachada (cargas térmicas).
- La temperatura de cada una de las superficies acristaladas.
- El campo fluido que se origina entre las dos pieles de la fachada.

Para resolver el problema de diseño es necesario analizar distintas y muy variadas configuraciones del sistema, caracterizadas cada una de ellas por los valores de los parámetros relevantes del problema termofluidodinámico, parámetros que caracterizan la geometría, las condiciones ambiente y los vidrios utilizados. De este modo se podrá determinar una solución óptima.

D2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema termofluidodinámico aquí planteado es un problema no lineal bastante complejo dado que el mismo están implicados los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Además el problema depende de un alto número de parámetros o variables que determinan las distintas soluciones, tales son:

-Condiciones exteriores del edificio:

- Temperatura y presión ambiente.
- Condiciones de irradiación solar: intensidad y orientación de la irradiación.

-Condiciones interiores del edificio:

- Temperatura en el interior del mismo.

-Parámetros geométricos:

- Altura del edificio.
- Anchura de la cámara de aire.
- Espesor de cada una de las superficies (pieles) de vidrio.

-Parámetros térmicos y termo-ópticos:

- Conductividades térmicas de los vidrios empleados.
- Coeficientes de emisión, transmisión y absorción de los vidrios.

Algunos de estos parámetros (condiciones ambiente en el exterior y en el interior del edificio...) vendrán fijados por la ubicación y características del edificio mientras que otros (espesor de la cámara de aire, tipo de vidrios) son los que deberán ser seleccionados a la vista de criterios energéticos.

En la formulación del problema hay que incluir también las manifestaciones de intercambio térmico que aparecen relacionadas con cada uno de los mecanismos de transferencia de calor citados, a saber:

Conducción térmica:

- Existe en cada uno de los vidrios, y en los posibles elementos de sujeción de las superficies de vidrio al edificio.

Convección natural:

- En la superficie exterior del edificio con el ambiente exterior.
- En las dos superficies acristaladas que forman la cámara de aire.
- En la superficie interior con el ambiente interior.

Radiación térmica:

- Debido a la dependencia espectral de las propiedades del vidrio, en particular de la transmitancia, es necesario desdoblar el problema de radiación térmica en dos:
 - 1- Por un lado se consideran las interacciones comprendidas en el intervalo de longitudes de onda para el que el vidrio se comporta como un material semitransparente.
 - 2- Por otra parte se consideran las interacciones radiativas en la zona del espectro en que el vidrio se comporta como una sustancia opaca.

Respecto a las interacciones térmicas que aparecen entre las distintas partes del sistema, es necesario considerar:

- Incidencia de la radiación en la superficie acristalada exterior; absorción y reflexión en la misma.
- Reflexiones sucesivas en las superficies de vidrio que forman la cámara de aire.
- Incidencia de la radiación en la superficie acristalada interior; absorción y reflexión en la misma.
- Transmisión de calor al interior del edificio.

En la figura D2.1 se muestra el conjunto de los dos vidrios con las interacciones radiación y convección presentes en los mismos. El dominio que se utiliza está formado por dos placas verticales paralelas y por la capa de aire que queda entre ellas, que está abierta al ambiente por la parte inferior y por la parte superior. Hay que destacar que en esta fase del trabajo no se han considerado obstáculos que dificulten o alteren el movimiento del fluido entre ambas superficies acristaladas. El problema así descrito es un problema bidimensional, que se analiza en condiciones estacionarias.

En el esquema de la figura D2.1, el vidrio marcado con la etiqueta 1 es el vidrio exterior que recibe la irradiación externa q_{ext} y el vidrio 2 es el vidrio interior.

Para el balance energético, hay que tener en cuenta que una parte de la irradiación exterior es reflejada por la superficie de vidrio exterior, otra parte se absorbe y otra se transmite. La parte de irradiación transmitida llega al vidrio interior, que a su vez absorbe una parte, transmite otra al interior del edificio y refleja otra que impacta sobre el vidrio exterior, que otra vez vuelve a absorber una parte, transmite otra y refleja otra. Este fenómeno se repite sucesivas veces,

originándose múltiples reflexiones entre ambos vidrios, en cada una de las cuales ambos absorben, reflejan y transmiten energía.

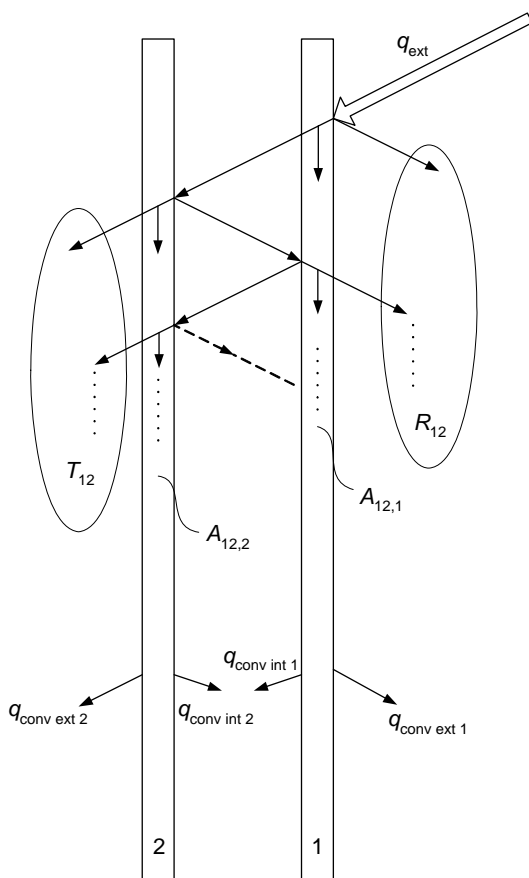


Figura D2.1. Esquema de las interacciones térmicas entre los vidrios; q_{conv} representa el flujo de calor por convección, y los subíndices "int 1", "int 2", "ext 1" y "ext 2" indican las caras interior y exterior de los vidrios 1 y 2 respectivamente. Para la identificación de las otras magnitudes véase la lista de símbolos.

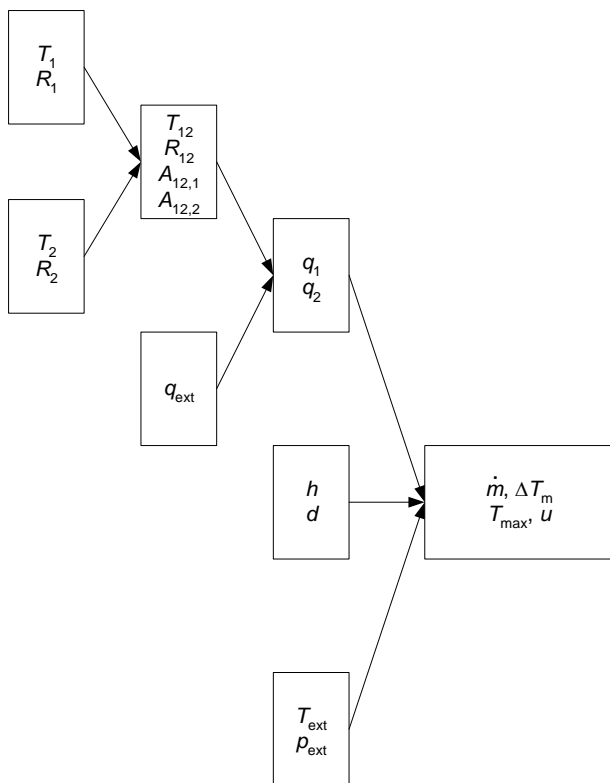
El comportamiento del conjunto de dos vidrios depende de las propiedades de cada uno de ellos. El coeficiente de transmisión del conjunto T_{12} (relación energía transmitida/energía incidente), de reflexión R_{12} (energía reflejada/energía incidente) y de absorción de cada uno de los vidrios $A_{12,1}$ y $A_{12,2}$ (energía absorbida/energía incidente) se calculan teniendo en cuenta las contribuciones de las sucesivas reflexiones.

Se debe tener en cuenta también que en condiciones estacionarias, la radiación absorbida por cada una de las dos superficies acristaladas debe ser igual al calor evacuado por convección por cada una de ellas.

Dada la complejidad del problema termofluidodinámico, y el gran número de parámetros que aparece en el problema, para poder analizar la influencia de los más relevantes se tiene que empezar

por analizar una configuración simplificada. Así, en primera aproximación, no se tiene en cuenta la conducción en el vidrio y se considera sólo la convección en la cámara formada por las dos superficies acristaladas, es decir se analiza el problema en el que el calor absorbido por las superficies de vidrio se evacua por convección en la cámara interior.

Al resolver el problema termofluidodinámico surge la cuestión de si es aprovechable con fines energéticos la corriente de aire generada entre las dos superficies de vidrio. Para dilucidar esta cuestión es preciso resolver el flujo que se establece entre las superficies acristaladas, a fin de determinar el gasto másico de aire \dot{m} originado en el conducto formado por dichas superficies acristaladas, el aumento medio de temperatura de la corriente ΔT_m en el conducto (pues las propiedades del aire en la sección de salida no son uniformes), la temperatura máxima T_{\max} alcanzada por la corriente en el conducto y, por último, la velocidad u con la que el aire entra al mencionado conducto. Así mismo, también es de importancia la forma de los perfiles de temperatura, velocidad y densidad a lo largo del conducto.



En la figura D2.2 se muestra un esquema de las distintas variables involucradas en el problema. De acuerdo con lo expuesto, es patente que para resolver el problema global es necesario conocer las propiedades termo-ópticas de los dos vidrios, es decir sus coeficientes de transmisión, T_1 y T_2 , y de reflexión, R_1 y R_2 (donde los subíndices 1 y 2 identifican cada una de las superficies acristaladas), la irradiación exterior q_{ext} , la separación d entre vidrios, la altura h de los mismos y las condiciones exteriores de presión y temperatura, p_{amb} y T_{amb} , respectivamente. En resumen, el problema definido requiere un total de nueve variables de entrada.

Figura D2.2. Esquema de las variables que intervienen en el problema. Para la identificación de las distintas magnitudes véase la lista de símbolos.

Sin embargo, el número de variable de entrada necesario para resolver el problema termofluidodinámico es menor, pues como se indica en la figura D2.2, en este caso es suficiente con conocer los flujos de calor absorbidos por los vidrios exterior e interior, q_1 y q_2 , respectivamente, la geometría y las condiciones exteriores, de modo el número de variables de entrada en esta parte del problema se reduce a seis.

Por tanto, en el proceso de cálculo se analizan por separado dos problemas: el primero atañe a la determinación de las propiedades T_{12} , R_{12} , $A_{12,1}$ y $A_{12,2}$, de un conjunto de dos vidrios a partir de las propiedades de cada uno de ellos T_1 , R_1 , T_2 , R_2 (véase el apartado D3); en el segundo se aborda la resolución del problema termofluidodinámico a partir del calor absorbido por cada vidrio, de la geometría y de las condiciones ambiente (apartado D4).

D3. COMPORTAMIENTO CONJUNTO DE DOS VIDRIOS

Las propiedades del conjunto, coeficiente de transmisión T_{12} , de reflexión R_{12} , y de absorción de cada uno de los vidrios $A_{12,1}$ y $A_{12,2}$ se calculan a partir de los que tiene cada vidrio por separado. De acuerdo con Siegel & Howell (1992), sus valores son:

$$R_{12} = R_1 + \frac{R_2 T_1^2}{1 - R_1 R_2}, \quad (D3.1)$$

$$T_{12} = \frac{T_1 T_2}{1 - R_1 R_2}, \quad (D3.2)$$

$$A_{12,1} = (1 - R_1 - T_1) \left[1 + \frac{T_1 R_2}{1 - R_1 R_2} \right], \quad (D3.3)$$

$$A_{12,2} = (1 - R_2 - T_2) T_1 \left[\frac{1}{1 - R_1 R_2} \right], \quad (D3.4)$$

nótese que la suma de los cuatro coeficientes vale la unidad: $R_{12} + T_{12} + A_{12,1} + A_{12,2} = 1$. Aunque las expresiones (D3.1)-(D3.4) permiten evaluar directamente el comportamiento de un conjunto determinado, resulta útil representarlas gráficamente con el fin de poder analizar la influencia de cada uno de los parámetros.

En las figuras D3.1 y D3.2 se han fijado las características del vidrio exterior ($R_1 = 0,15$ y $T_1 = 0,70$) y se han variado las del vidrio interior. En la figura D3.1 se ha representado, para distintos valores de T_2 , la variación con R_2 de los coeficientes R_{12} y T_{12} , y en la figura D3.2 la variación con R_2 de los coeficientes $A_{12,1}$ y $A_{12,2}$, también para distintos valores de T_2 . Como puede observarse en las expresiones (D3.1) y (D3.3), los valores de R_{12} y $A_{12,1}$ no dependen de T_2 . A la vista de los resultados se puede destacar que la influencia de R_2 en el coeficiente de reflexión del conjunto, R_{12} , es muy pequeña mientras que tal influencia es importante en el coeficiente $A_{12,2}$.

Las figuras D3.3 y D3.4 son análogas a las D3.1 y D3.2, sólo que ahora se han fijado las características del vidrio interior ($R_2 = 0,15$ y $T_2 = 0,70$) y se han variado las del vidrio exterior. En la figura D3.3 se representan R_{12} y T_{12} y en la figura D3.4 $A_{12,1}$ y $A_{12,2}$, en ambos casos frente a R_1 para distintos valores de T_1 . La influencia de R_1 en el coeficiente de reflexión del conjunto y de absorción del vidrio exterior es importante mientras que es pequeña en la transmisión del conjunto y en la absorción del vidrio interior. También puede observarse que el coeficiente de transmisión del vidrio exterior T_1 influye poco en la transmisión del conjunto (las curvas están muy próximas) mientras que su influencia es mayor en los demás coeficientes.

La importancia de la información que proporcionan estas gráficas radica en su utilidad a la hora de seleccionar los vidrios adecuados. Así, el hecho de que cierta propiedad de uno de los vidrios influya poco en las prestaciones globales indica la versatilidad de ese parámetro, que puede cambiarse mediante criterios de otro tipo (por ejemplo, selección de un vidrio más económico, de mayor disponibilidad, etc.) sin afectar de forma relevante a los resultados. Por otro lado, cuando un parámetro tiene una influencia muy grande, será precisamente este parámetro el que habrá que variar cuando se deseen alterar las prestaciones del conjunto si estas no fueran las adecuadas (Pérez-Grande y otros, 2005).

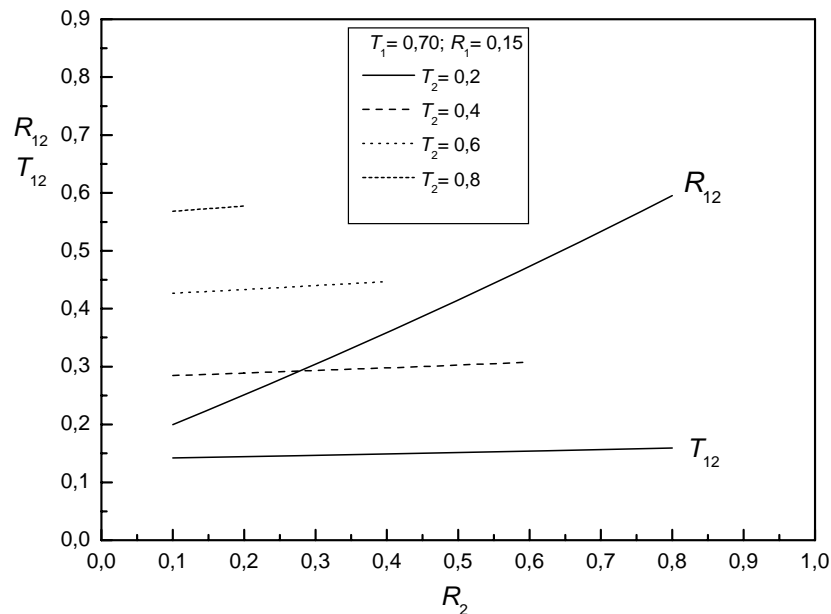


Figura D3.1. Variación con el coeficiente de reflexión del vidrio 2, R_2 , del coeficiente de reflexión del conjunto formado por los dos vidrios R_{12} y del coeficiente de transmisión del conjunto T_{12} , para distintos valores del coeficiente de transmisión del vidrio 2, T_2 , (los resultados corresponden a los siguientes valores numéricos de las propiedades térmicas del vidrio 1: $R_1=0,15$ y $T_1=0,70$).

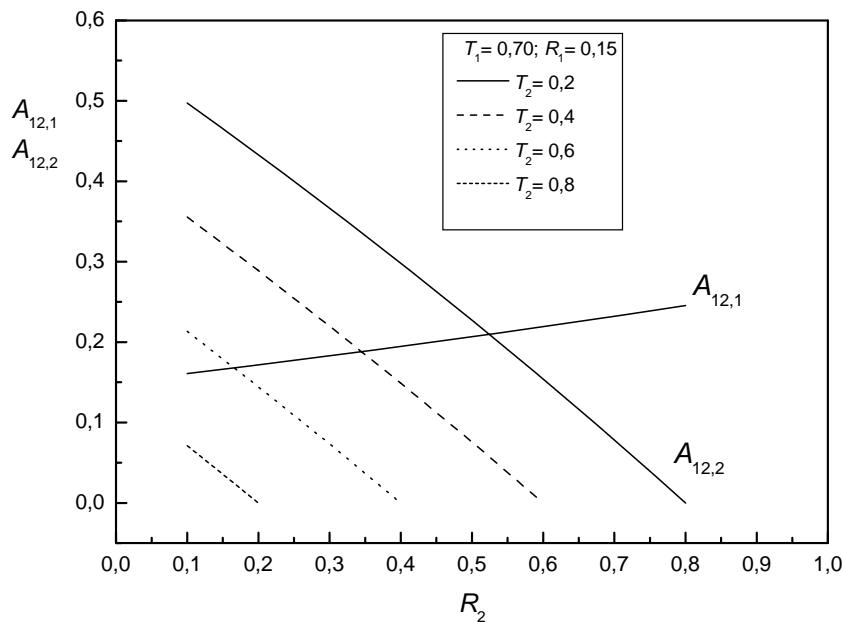


Figura D3.2. Variación con el coeficiente de reflexión del vidrio 2, R_2 , del coeficiente de absorción del vidrio 1, $A_{12,1}$, y del coeficiente de absorción del vidrio 2, $A_{12,2}$, para distintos valores del coeficiente de transmisión del vidrio 2, T_2 , (los resultados corresponden a los siguientes valores numéricos de las propiedades térmicas del vidrio 1: $R_1=0,15$ y $T_1=0,70$).

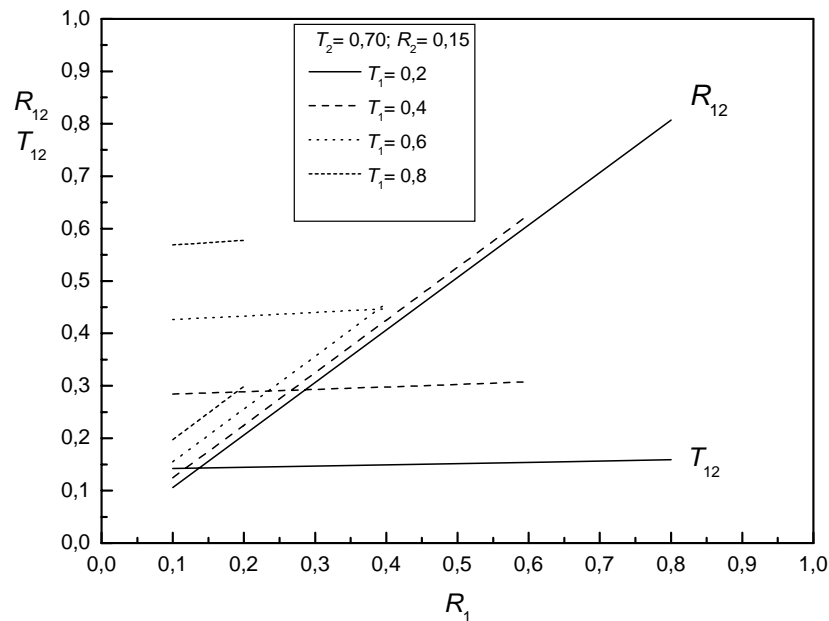


Figura D3.3. Variación con el coeficiente de reflexión del vidrio 1, R_1 , del coeficiente de reflexión del conjunto formado por los dos vidrios R_{12} y del coeficiente de transmisión del conjunto T_{12} , para distintos valores del coeficiente de transmisión del vidrio 1, T_1 , (los resultados corresponden a los siguientes valores numéricos de las propiedades térmicas del vidrio 2: $R_2=0,15$ y $T_2=0,70$).

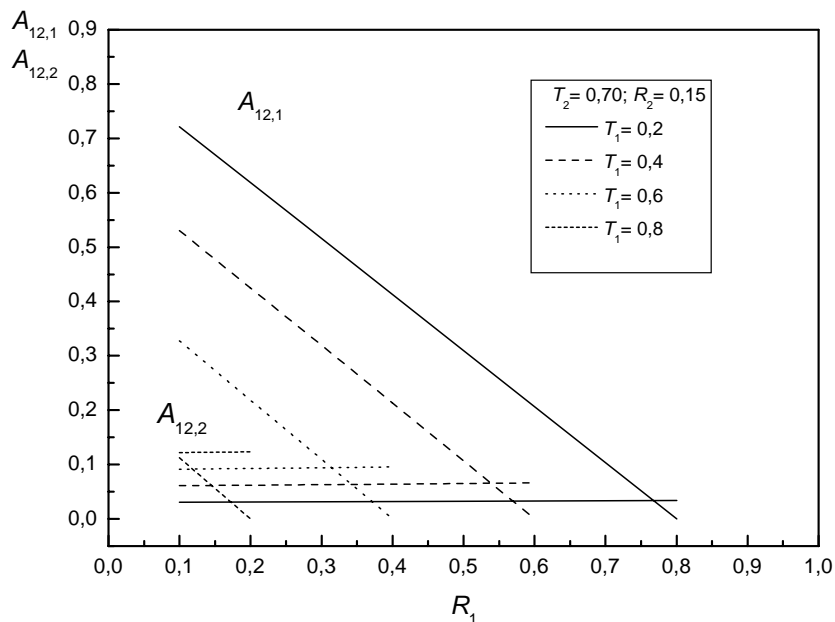


Figura D3.4. Variación con el coeficiente de reflexión del vidrio 1, R_1 , del coeficiente de absorción del vidrio 1, $A_{12,1}$, y del coeficiente de absorción del vidrio 2, $A_{12,2}$, para distintos valores del coeficiente de transmisión del vidrio 1, T_1 , (los resultados corresponden a los siguientes valores numéricos de las propiedades térmicas del vidrio 2: $R_2=0,15$ y $T_2=0,70$).

D4. PROBLEMA TERMOFLUIDODINÁMICO

Dada la complejidad del problema termofluidodinámico planteado, para resolverlo se utiliza un código comercial de volúmenes finitos. El dominio bidimensional que se utiliza está formado por dos placas sólidas, verticales y paralelas entre sí que representan las superficies acristaladas, y por el aire que fluye en la zona existente entre ellas, que está abierta al ambiente por la parte inferior y la superior. En un principio no se consideran obstáculos entre placas que puedan dificultar o alterar el movimiento del fluido.

El problema así descrito es un problema bidimensional, que se analiza en condiciones estacionarias, cuya resolución requiere determinar el campo fluido originado al evacuar por convección los flujos de calor q_1 y q_2 absorbidos por los vidrios exterior e interior respectivamente.

Las condiciones de contorno del problema planteado son:

- En la pared exterior $q = q_1$.
- En la pared interior $q = q_2$.
- En la región de descarga, $z = h$, se considera que el conducto formado por las dos placas descarga libremente al ambiente, de modo que la presión de salida es la presión ambiente local, evaluada a la altura de descarga, es decir $p(h) = p_{\text{amb}}(h)$.
- En la región de entrada las propiedades se consideran uniformes, y además se debe verificar que $p(0) = p_{\text{amb}}(0) - \rho u^2/2$, expresión que resulta al aplicar la ecuación de Bernoulli entre una región lejana, donde el aire se supone en reposo, y la región de entrada a la cámara formada por los dos vidrios.

Para imponer esta última condición de contorno se ha de fijar un cierto perfil uniforme de velocidad del aire en la región de entrada, y tras resolver el campo fluido en el interior del conducto, determinar la presión en la región de entrada y comprobar que se verifica la ecuación de Bernoulli planteada. Como en general no será así, a partir de los datos obtenidos se define un nuevo perfil constante de velocidad a la entrada y se vuelve a calcular el campo fluido. Por tanto, para cada configuración en estudio, el proceso de análisis se ha de seguir un procedimiento iterativo hasta que la velocidad de entrada y el campo de presiones obtenidos al resolver el problema verifiquen la condición de compatibilidad expresada en la condición de contorno relativa a las condiciones a la entrada ($p(0) = p_{\text{amb}}(0) - \rho u^2/2$).

Para resolver el campo fluido se utilizan los siguientes modelos:

- Modelo de gas caloríficamente perfecto para el aire; esto supone que el fluido verifica la ecuación de estado de un gas ideal ($p/\rho = R_a T$) y que su capacidad calorífica específica a presión constante, c_p , es constante.
- Modelo de variación con la altura de la densidad del aire ambiente calculada a partir de las variaciones de temperatura y presión de acuerdo con la definición de la atmósfera estándar, es decir:

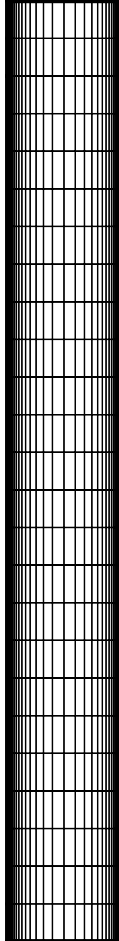
$$T(z) = T(0) - cz, \quad (\text{D4.1})$$

$$p(z) = p(0) \left(1 - \frac{cz}{T(0)} \right)^{g/cR_a}, \quad (\text{D4.2})$$

- Modelo k - ε de turbulencia.

Para resolver el problema termofluidodinámico se ha discretizado el dominio fluido en elementos rectangulares, tal como se indica en la figura D4.1. Las dimensiones verticales de los elementos de malla son uniformes en todo el dominio, y dado que el código numérico empleado exige variables de entrada físicas y no relaciones adimensionales, en los ejemplos resueltos se ha tomado un valor de 0,1 m para la dimensión vertical de los elementos de la malla.

Sin embargo, con el fin de determinar con mayor precisión el comportamiento cerca de las paredes, que es donde se produce el fenómeno de transferencia de calor del vidrio al aire, se ha dispuesto que horizontalmente los elementos sean progresivamente más pequeños cuanto más cerca estén de las paredes. Horizontalmente, el espacio entre placas, sea cual fuere, se ha dividido en 40 elementos de anchura variable, como se ha dicho. En la figura D4.2 se muestra un detalle de la progresión del tamaño de los elementos cerca de la pared.



En los cálculos se ha comprobado que el número y tamaño de elementos de malla es el apropiado para que el valor de estos parámetros de la discretización no influya en la solución.

Figura D4.1. Esquema de la discretización espacial del campo fluido empleada en la resolución del problema termofluidodinámico.

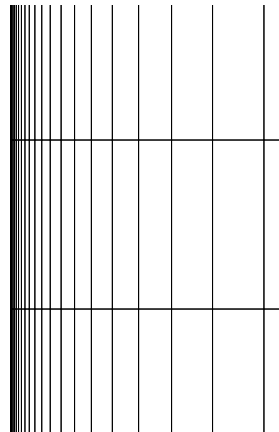


Figura D4.2. Detalle de la malla cerca de la pared.

D5. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

En la tabla D5.1 se resumen los diversos casos analizados. La variación de los parámetros considerada es la siguiente:

$$q_1: 100-400 \text{ W/m}^2.$$

$$q_2: 20-100 \text{ W/m}^2.$$

$$d: 0,2-0,5 \text{ m.}$$

$$h: 2,5-10 \text{ m.}$$

Todos los casos se han resuelto con las mismas condiciones ambiente: presión de una atmósfera ($p_{\text{amb}} = 101325 \text{ Pa}$) y temperatura de 15°C ($T_{\text{amb}} = 288,16 \text{ K}$), y para cada juego de valores de los datos de entrada se han determinado:

- El gasto másico de aire \dot{m} originado en el espacio entre placas.
- El aumento medio de temperatura de la corriente en el conducto, ΔT_m .
- La temperatura máxima alcanzada por la corriente en el conducto, T_{max} .
- La velocidad u con la que el aire entra al conducto.

En las figuras D5.1 a D5.32 se muestran los resultados obtenidos. Puede observarse que las temperaturas máximas alcanzadas oscilan entre 30°C y 80°C aumentando obviamente su valor al aumentar el flujo de calor, aunque estas temperaturas elevadas están muy localizadas en una región próxima a la pared. A nivel medio, si se mezclase la corriente de modo que saliese con temperatura uniforme, mediante el principio de conservación de la energía se puede calcular el incremento de temperatura medio que experimentaría la corriente. En este caso los aumentos que se observan oscilan entre unos 2°C y 8°C respecto a la temperatura de entrada, valores aparentemente bajos si se pretende sacar algún tipo de aprovechamiento energético de esta corriente.

Respecto a los gastos de aire originados entre las cámaras, sus valores oscilan entre $0,1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ y $0,6 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ por metro de profundidad (perpendicular al plano del dibujo), aumentando de forma importante al aumentar la altura de las placas de vidrio. Las velocidades de entrada varían entre $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aumentando también de forma notable al aumentar la altura de las paredes.

Aunque en la sección de entrada las propiedades del aire se consideran uniformes, según se va calentando el aire debido al flujo de calor desde la pared, las propiedades del fluido dejan de ser uniformes en cada sección, encontrándose los gradientes más grandes en la sección de salida. Esto es importante de cara a la posibilidad de aprovechamiento de la corriente de salida, ya que se dispone de una corriente con fuertes gradientes transversales de temperatura que sería necesario mezclar de cara a un hipotético uso posterior.

A modo ilustrativo se ha seleccionado el caso que en la tabla D5.1 aparece señalado con número 34, es decir, $q_1 = 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $q_2 = 40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $d = 0,4 \text{ m}$ y $h = 5,0 \text{ m}$. En las figuras D5.33, D5.34 y D5.35 se muestran respectivamente los campos de temperatura, densidad y velocidad entre las dos placas de vidrio para la configuración analizada. Como puede observarse las variaciones de temperatura y densidad respecto a los valores del ambiente se aprecian sólo en una pequeña zona cercana a las paredes.

Este efecto se puede observar con más detalle representando el valor de las tres magnitudes temperatura, densidad y velocidad a distintas alturas. Así, en las figuras D5.26, D5.37 y D5.38 se muestra la variación a lo largo de la anchura del conducto de estas propiedades (temperatura, densidad y velocidad) en la sección de entrada ($z = 0 \text{ m}$), en el punto medio del conducto según la vertical ($z = 2,5 \text{ m}$) y en la sección de salida ($z = 5,0 \text{ m}$).

Tabla D5.1. Resumen de los casos analizados en la resolución del problema termofluidodinámico.

Caso	q_1 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	q_2 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	d [m]	h [m]	Caso	q_1 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	q_2 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	d [m]	h [m]
1	100	40	0,2	2,5	29	200	20	0,5	2,5
2	200	40	0,2	2,5	30	200	60	0,5	2,5
3	300	40	0,2	2,5	31	200	80	0,5	2,5
4	400	40	0,2	2,5	32	200	100	0,5	2,5
5	200	20	0,2	2,5	33	100	40	0,4	5,0
6	200	60	0,2	2,5	34	200	40	0,4	5,0
7	200	80	0,2	2,5	35	300	40	0,4	5,0
8	200	100	0,2	2,5	36	400	40	0,4	5,0
9	100	40	0,3	2,5	37	200	20	0,4	5,0
10	200	40	0,3	2,5	38	200	60	0,4	5,0
11	300	40	0,3	2,5	39	200	80	0,4	5,0
12	400	40	0,3	2,5	40	200	100	0,4	5,0
13	200	20	0,3	2,5	41	100	40	0,4	7,5
14	200	60	0,3	2,5	42	200	40	0,4	7,5
15	200	80	0,3	2,5	43	300	40	0,4	7,5
16	200	100	0,3	2,5	44	400	40	0,4	7,5
17	100	40	0,4	2,5	45	200	20	0,4	7,5
18	200	40	0,4	2,5	46	200	60	0,4	7,5
19	300	40	0,4	2,5	47	200	80	0,4	7,5
20	400	40	0,4	2,5	48	200	100	0,4	7,5
21	200	20	0,4	2,5	49	100	40	0,4	10,0
22	200	60	0,4	2,5	50	200	40	0,4	10,0
23	200	80	0,4	2,5	51	300	40	0,4	10,0
24	200	100	0,4	2,5	52	400	40	0,4	10,0
25	100	40	0,5	2,5	53	200	20	0,4	10,0
26	200	40	0,5	2,5	54	200	60	0,4	10,0
27	300	40	0,5	2,5	55	200	80	0,4	10,0
28	400	40	0,5	2,5	56	200	100	0,4	10,0

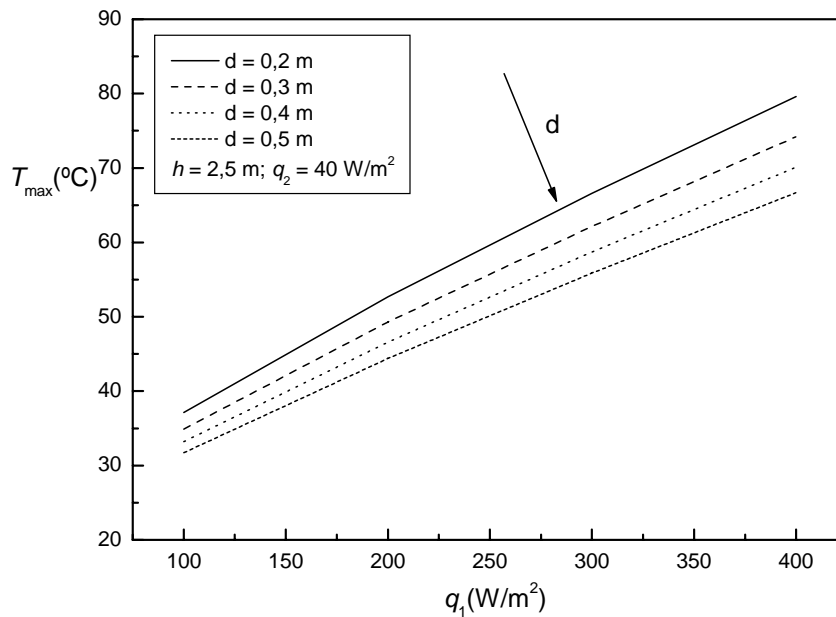


Figura D5.1. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio exterior, q_1 , de la temperatura máxima alcanzada por la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, T_{max} , para distintos valores de la anchura del conducto d .

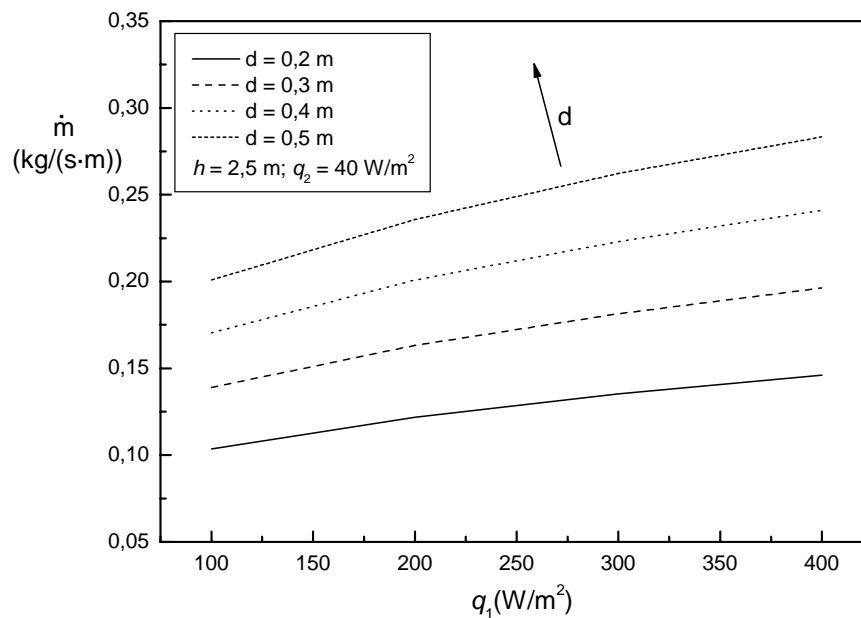


Figura D5.2. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio exterior, q_1 , del gasto másico de aire, \dot{m} , para distintos valores de la anchura del conducto d .

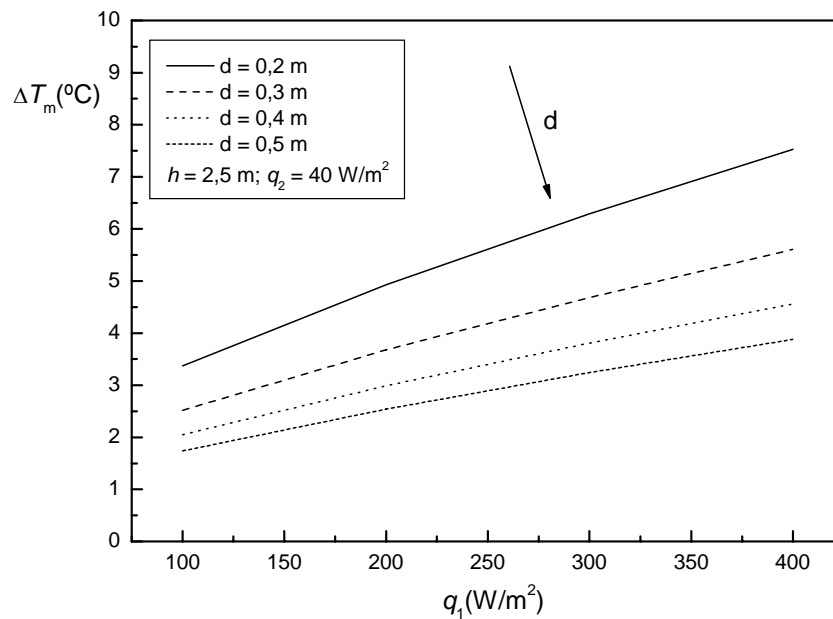


Figura D5.3. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio exterior, q_1 , del aumento medio de temperatura de la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, ΔT_m , para distintos valores de la anchura del conducto d .

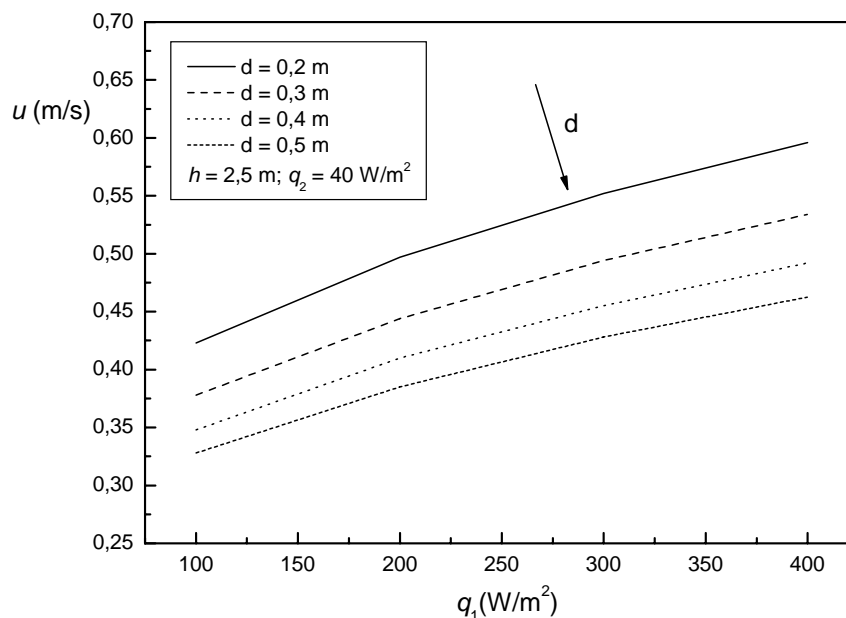


Figura D5.4. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio exterior, q_1 , de la velocidad de entrada del aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, u , para distintos valores de la anchura del conducto d .

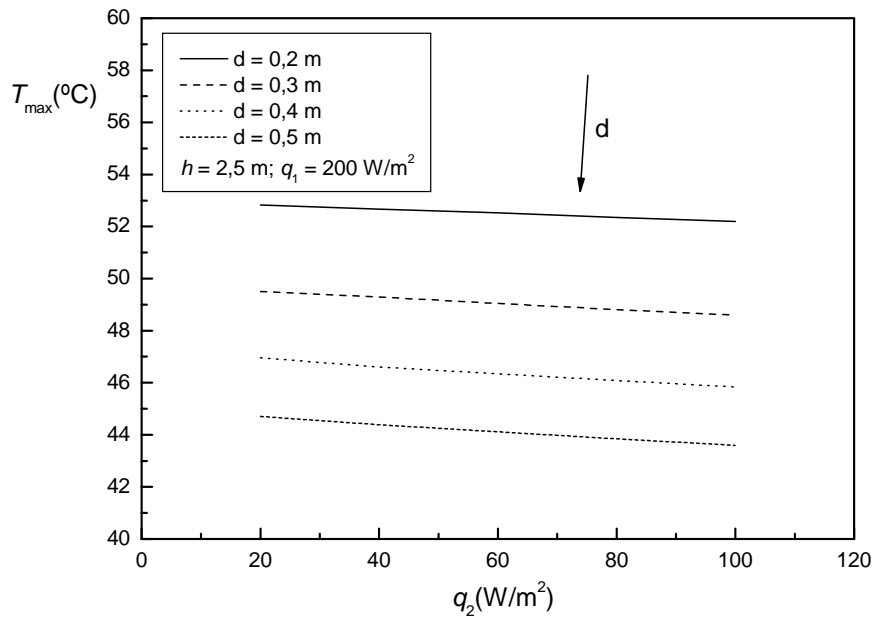


Figura D5.5. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio interior, q_2 , de la temperatura máxima alcanzada por la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, T_{max} , para distintos valores de la anchura del conducto d .

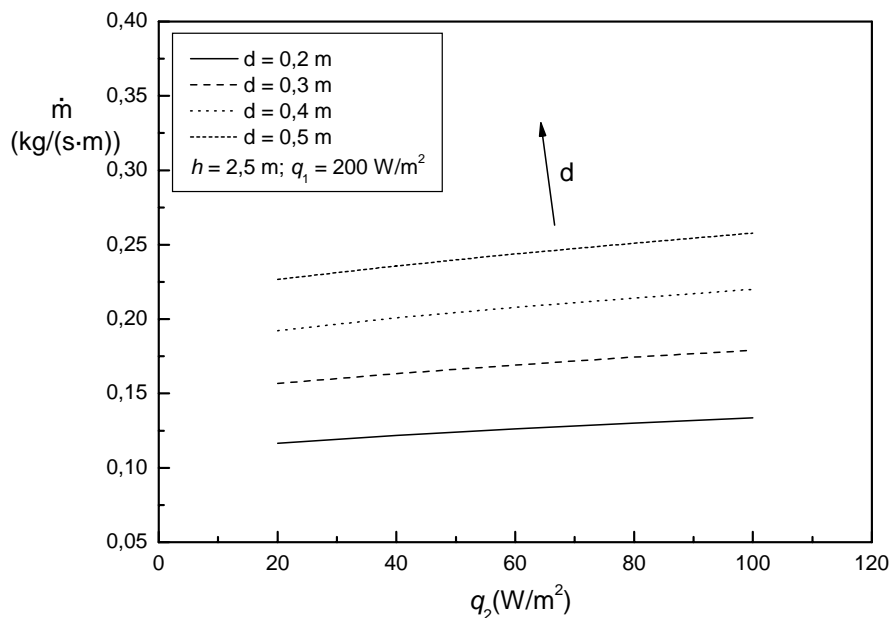


Figura D5.6. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio interior, q_2 , del gasto másico de aire, \dot{m} , para distintos valores de la anchura del conducto d .

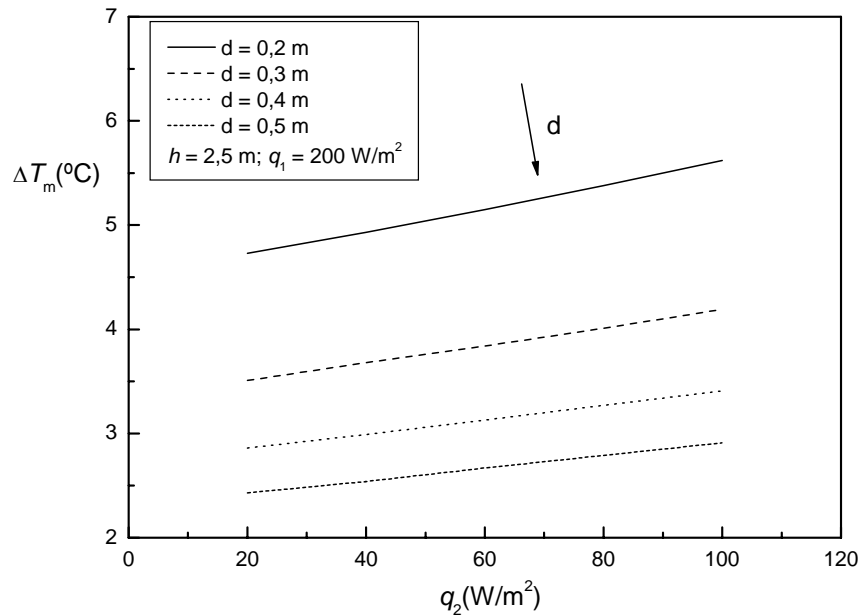


Figura D5.7. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio interior, q_2 , del aumento medio de temperatura de la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, ΔT_m , para distintos valores de la anchura del conducto d .

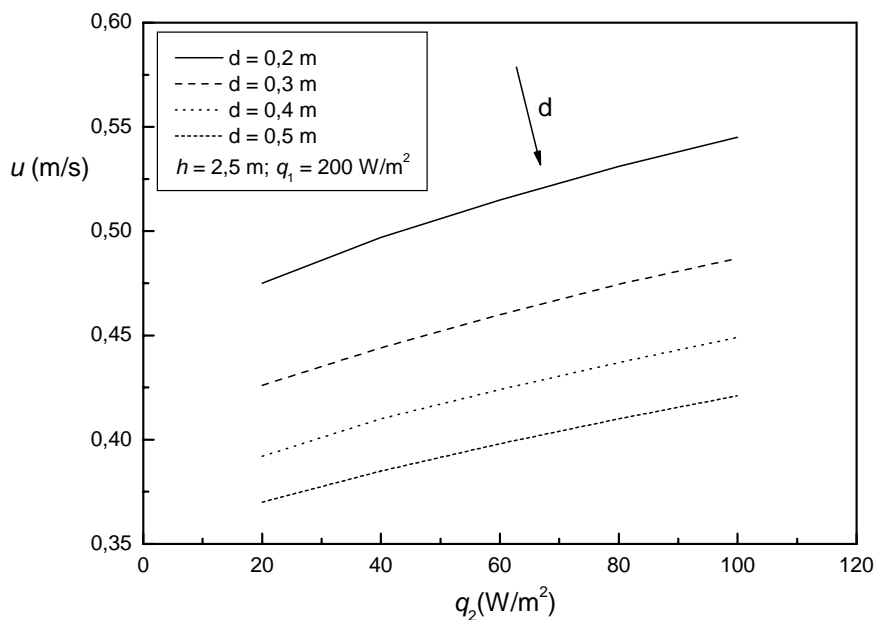


Figura D5.8. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio interior, q_2 , de la velocidad de entrada del aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, u , para distintos valores de la anchura del conducto d .

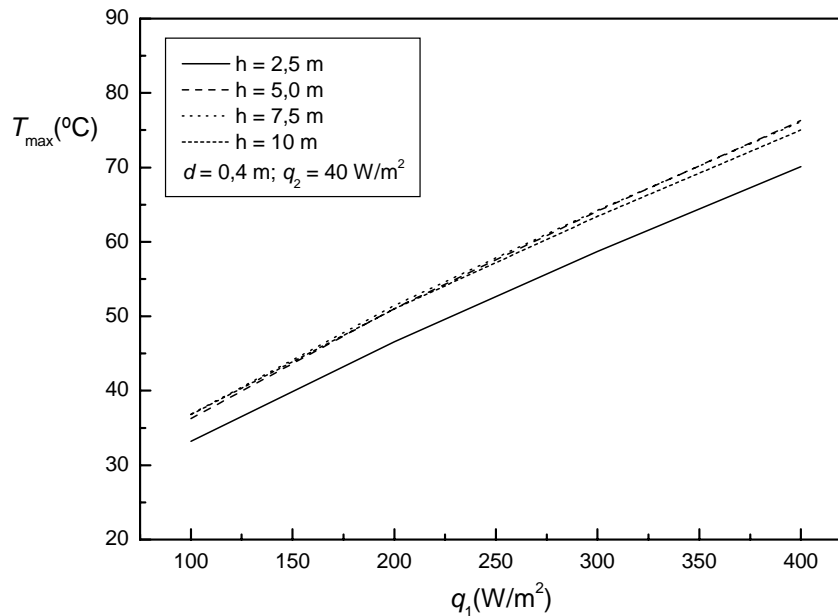


Figura D5.9. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio exterior, q_1 , de la temperatura máxima alcanzada por la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, T_{max} , para distintos valores de la altura del conducto h .

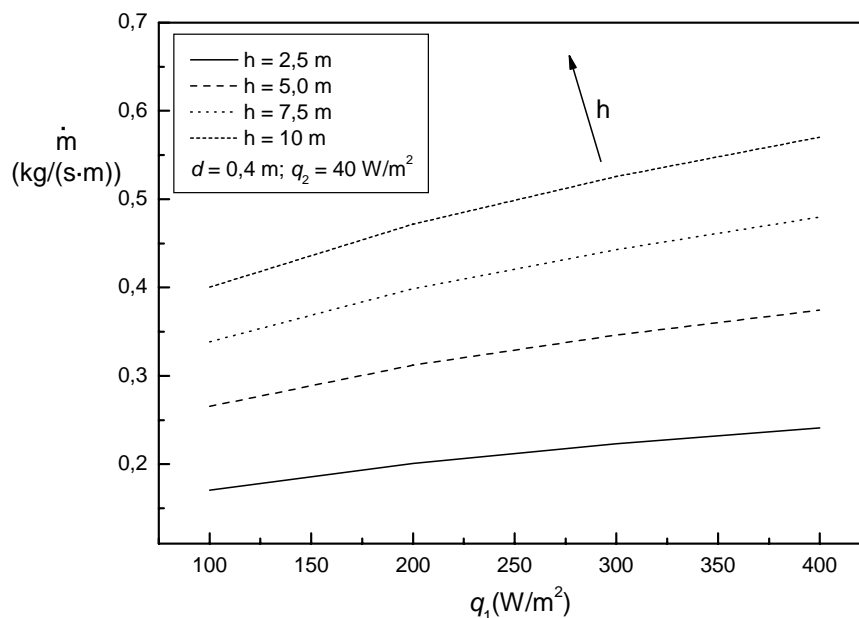


Figura D5.10. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio exterior, q_1 , del gasto másico de aire, \dot{m} , para distintos valores de la altura del conducto h .

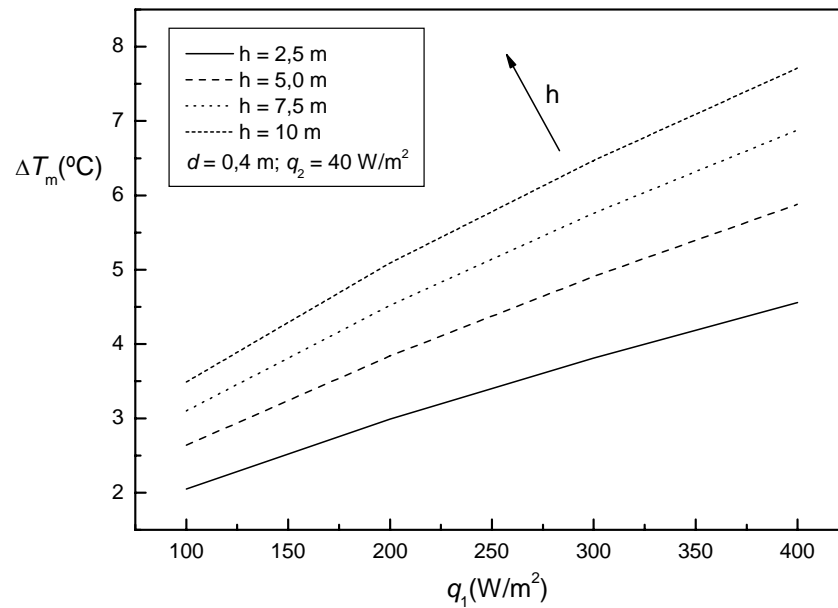


Figura D5.11. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio exterior, q_1 , del aumento medio de temperatura de la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, ΔT_m , para distintos valores de la altura del conducto h .

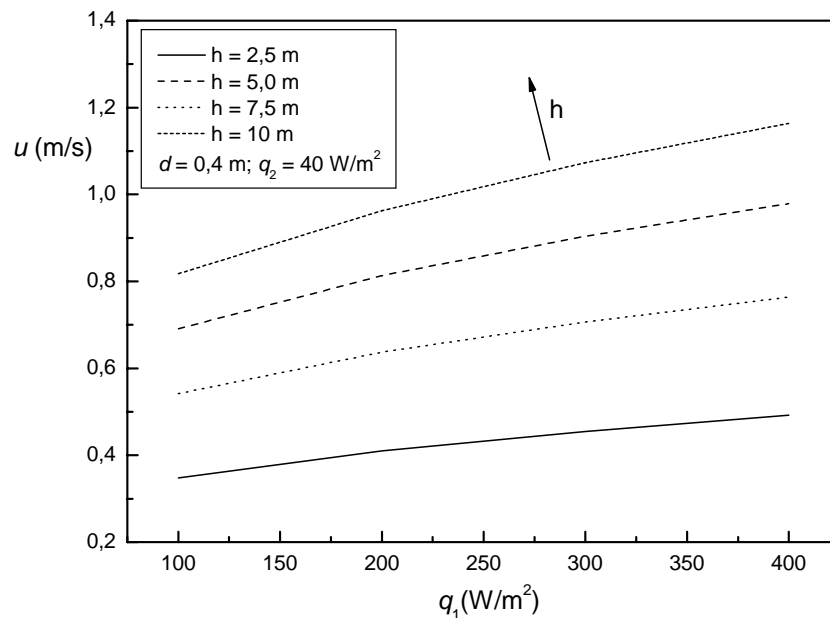


Figura D5.12. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio exterior, q_1 , de la velocidad de entrada del aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, u , para distintos valores de la altura del conducto h .

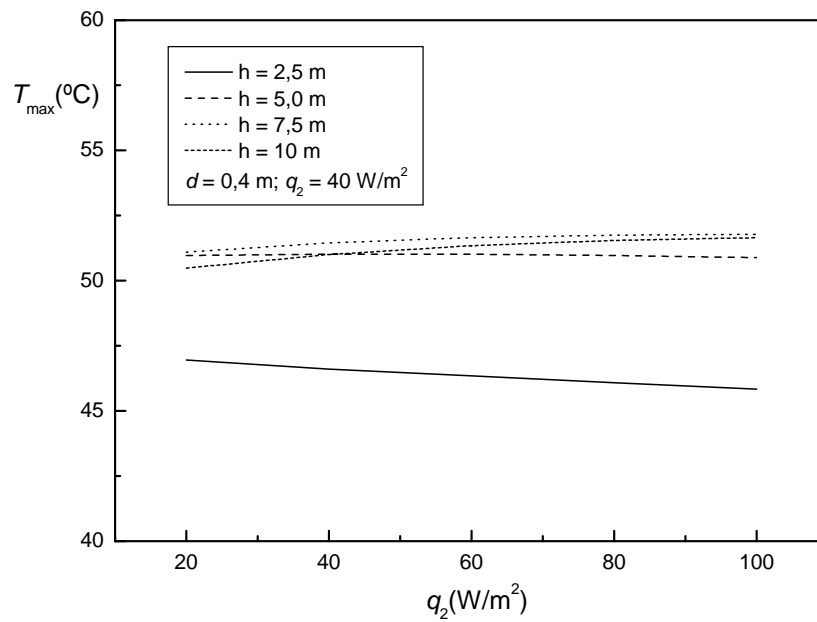


Figura D5.13. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio interior, q_2 , de la temperatura máxima alcanzada por la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, T_{max} , para distintos valores de la altura del conducto h .

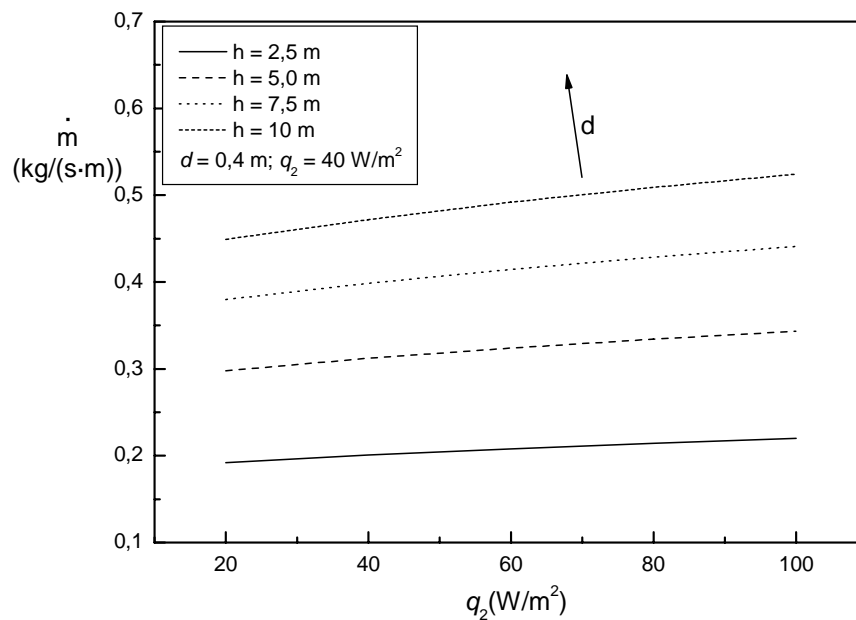


Figura D5.14. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio interior, q_2 , del gasto másico de aire, \dot{m} , para distintos valores de la altura del conducto h .

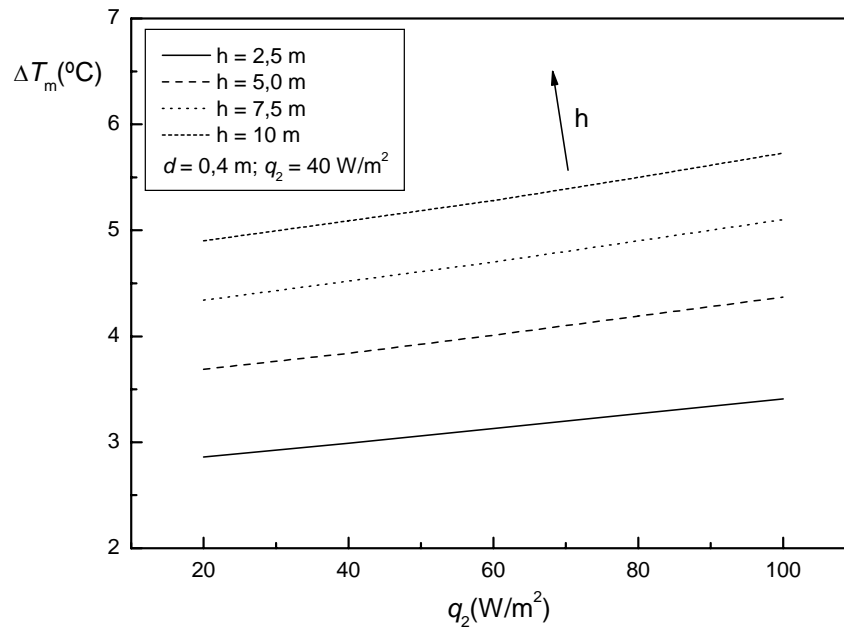


Figura D5.15. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio interior, q_2 , del aumento medio de temperatura de la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, ΔT_m , para distintos valores de la altura del conducto h .

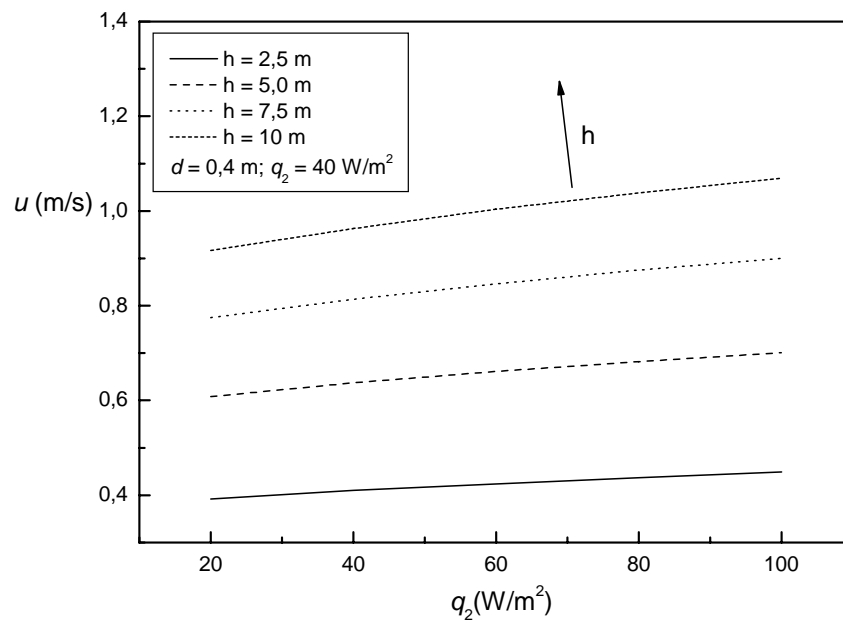


Figura D5.16. Variación con el flujo de calor absorbido por el vidrio interior, q_2 , de la velocidad de entrada del aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, u , para distintos valores de la altura del conducto h .

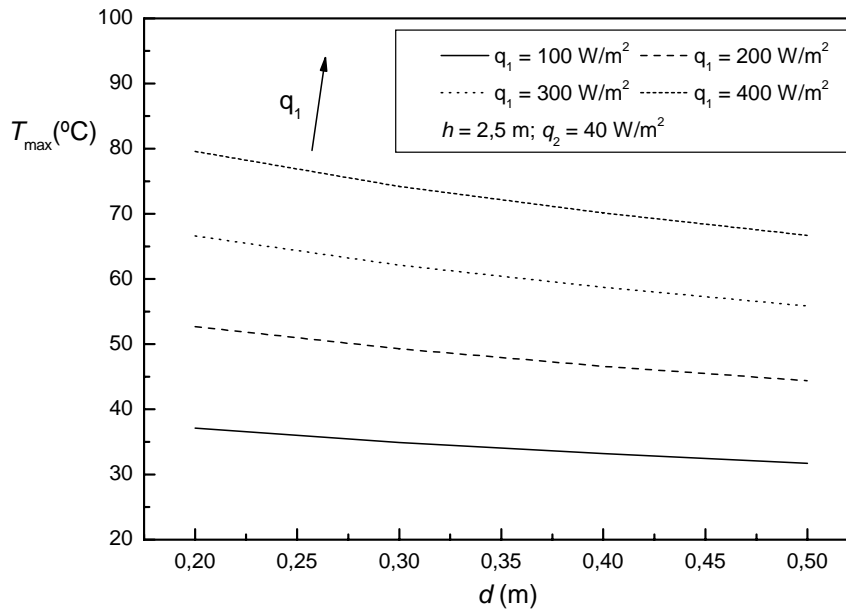


Figura D5.17. Variación con la anchura del conducto, d , de la temperatura máxima alcanzada por la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, T_{\max} , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio exterior q_1 .

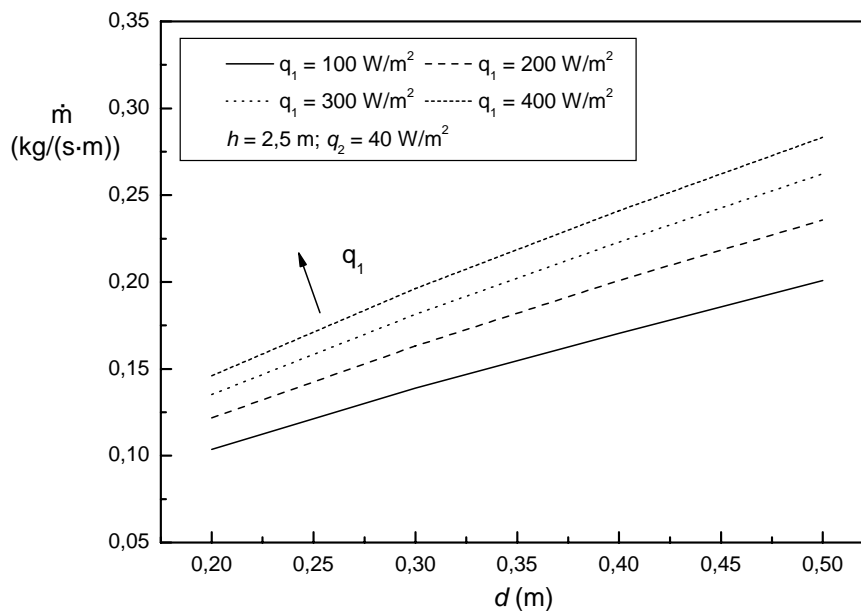


Figura D5.18. Variación con la anchura del conducto, d , del gasto másico de aire, \dot{m} , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio exterior q_1 .

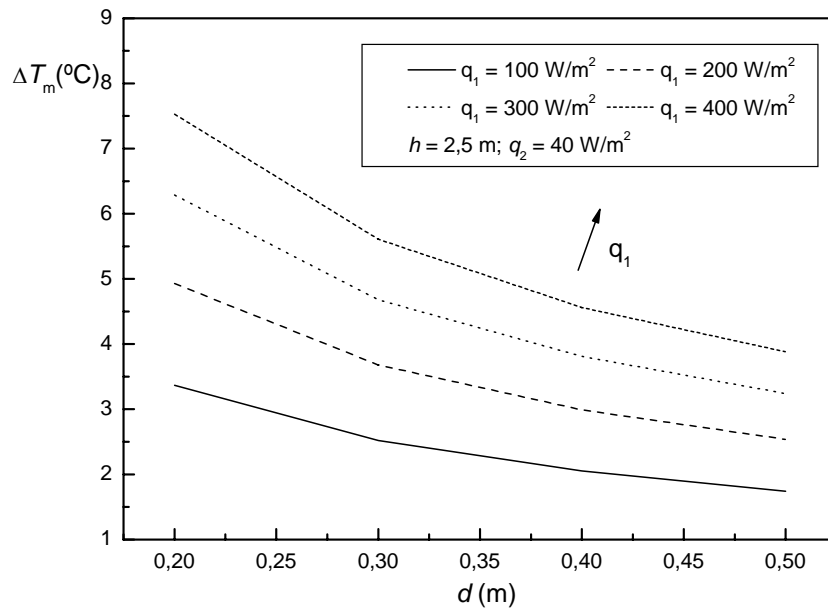


Figura D5.19. Variación con la anchura del conducto, d , del aumento medio de temperatura de la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, ΔT_m , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio exterior q_1 .

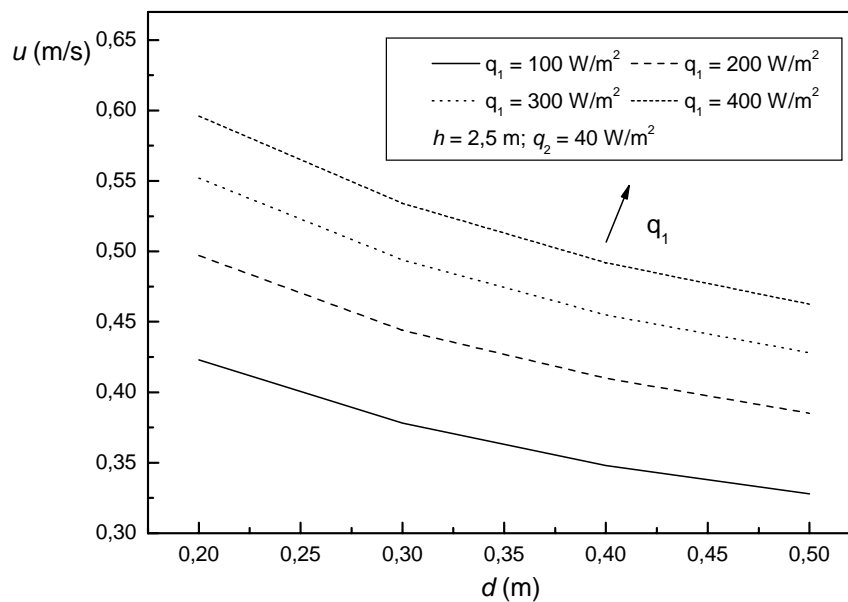


Figura D5.20. Variación con la anchura del conducto, d , de la velocidad de entrada del aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, u , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio exterior q_1 .

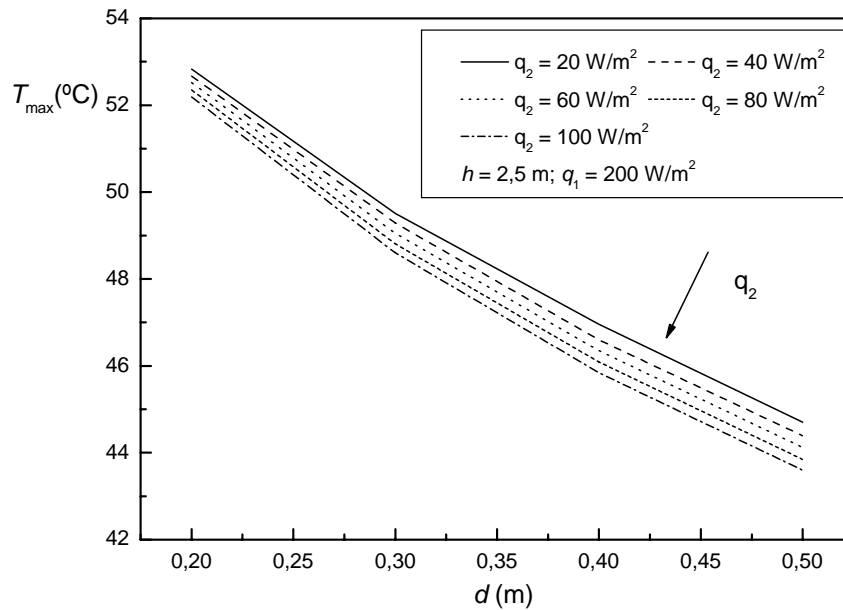


Figura D5.21. Variación con la anchura del conducto, d , de la temperatura máxima alcanzada por la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, T_{\max} , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio interior q_2 .

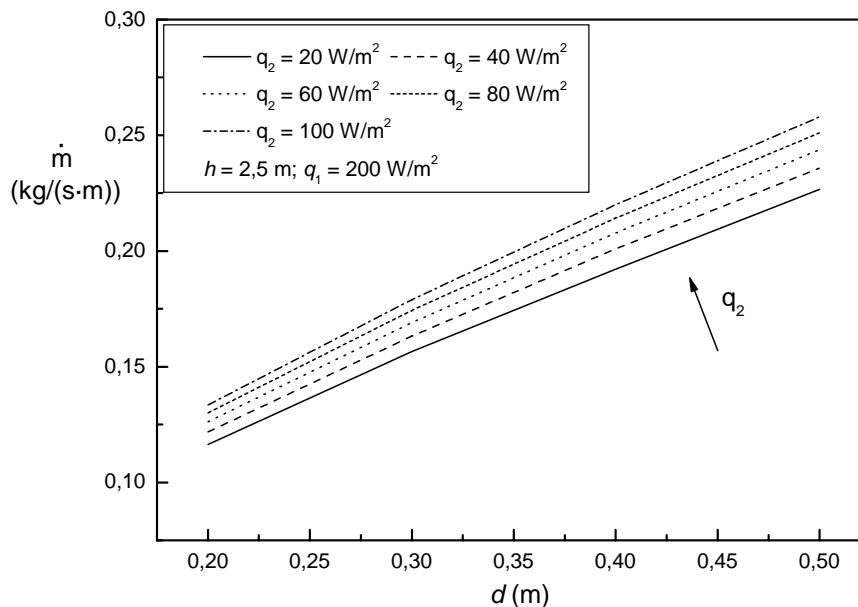


Figura D5.22. Variación con la anchura del conducto, d , del gasto másico de aire, \dot{m} , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio interior q_2 .

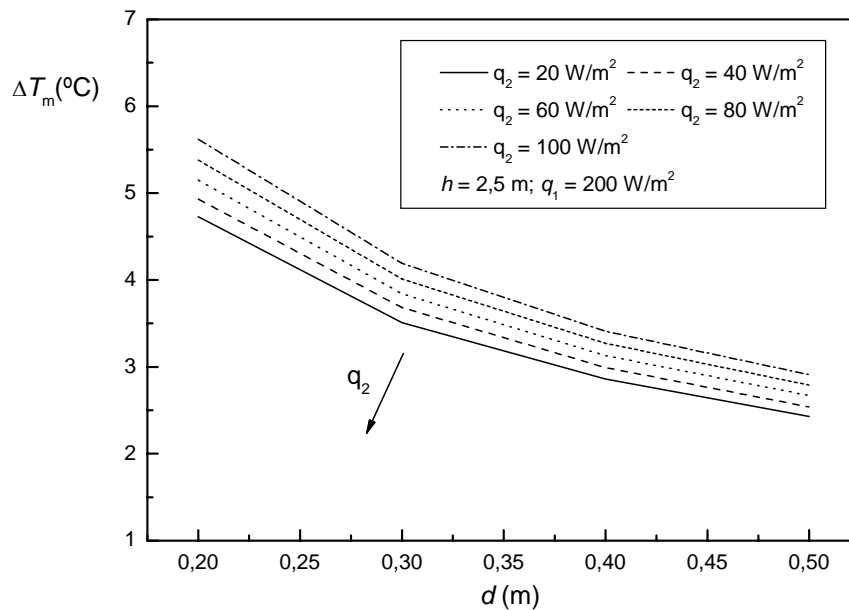


Figura D5.23. Variación con la anchura del conducto, d , del aumento medio de temperatura de la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, ΔT_m , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio interior q_2 .

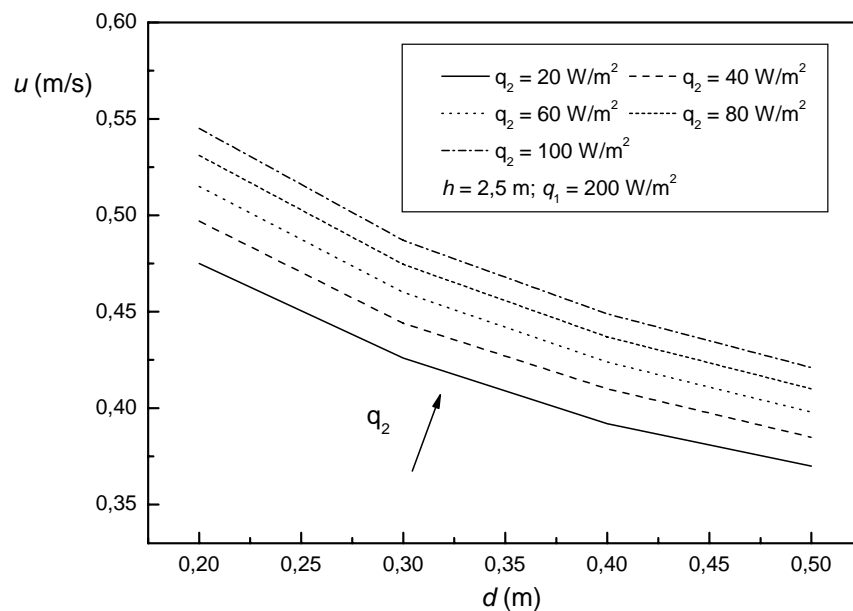


Figura D5.24. Variación con la anchura del conducto, d , de la velocidad de entrada del aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, u , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio interior q_2 .

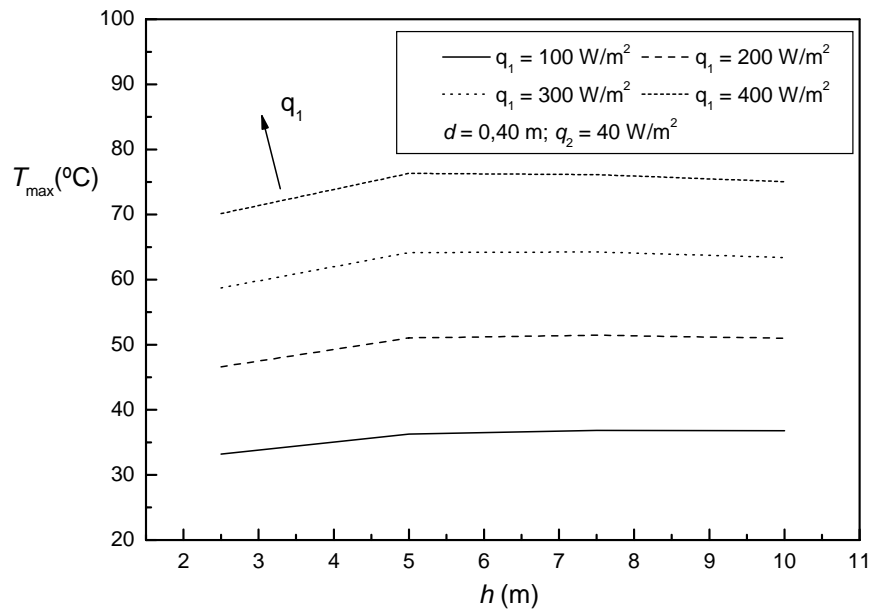


Figura D5.25. Variación con la altura del conducto, h , de la temperatura máxima alcanzada por la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, T_{\max} , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio exterior q_1 .

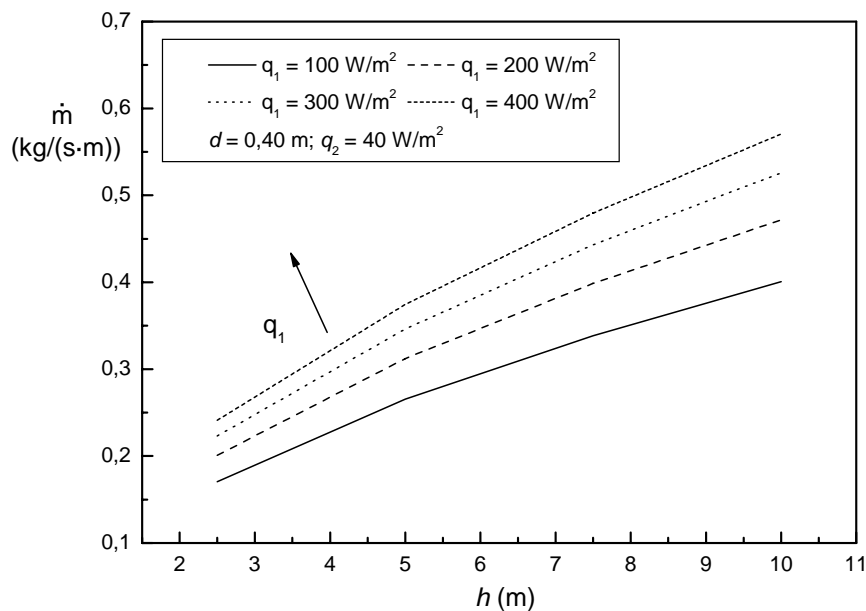


Figura D5.26. Variación con la altura del conducto, h , del gasto másico de aire, \dot{m} , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio exterior q_1 .

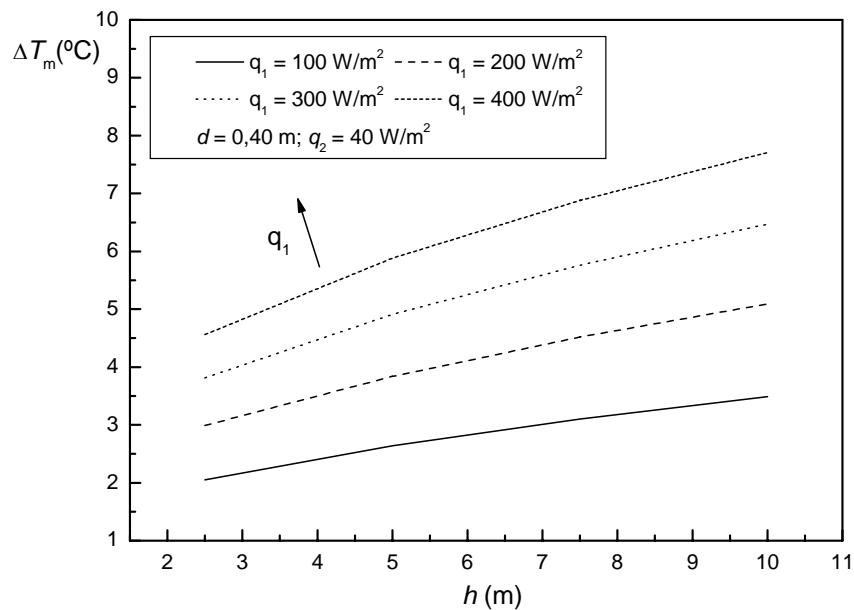


Figura D5.27. Variación con la altura del conducto, h , del aumento medio de temperatura de la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, ΔT_m , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio exterior q_1 .

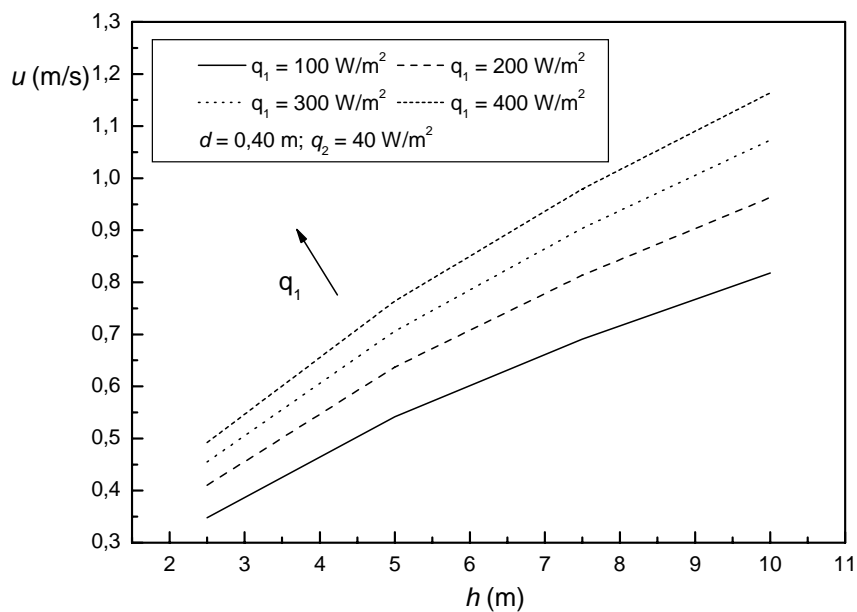


Figura D5.28. Variación con la altura del conducto, h , de la velocidad de entrada del aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, u , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio exterior q_1 .

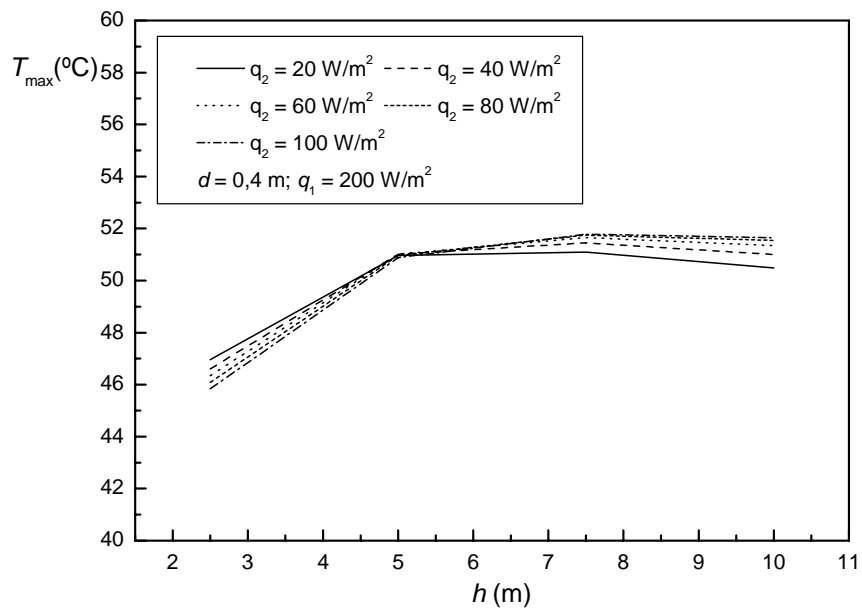


Figura D5.29. Variación con la altura del conducto, h , de la temperatura máxima alcanzada por la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, T_{\max} , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio interior q_2 .

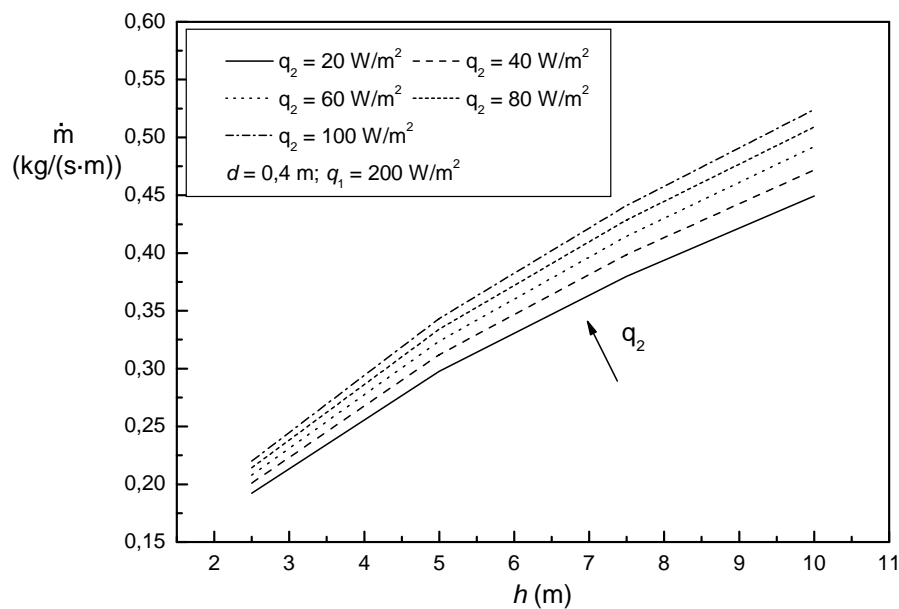


Figura D5.30. Variación con la altura del conducto, h , del gasto másico de aire, \dot{m} , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio interior q_2 .

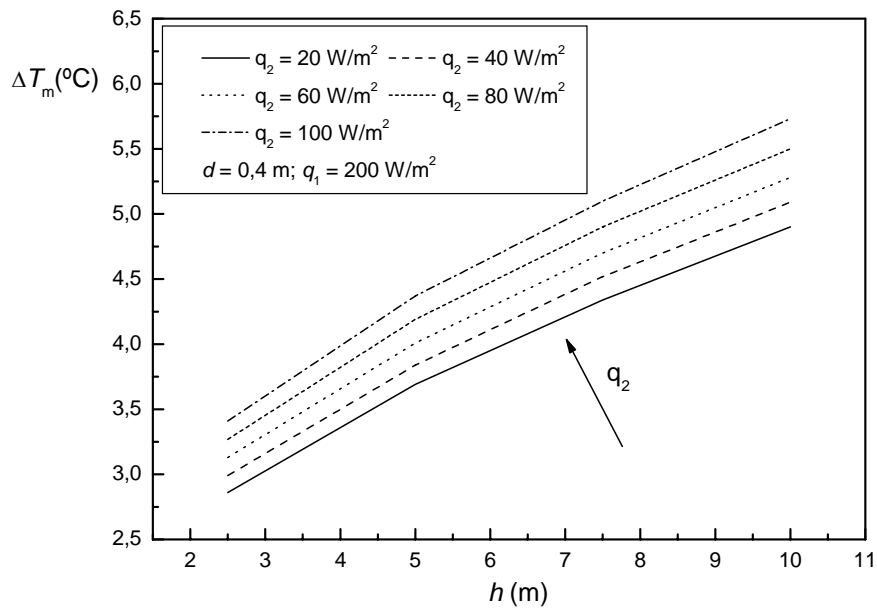


Figura D5.31. Variación con la altura del conducto, h , del aumento medio de temperatura de la corriente de aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, ΔT_m , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio interior q_2 .

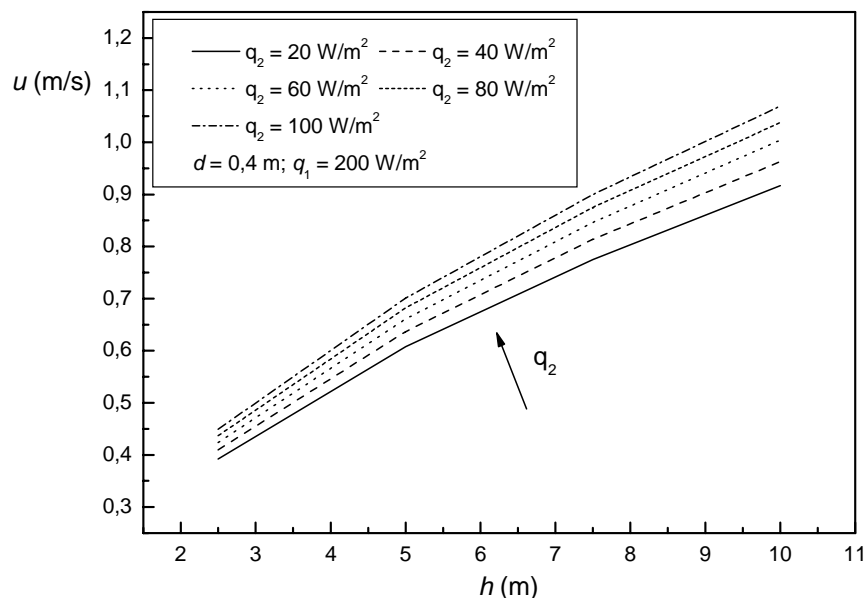


Figura D5.32. Variación con la altura del conducto, h , de la velocidad de entrada del aire en el conducto formado por las dos superficies acristaladas, u , para distintos valores del flujo de calor absorbido por el vidrio interior q_2 .

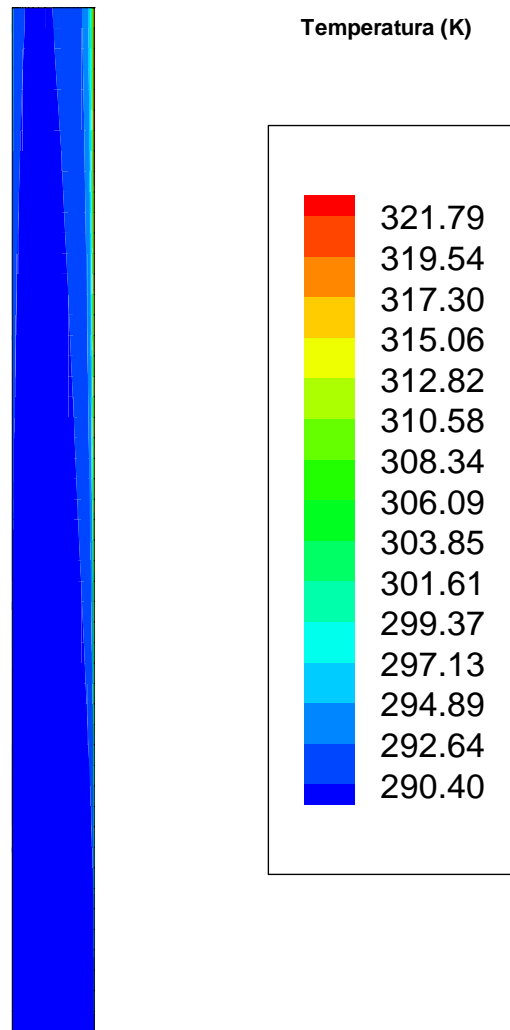


Figura D5.33. Campo de temperaturas entre las superficies acristaladas en el caso $q_1 = 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $q_2 = 40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $d = 0,4 \text{ m}$ y $h = 5,0 \text{ m}$. El color de las distintas zonas indica el valor de la temperatura de acuerdo con la clave indicada.

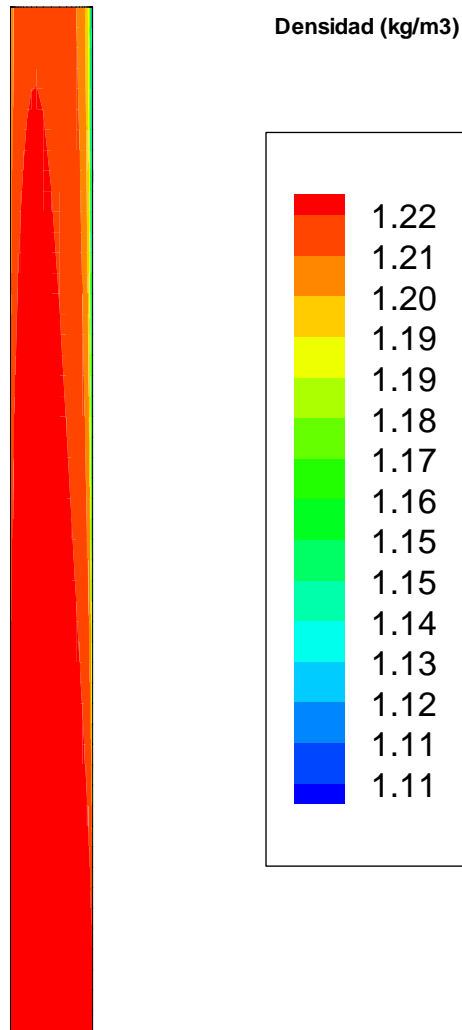


Figura D5.34. Distribución de la densidad del aire que fluye entre las superficies acristaladas en el caso $q_1= 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $q_2= 40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $d = 0,4 \text{ m}$ y $h = 5,0 \text{ m}$. El color de las distintas zonas indica el valor de la densidad del fluido de acuerdo con la clave indicada.

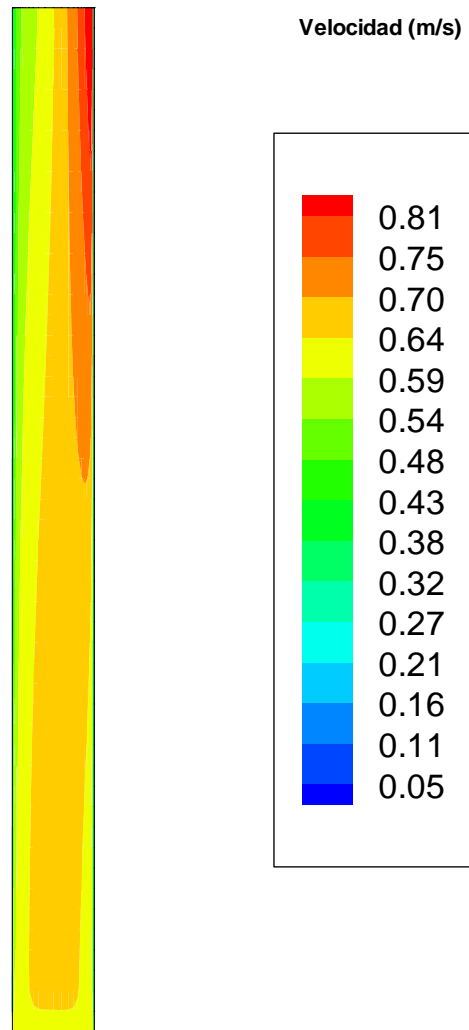


Figura D5.35. Distribución de la velocidad del aire que fluye entre las superficies acristaladas en el caso $q_1= 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $q_2= 40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $d = 0,4 \text{ m}$ y $h = 5,0 \text{ m}$. El color de las distintas zonas indica el valor de la velocidad del fluido de acuerdo con la clave indicada.

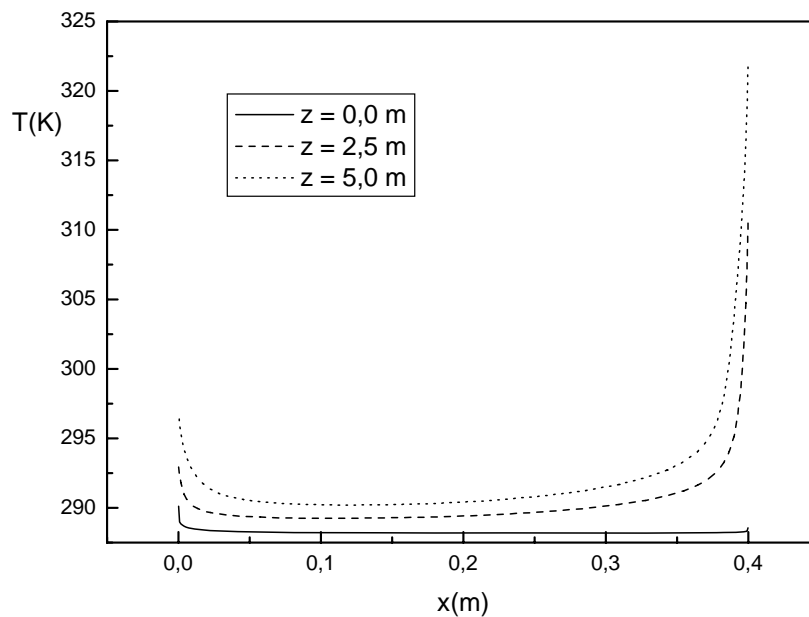


Figura D5.36. Variación con la distancia transversal medida desde la superficie de vidrio interior, x , de la temperatura del aire entre las superficies acristaladas, T , en el caso $q_1=200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $q_2=40\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $d=0,4\text{ m}$ y $h=5,0\text{ m}$. El tipo de línea indica la cota vertical de la sección de medida de acuerdo con la clave indicada; $z=0\text{ m}$ corresponde a la sección de entrada, $z=2,5\text{ m}$ a una sección intermedia y $z=5\text{ m}$ a la sección de salida.

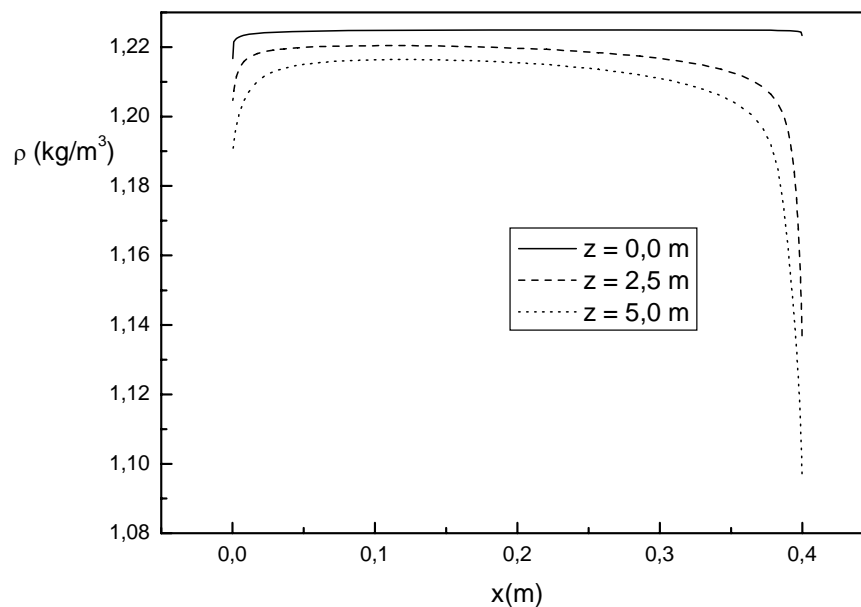


Figura D5.37. Variación con la distancia transversal medida desde la superficie de vidrio interior, x , de la densidad del aire que fluye entre las superficies acristaladas, ρ , en el caso $q_1=200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $q_2=40\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $d=0,4\text{ m}$ y $h=5,0\text{ m}$. El tipo de línea indica la cota vertical de la sección de medida de acuerdo con la clave indicada; $z=0\text{ m}$ corresponde a la sección de entrada, $z=2,5\text{ m}$ a una sección intermedia y $z=5\text{ m}$ a la sección de salida.

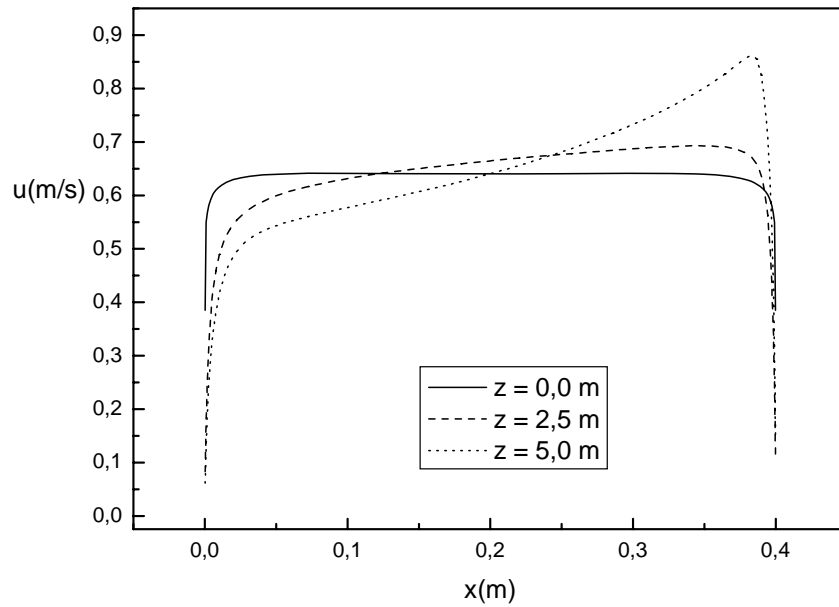


Figura D5.38. Variación con la distancia transversal medida desde la superficie de vidrio interior, x , de la velocidad del aire que fluye entre las superficies acristaladas, u , en el caso $q_1 = 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $q_2 = 40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $d = 0,4 \text{ m}$ y $h = 5,0 \text{ m}$. El tipo de línea indica la cota vertical de la sección de medida de acuerdo con la clave indicada; $z = 0 \text{ m}$ corresponde a la sección de entrada, $z = 2,5 \text{ m}$ a una sección intermedia y $z = 5 \text{ m}$ a la sección de salida.

D6. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método que permite determinar las prestaciones de un conjunto de dos vidrios con una cámara de aire intermedia abierta por los extremos inferior y superior. El vidrio exterior se encuentra expuesto a una irradiación exterior. Como se ha indicado en el apartado D2, tras analizar las variables que intervienen en el problema, su resolución se ha dividido en dos partes.

Por un lado se han determinado las características del conjunto de dos vidrios de propiedades arbitrarias a partir de las características individuales de cada uno de ellos, determinándose la fracción energía transmitida, reflejada y absorbida por dicho conjunto. Además de los propios valores numéricos es importante destacar la información obtenida acerca de cuáles son los parámetros relevantes en el comportamiento conjunto, y cuáles son los parámetros cuya influencia es menor. Conocida la irradiación exterior, con las propiedades del conjunto se puede determinar la magnitud de las energías transmitidas al interior, reflejadas y absorbidas por los vidrios.

En segundo lugar se ha obtenido el campo fluido entre dos placas originado por la transferencia de calor por convección entre las superficies sólidas y el aire. Se han obtenido soluciones variando los valores de los parámetros de entrada al problema. Por una parte se han analizado distintas configuraciones de carga, correspondientes a distintos valores de irradiación externa o bien a distintas características termo-ópticas de los vidrios y por otra parte se ha estudiado la influencia de la geometría del conjunto, en particular de la separación entre las superficies y de su altura. Se ha considerado de especial interés la determinación de la temperatura máxima alcanzada por el aire, el gasto másico de aire originado en el conducto formado por las dos superficies, el incremento medio de temperatura del aire y la velocidad de entrada del mismo, obteniéndose los intervalos de variación de estas magnitudes para los valores de los parámetros considerados. A la vista del campo fluido, es importante señalar también la no uniformidad de las propiedades del aire a lo largo de la cámara, en particular a la salida, siendo por ejemplo la temperatura notablemente más alta cerca de las paredes de vidrio que en el interior del conducto.

D7. REFERENCIAS

Pérez-Grande, I., Meseguer, J., Alonso, G., Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25 (2005) 3163-3175.

Siegel, R. & Howell, J.R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, p. 931, 1992.