

Modelado mediante CFD de la disipación térmica de resistencias eléctricas para frenado de trenes.

Diego Pérez Pastor, Jorge Luis Parrondo Gayo.
UO190530@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

Resumen

Se presenta un estudio numérico sobre la disipación de energía térmica en resistencias eléctricas como las que se emplean para el frenado de trenes. El estudio se ha basado en cálculos CFD con el software Fluent, resolviendo las ecuaciones de constitución con promediado de Reynolds para flujo tridimensional con densidad variable, complementado con un modelo de radiación de tipo S2S (surface to surface). Se han obtenido resultados para distintos refinamientos de mallado, y para distintos parámetros físicos de las resistencias tales como la porosidad de las superficies de la carcasa, y la potencia a disipar. Por último se ofrece un contraste de los resultados numéricos con algunos datos experimentales disponibles.

Palabras clave: Resistencia eléctrica, CFD, convección natural, radiación.

1. Introducción

La energía que se debe disipar a la hora de detener un tren, metro o tranvía (especialmente cuando viajan a altas velocidades) es tan grande, que el uso exclusivo de discos de freno para su detención sería inviable debido al alto desgaste que tendrían y el alto coste de mantenimiento que conllevaría.

Una alternativa a los discos de freno es el frenado regenerativo, que a su vez es más eficiente desde el punto de vista energético, ya que en el frenado, los motores transforman la energía cinética del tren en electricidad, que puede ser alimentada a la red eléctrica para su uso en cualquier otro punto de la misma. Sin

embargo, debido a la fiabilidad que se necesita en el frenado del tren, no se suele usar sistemas regenerativos, sino que la electricidad generada en el frenado es disipada en resistencias eléctricas montadas en los propios trenes.



Fig. 1. Ejemplo de tren y la resistencia que monta.



A la hora de realizar el diseño de dichas resistencias, se debe tener en cuenta la necesidad de situarlas en áreas predefinidas, y normalmente estas zonas son de dimensiones pequeñas y presentan condiciones de trabajo severas, por lo que se deben diseñar minimizando las dimensiones y el peso. Además deben tener una alta resistencia a la vibración, un fácil mantenimiento y sobre todo una alta fiabilidad y durabilidad. Para ello es necesario que la temperatura que alcancen las resistencias en operación no supere ciertos valores críticos, que dependerán del material y otros factores.



Fig. 2. Resistencia diseñada para ser refrigerada por ventilación natural.

La potencia eléctrica generada se transfiere al medio ambiente externo mediante los mecanismos de radiación y convección, pudiendo producirse esta última de manera natural o forzada. Para ambos mecanismos, la potencia térmica transferida, es tanto mayor cuanto mayor es la temperatura. Para evitar que un frenado de lugar a un exceso de temperatura que genere algún daño en algún elemento estructural, se deben tener en cuenta aspectos tales como:

- Potencia a disipar.
- Forma constructiva de las resistencias.
- Cubierta protectora y localización.
- Materiales constructivos.
- Tipo de ventilación: natural o forzada.

Todos estos aspectos no son independientes, sino que están relacionados entre sí. En el caso de resistencias enfriadas mediante convección forzada, la naturaleza del medio refrigerante y su flujo determinan el coeficiente de transferencia térmica, y por lo tanto la tasa de enfriamiento. En el caso de resistencias enfriadas mediante convección natural, la forma y distribución de las resistencias, la posición en la que son instaladas, así como su envoltura y diseño afectan a la

velocidad de circulación del aire, y por lo tanto a la superficie de disipación, por lo que en este segundo caso el cálculo de la temperatura de las resistencias es mucho más complejo.

Durante el frenado, las resistencias suelen operar durante periodos de tiempo pequeños y en régimen transitorio. Además, la disipación térmica suele verse favorecida por la corriente relativa de aire asociada a la velocidad del tren.

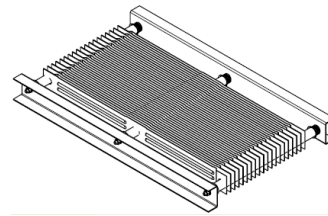


Fig. 3. Detalle de un bloque de parrillas de la resistencia.

En este artículo se ha tratado de estudiar mediante simulación numérica la influencia de efectos físicos en los cálculos de la temperatura alcanzada por las resistencias, tales como la potencia disipada, o la porosidad de la carcasa. También se ha tratado de estudiar el efecto que parámetros de cálculo tales como el mallado tienen en las simulaciones, además de comprobar la necesidad o no de simular el efecto de la radiación en los resultados.

2. CASO DE ESTUDIO Y MODELO

Para la realización del estudio se ha simulado una resistencia compuesta por 18 bloques de resistencias distribuidas en dos filas de tres columnas cada una y con una altura de tres niveles.

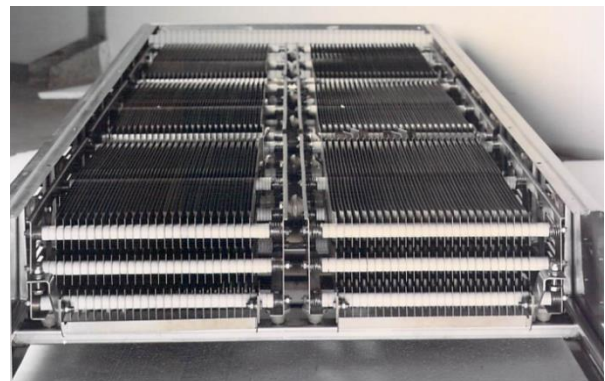


Fig. 4. Resistencia simulada.



Cada bloque de resistencias está compuesto por 45 parrillas, pero por simplicidad ha sido asimilado como un único bloque de aire con generación interna de calor de dimensiones: 0,697 metros de largo, 0,374 metros de ancho y 0,068 metros de altura.

El bloque de resistencias está rodeado por una carcasa porosa de dimensiones: 2,516 metros de largo, 1,224 m ancho y 0,391 m altura.

Por simplicidad, y debido a la simetría de las resistencias respecto a los ejes correspondientes a la longitud y anchura, se ha simulado tan solo una cuarta parte de estas. Para ello se han generado dos superficies de simetría, en aquellas simulaciones que no incluyen el fenómeno de radiación, y en los casos que si se incluye el fenómeno de radiación se han supuesto dos paredes no deslizantes.

Por último y para comprobar el menor mallado aceptable en las simulaciones, se han desarrollado tres modelos, cada uno con una densidad de malla diferente. El modelo con el mallado más fino, ha sido generado con 700.000 celdas; El modelo con el mallado medio, ha sido generado con 250.000 celdas; y el modelo con el mallado más basto, ha sido generado con 15.000 celdas.

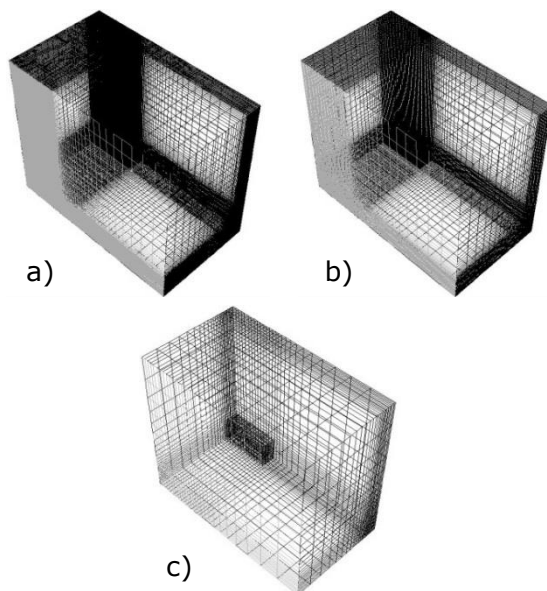


Fig. 5. Comparación entre los distintos mallados simulados: a) Modelo grande, b) modelo mediano, c) modelo pequeño.

Las resistencias simuladas son refrigeradas mediante el mecanismo de convección natural sin viento ni movimiento de tren, por lo que la disipación de calor es muy dependiente de la corriente de aire producida. Además se ha supuesto que las resistencias actúan en régimen permanente. Esta decisión se ha tomado por dos motivos, el primero es que en régimen permanente las condiciones de operación son más exigentes, con lo que se asegura la fiabilidad de los resultados para el comportamiento real, y el segundo motivo es que los ensayos a los que se someten para su verificación, son asimilables a régimen permanente.

Bajo estas condiciones de operación, el cálculo en principio se simplifica, ya que se evita utilizar parámetros que son difíciles de ajustar, tales como la velocidad del tren, o los efectos transitorios, pero incluso bajo estas condiciones, teóricamente más simples, el cálculo de las condiciones térmicas a las que se ven sometidas las resistencias, sigue siendo muy difícil. La práctica habitual, es recurrir a estimaciones simplificadas para algunas configuraciones tipo, tales como las sugeridas en [1], pero ante la baja fiabilidad que ofrecen esas guías de diseño, se hace necesario emplear factores de seguridad muy elevados, lo cual se traduce en resistencias sobredimensionadas, tanto en peso como en tamaño, lo que ocasiona que el coste de las mismas sea, en muchos casos, muy superior al que correspondería. Así pues, sería muy ventajoso poder disponer de herramientas o métodos de cálculo que ofrecieran mayor precisión y fiabilidad en los resultados sin necesidad de utilizar factores de seguridad demasiado elevados.

La alternativa más conveniente en la actualidad pasa por el cálculo detallado de los flujos de aire, que van a absorber la potencia térmica a disipar, mediante simulaciones numéricas con códigos CFD, sin embargo, aunque el empleo de simulaciones CFD ha sido profusamente utilizado para hacer cálculos de transferencia térmica en intercambiadores de calor de todo tipo [2], la literatura técnica apenas si ofrece estudios equivalentes sobre la disipación de potencia desde resistencias eléctricas, y estos suelen estar enfocados hacia aplicaciones de micro electrónica [3] [4].



3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para simular el flujo, se consideraron las ecuaciones de constitución (continuidad, cantidad de movimiento y energía) con promediado de Reynolds (RANS) para flujo 3D estacionario con densidad variable. Todos los cálculos se han efectuado con la versión de Fluent para doble precisión. Como esquema de acoplamiento presión velocidad se escogió el SIMPLE, y la discretización espacial de los términos fue de primer orden. Como modelo de turbulencia se empleó el k- ω SST de Menter [5] con correcciones para efectos de compresibilidad y bajo número de Reynolds.

Como modelo de radiación se empleó el S2S (Surface to surface) basado en el precálculo de zonas de visión entre superficies radiantes. Debido a que las parrillas que forman las resistencias se encuentran dispuestas en paralelo muy próximas entre sí, la mayor parte de la radiación emitida por las mismas incide directamente sobre las parrillas adyacentes. Por este motivo y con vistas a simplificar el modelo, solo se han incorporado las dos parrillas de los extremos de cada bloque, que son las que tienen emisión efectiva hacia el exterior de la resistencia. En consecuencia, se efectuaron las siguientes asignaciones de potencia generada (para el caso de referencia de 200 kW):

- Bloque de parrillas: $\frac{200 \text{ kW}}{18 \text{ bloques}} = 11,1 \text{ kW/bloque}$
- Parrilla: $\frac{11,1 \text{ kW}}{45 \text{ parrillas}} = 247 \text{ W/Parrilla}$
- Potencia de parrilla / volumen = $5,2 \text{ MW/m}^3$
- Coeficiente de emisividad de las parrillas: 0,6
- Bloque interno / volumen = $0,6 \text{ MW/m}^3$

Para incorporar el efecto canal de las parrillas internas en cada bloque, se les asignó a cada uno de ellos un coeficiente de resistencia aerodinámica suficientemente elevado según la dirección y (la dirección perpendicular a las parrillas) de modo que el aire solo pueda circular según la dirección horizontal del eje x, o en la dirección vertical.

Además de los extremos de cada bloque, se consideran superficies participantes en la radiación al suelo y el plano horizontal superior (presión atmosférica constante). A las superficies que delimitan la caja de resistencias se les asignó la condición de "porous jump" a fin de tener en

cuenta el efecto de caída de presión por resistencia aerodinámica asociada a la reducción de sección efectiva de paso: a menor porosidad ϵ mayor resistencia aerodinámica. Para asignar los coeficientes de resistencia, se hizo uso de la ecuación de pérdidas de carga de Borda:

$$C = (1/\epsilon - 1)^2 \quad (\text{ec. 1})$$

Siendo C el coeficiente de pérdidas singulares correspondiente a cada superficie y ϵ la relación entre la sección abierta y la total. En el programa Fluent, la condición de "porous jump" no es compatible con radiación, por ello, cabe esperar que la temperatura calculada para la caja de la resistencia sea inferior a la real, pues en la realidad estas superficies sí que absorberían buena parte de la radiación emitida.

4. RESULTADOS CASO DE REFERENCIA

Para comprobar la validez del diseño y estimar la fiabilidad de los resultados, se ha generado y estudiado un modelo de referencia. Este caso de referencia ha sido generado con un mallado intermedio de 250.000 celdas, con una potencia a disipar de 200 kW y una carcasa de rejilla protectora cuya porosidad equivalente es idéntica en todas sus caras e igual al 50% de la superficie. En este caso de referencia se ha tenido en cuenta el fenómeno de radiación.

En este modelo de referencia, se han estudiado los diagramas de velocidad, presión y temperatura en dos planos de referencia, el plano X (Π_x), que corta por la mitad al bloque de resistencias según la dirección del eje x, y el plano Y (Π_y) que corta por la mitad a los bloques de resistencias según el eje y. Ambos planos se encuentran representados esquemáticamente en la Fig. 6.

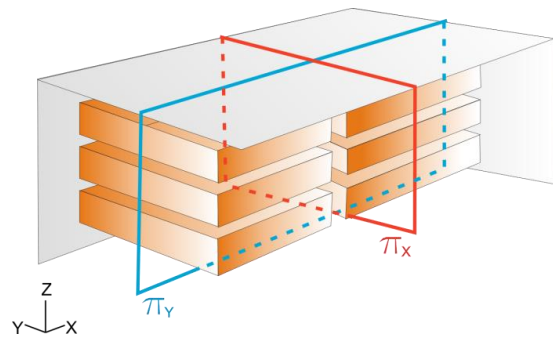


Fig. 6. Detalle del modelo en el que se indican los planos estudiados.

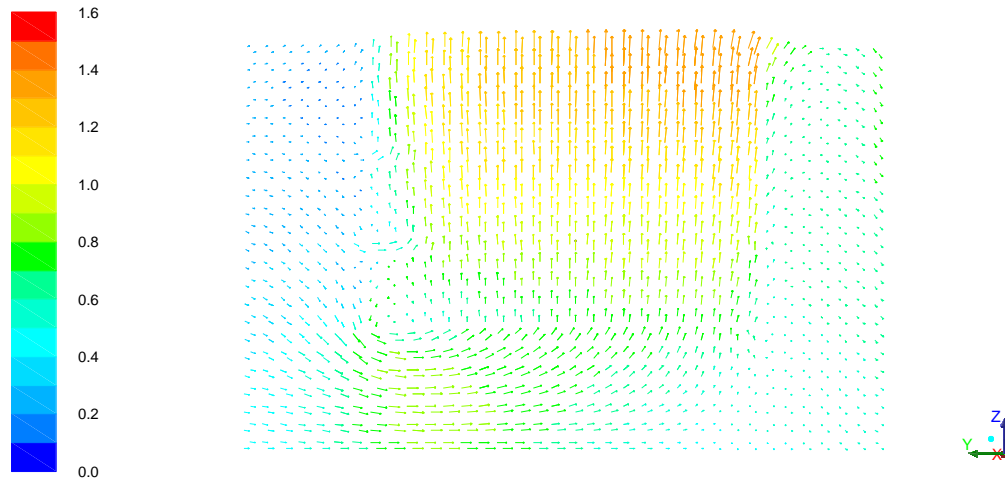


Fig. 7. Mapa de velocidades (m/s) en el plano x.

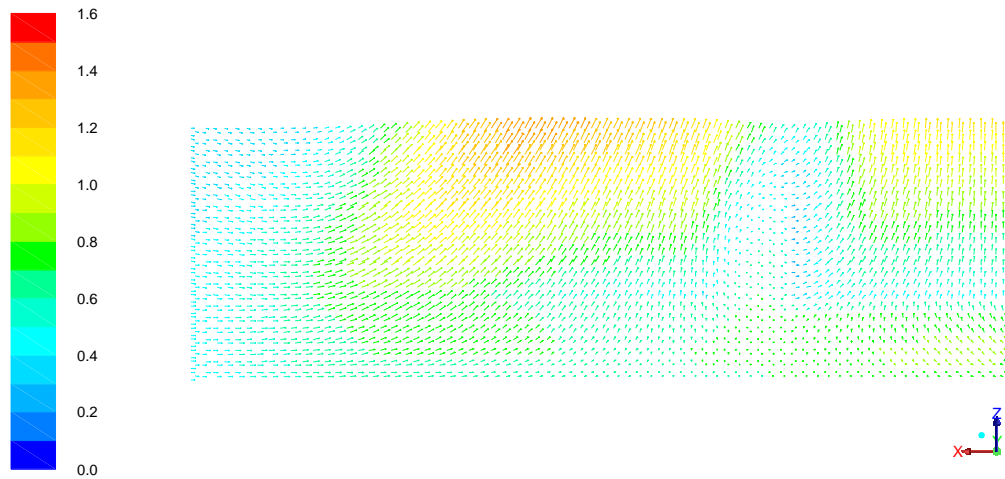


Fig. 8. Mapa de velocidades (m/s) en el plano y.

Al analizar los mapas de velocidad, se observa que la corriente de aire entrante por los laterales de la carcasa, va ascendiendo y calentándose al pasar por las resistencias. Este calentamiento, provoca un descenso de densidad que hace que el aire se expanda. Esta expansión hace necesario un aumento de velocidad con el fin de mantener el flujo másico constante, lo cual se observa claramente en los mapas de velocidad.

En el caso del mapa de velocidades que corresponde al plano y, se observan 2 zonas de flujo claramente diferenciadas. Estas zonas corresponden con las zonas de resistencias situadas en el modelo, y en ellas se observa el fenómeno de aceleración comentado en el párrafo anterior.

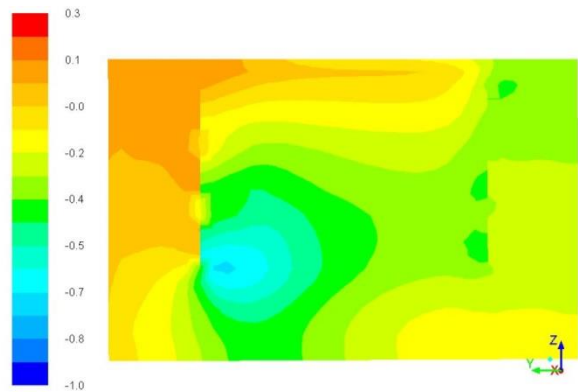


Fig. 9. Mapa de presiones (Pa) en el plano X.

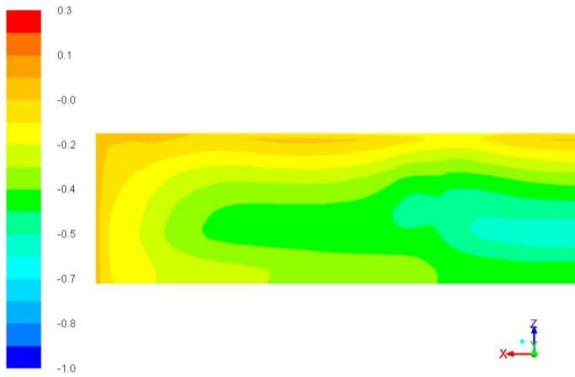


Fig. 10. Mapa de presiones (Pa) en el plano Y.

Por otro lado, si se observan los mapas de presión, se observa sin lugar a dudas, que las variaciones de presión son insignificantes, pudiendo tomarse la presión en todo el modelo constante e igual a la atmosférica.

Las pequeñas diferencias de presión existentes en el modelo son debidas a zonas de estela generadas por el aire al atravesar las lamas laterales de los bloques de parrillas.

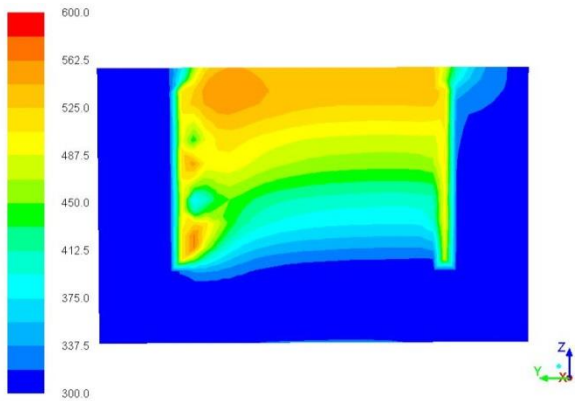


Fig. 11. Mapa de temperaturas (K) en el plano X.

Al analizar los mapas de temperatura, se comprueba que en la zona de resistencias, la temperatura aumenta al aumentar la altura, esto es debido al movimiento ascendente del aire, y al calentamiento del mismo al atravesar los bloques de parrilla que se encuentran a alta temperatura. Además de este aumento, también se puede observar un aumento de temperatura en aquellas zonas correspondientes a zonas de estela.

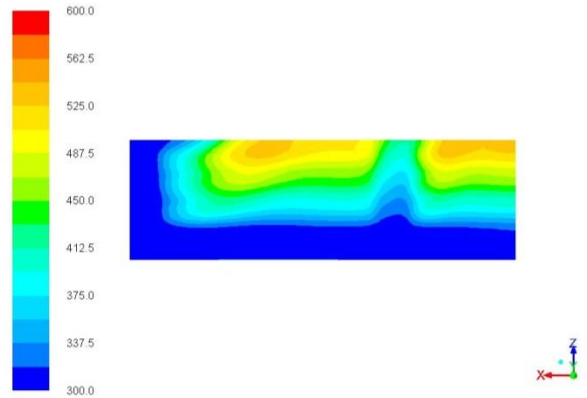


Fig. 12. Mapa de temperaturas (K) en el plano Y.

En el mapa de temperaturas, al igual que ocurría en el mapa de velocidades, se observa con claridad las distintas zonas de parrillas, caracterizadas por la diferencia de temperaturas con el aire que las rodea, y el aumento de la misma según la dirección vertical.

Tras verificar la coherencia de los resultados, se ha tratado de identificar la zona de la resistencia cuyo estudio pudiese aportar una mayor cantidad de datos. Para ello se ha dividido el modelo en 3 zonas, abarcando cada una de ellas el espacio correspondiente a media parrilla, tal como se muestra en la Fig. 13. A su vez, se ha dividido cada una de las zonas en 8 niveles correspondientes con las partes superior e inferior de las parrillas, el suelo y la parte superior de la caja.

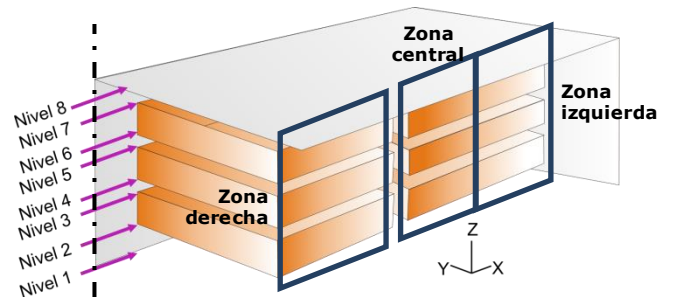


Fig. 13. Detalle del modelo en el que se detallan las distintas zonas así como los niveles de estas.



Al comparar las distintas zonas en las que se ha dividido el modelo, se puede observar que el flujo másico de aire según la dirección vertical es muy inferior en la zona izquierda de la resistencia. Esto es debido a que la zona izquierda de la resistencia se encuentra situada junto a la carcasa, por la cual el aire entra en dirección horizontal, y al ser muy pequeña la distancia existente entre ellos, el aire no tiene espacio material para cambiar su dirección, por lo que el flujo másico que atraviesa esta zona de parrillas lo hace mayoritariamente en dirección horizontal.

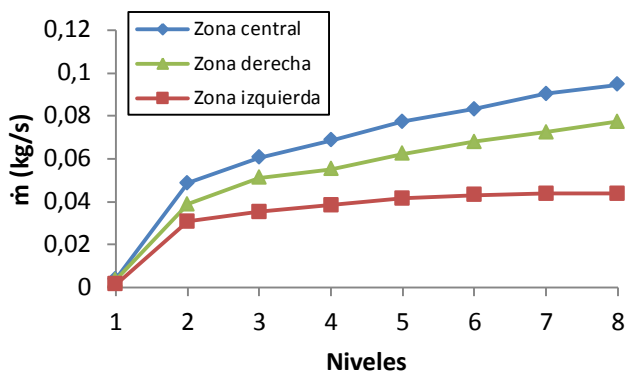


Fig. 14. Flujo másico que atraviesa en dirección vertical los niveles de las distintas zonas de la resistencia.

En la zona central el flujo másico que circula es superior a la zona derecha tal como se observó en los mapas de velocidad debido a la pérdida de densidad que ha sufrido al atravesar ya parte de la resistencia, por lo que la zona central parece un buen punto para llevar a cabo el resto de estudios.

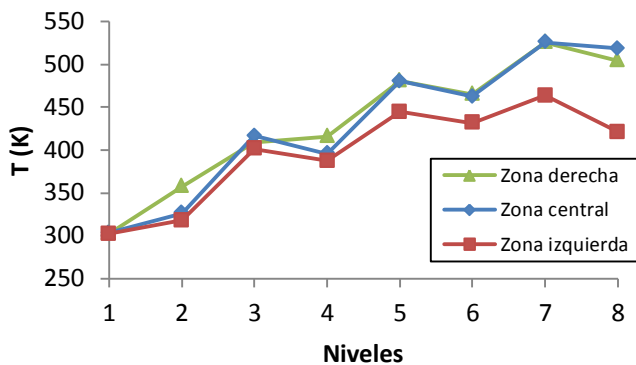


Fig. 15. Temperatura alcanzada en los niveles de las distintas zonas de la resistencia.

Además de lo ya expuesto anteriormente, se observa que el flujo másico es superior en los niveles mayores, lo cual es lógico si se tiene en cuenta que la entrada de aire en cada nivel es de proporciones similares, y el flujo se mueve en dirección ascendente.

Si se atiende al gráfico de temperaturas, se observa que la temperatura alcanzada en la zona izquierda de la resistencia es similar a la alcanzada en las otras zonas en los primeros niveles, esto es debido al poco flujo másico vertical existente en los primeros niveles de todas las zonas, así como a la menor velocidad del aire al atravesar la parte izquierda de la resistencia, y la baja temperatura del mismo al hacerlo.

Por otro lado, también se observa un descenso en la temperatura del aire entre la parte superior de una parrilla y la parte inferior de la siguiente. Esto es debido al flujo de aire horizontal existente entre cada par de parrillas, que se mezcla con el aire ascendente y disminuye su temperatura al tratarse de un aire que prácticamente no ha estado en contacto con las superficies de las parrillas. Por lo tanto, y como ya se ha comentado anteriormente, la zona de estudio más interesante es la zona central de las resistencias.

5. EFECTO DEL MALLADO Y LA RADIACIÓN

Una vez decidida la zona de estudio, y comprobada la coherencia de los resultados obtenidos en el modelo genérico, se debe estudiar la influencia de otros factores de simulación, tales como la densidad del mallado y la inclusión o no del fenómeno de radiación.

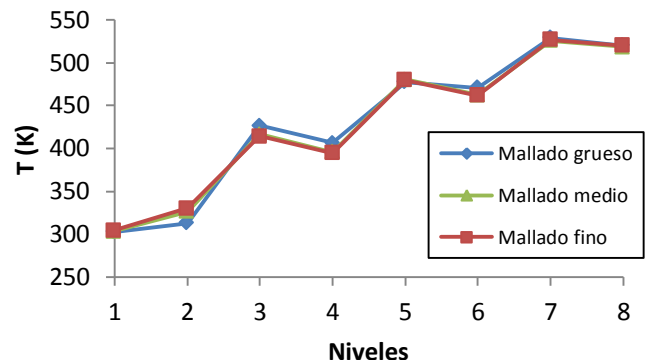


Fig. 16. Temperatura en los distintos niveles de la zona central para distintas densidades de malla.



Atendiendo a la temperatura alcanzada en los distintos niveles de la zona central de la resistencia, se observa que la influencia del mallado en la misma es prácticamente inexistente.

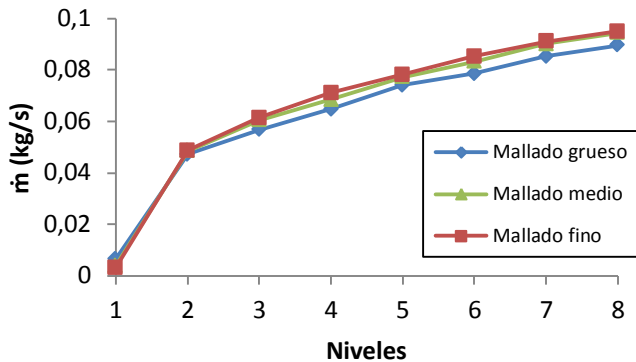


Fig. 17. Flujo másico vertical que atraviesa los distintos niveles de la zona central para distintos mallados.

Si se estudia ahora la influencia del mallado en el flujo másico según la dirección vertical, las diferencias que se observan son algo mayores que en el caso de la temperatura, y al contrario que en el caso anterior, estas diferencias se ven incrementadas al aumentar el nivel que se estudie, pero sin llegar en ningún caso a ser de una magnitud demasiado excesiva.

Con todo ello, se ha decidido tomar como aceptable el mallado intermedio, al poder realizarse las simulaciones con él en un tiempo razonable, sin que las diferencias en los resultados obtenidos sean significativas. Por lo que todas las simulaciones realizadas a partir de este punto, se han hecho con el mallado medio.

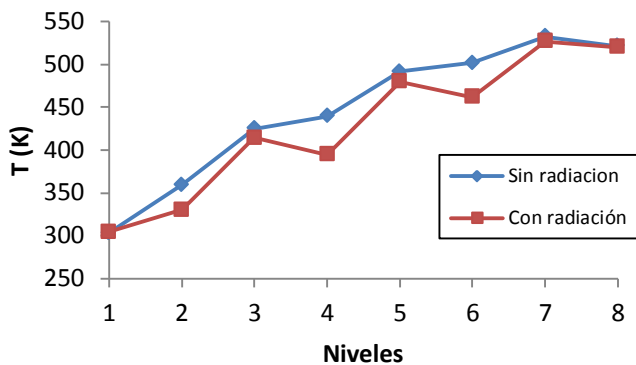


Fig. 18. Temperatura en los distintos niveles de la zona central simulando o no el fenómeno de radiación.

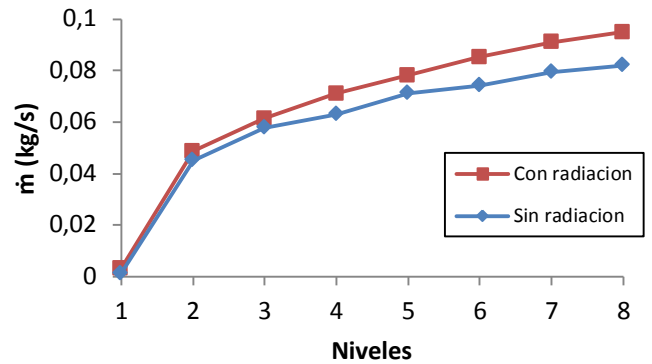


Fig. 19. Flujo másico que atraviesa los distintos niveles de la zona central para el modelo que simula o no el fenómeno de radiación

La influencia que se observa al incluir el fenómeno de radiación, es más notoria que la que se observó en el caso de las variaciones de mallado. Por un lado, el efecto de incluir la radiación es el de disminuir la temperatura del aire en los distintos niveles Fig. 18. Esto es debido a que la fracción de potencia emitida por radiación se proyecta a contornos lejanos sin dar lugar a calentamiento de la corriente de aire a través de la resistencia, con lo que al operar con una potencia térmica generada constante, la transferencia de calor por convección es más pequeña que al no contemplar el fenómeno de radiación. Por otro lado, el flujo másico resulta ser más grande al incluir la radiación. Este efecto se puede achacar a que el menor aumento de temperatura del aire conlleva valores más altos de densidad, contrarrestándose así la posible reducción de velocidad de paso.

6. EFECTO DE LA POROSIDAD EN LAS SUPERFICIES DE LA CUBIERTA

Una vez decidido el modelo que se va a estudiar, se llevara a cabo el estudio de la influencia que tiene la porosidad de la cubierta de la resistencia en la temperatura alcanzada en los distintos puntos.

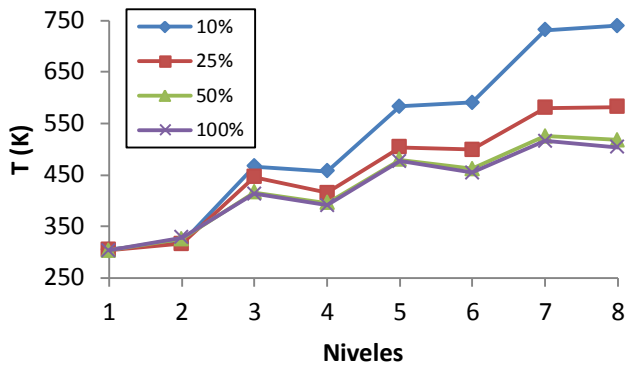


Fig. 20. Temperatura alcanzada en los distintos niveles de la zona central de las resistencias para distintas porosidades de la caja superior.

Como se observa en la Fig. 20, al disminuir la porosidad de la caja z, la temperatura que se alcanza en los distintos niveles del modelo es superior, ya que se disminuye el flujo másico que circula, y con él la potencia térmica disipada.

Se observa además, que las diferencias de temperatura existentes para porosidades superiores al 50% es mínima, esto es debido a que un aumento en la porosidad no genera un aumento en el flujo de aire como se observa en la Fig. 21, ya que en este caso, la entrada de aire a través de las otras superficies de la cubierta actúa como limitante del flujo másico que circula.

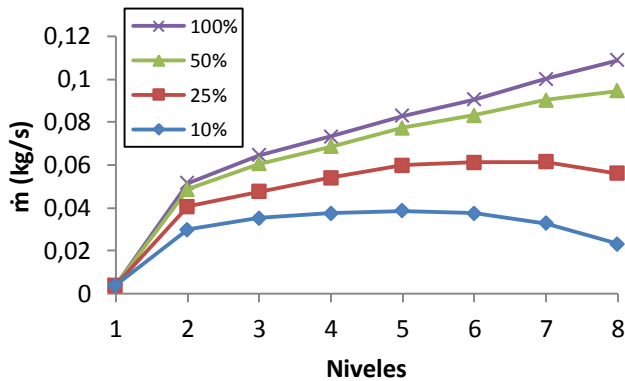


Fig. 21. Flujo másico que atraviesa los distintos niveles de la zona central de las resistencias para distintas porosidades de la caja superior.

Si se observa ahora la influencia que tiene una variación en la porosidad de las distintas superficies de la cubierta, se observa que la cubierta que ejerce una mayor influencia es la

cubierta superior, esto es debido a que es la única cubierta que actúa de punto de salida de aire, y por lo tanto una disminución de la porosidad no puede ser compensado con ninguna otra superficie de la cubierta.

También se observa que al disminuir la porosidad de las cajas laterales, no se observan grandes diferencias respecto al caso normal. Esto es debido a que aunque se limite una de las superficies de entrada de aire, la otra superficie puede compensar dicha disminución.

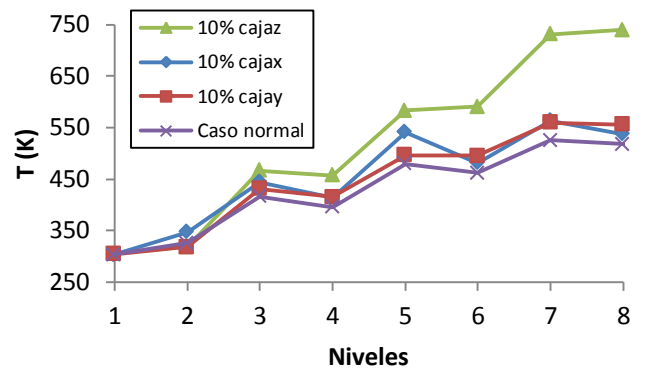


Fig. 22. Temperatura alcanzada en los distintos niveles de la zona central de las resistencias para porosidades variables en las distintas partes de la cubierta exterior de las resistencias.

También se observa que la influencia en el flujo de aire de la cubierta situada paralela al eje y es menor a la situada paralela al eje x, lo cual es lógico al presentar la primera una menor superficie.

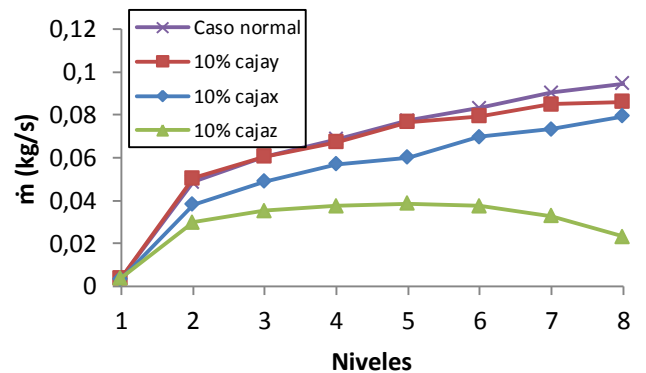


Fig. 23. Flujo másico que atraviesa los distintos niveles de la zona central de las resistencias para porosidades variables en las distintas partes de la cubierta exterior de las resistencias.



7. EFECTO DE LA POTENCIA DISIPADA

El último estudio llevado a cabo es el de la influencia que tiene la potencia a disipar en la resistencia sobre la temperatura alcanzada en los distintos niveles Fig. 24 y el flujo másico que los atraviesa Fig. 25.

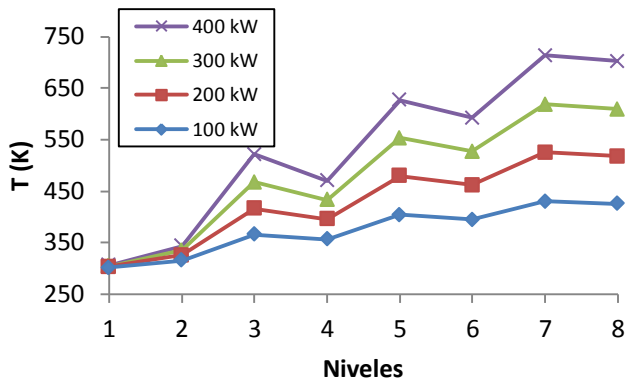


Fig. 24. Temperatura alcanzada en los distintos niveles de la zona central de las resistencias para distintas potencias térmicas a disipar.

Si atendemos al efecto que tiene sobre la temperatura un aumento en la potencia a disipar, se observa que al multiplicar por cuatro la potencia a disipar, la temperatura en algunos puntos de la resistencia llega a doblarse, lo cual puede tener un efecto muy negativo sobre las mismas, pudiendo incluso llegar a dañarlas, lo cual pone de manifiesto la necesidad de calcular bien la potencia a disipar por las resistencias antes de proceder a su diseño.

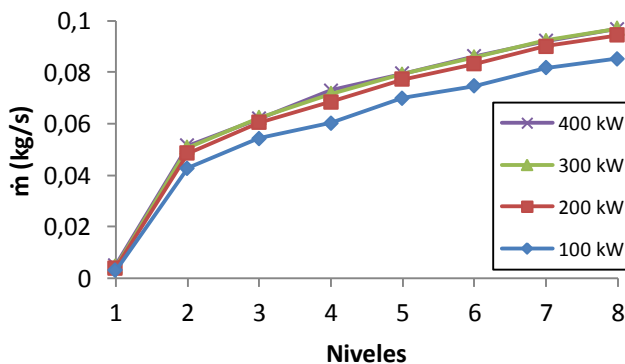


Fig. 25. Flujo másico que atraviesa los distintos niveles de la zona central de las resistencias para distintas potencias térmicas a disipar.

Por otro lado, si atendemos al efecto que causa un aumento de la potencia en la variación de flujo másico que atraviesa las resistencias, se observa que un aumento de la potencia lleva ligado un aumento del flujo másico vertical, pero este aumento no es de una magnitud significativa tal como cabría esperar. La explicación más plausible de este fenómeno es que el aumento de la temperatura genera una disminución de la densidad, que trae consigo un aumento de la velocidad del aire. Esto último provoca un aumento en las pérdidas de carga con lo que se dificulta el paso de aire, viéndose con ello contrarrestado el aumento de velocidad generado por la disminución de la densidad.

8. CONTRASTE EXPERIMENTAL

Para contrastar los datos con algún resultado experimental, se han obtenido datos de una resistencia, que si no tiene igual distribución de las parrillas, al menos tiene unas dimensiones parecidas, por lo que puede servir como punto de partida para la comprobación de los valores obtenidos mediante métodos numéricos.

La resistencia ensayada experimentalmente posee 12 parrillas, dispuestas en 2 filas, de 2 columnas cada una y 3 pisos tal como se muestra en la Fig. 26. En ella se ha medido la temperatura de las parrillas en distintos puntos de la misma mediante una serie de termopares.

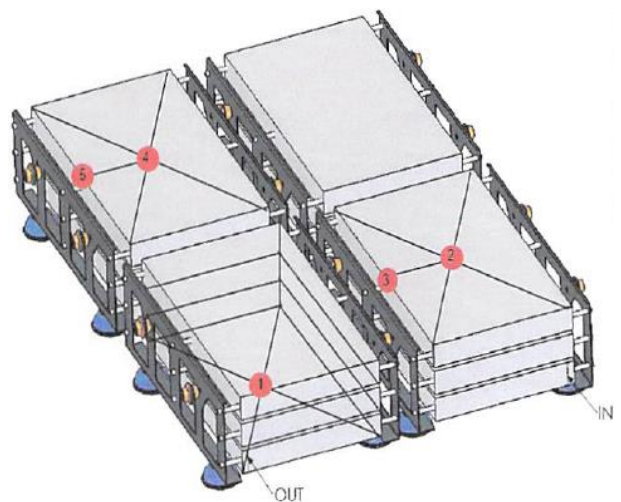


Fig. 26. Disposición de termopares en la resistencia ensayada.

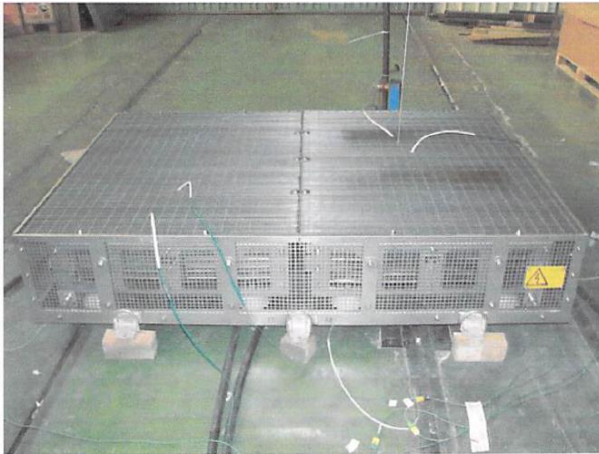


Fig. 27. Resistencia y termopares durante el ensayo.

El ensayo se ha llevado a cabo durante el tiempo suficiente para que se estabilizara la potencia generada por las resistencias, durante ese tiempo se ha medido la temperatura en los distintos puntos de la resistencia mediante los termopares. La potencia en la que se ha estabilizado la resistencia es de unos 295 kW, por lo que podremos contrastar los resultados experimentales con el modelo de 300 kW simulado.

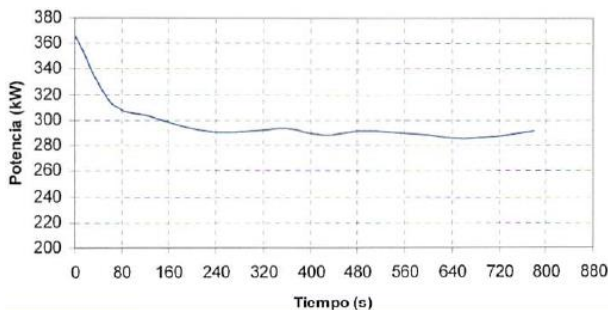


Fig. 28. Evolución de la potencia eléctrica generada durante el ensayo.

Al comparar los resultados experimentales del termopar 2 con los resultados numéricos que se muestran en la Fig. 24, se puede comprobar que los resultados de temperatura experimentales son superiores a los resultados numéricos. Esta diferencia obtenida se debe a una gran cantidad de factores. El primer factor que influye es la temperatura del aire que refrigera las resistencias, en el caso de nuestra simulación, se ha supuesto una temperatura ambiente de 25°C, mientras que en el caso experimental, la temperatura es

probable que haya sido mayor, ya que el ensayo se ha llevado a cabo en una nave cerrada, y el aire del ambiente se puede haber ido calentando durante el ensayo.

Otro factor a tener en cuenta en la diferencia de resultados, es que en los obtenidos numéricamente, se trata de una temperatura promedio de la superficie de la parrilla, mientras que en el resultado experimental, se ha obtenido la temperatura del punto central de la parrilla, el cual se supone que tendrá la mayor temperatura de la parrilla.

Otro factor a tener en cuenta es que en la prueba experimental se mide la temperatura de las parrillas, mientras que en los resultados numéricos se mide la temperatura del aire que circula, y la temperatura de este último es muy inferior

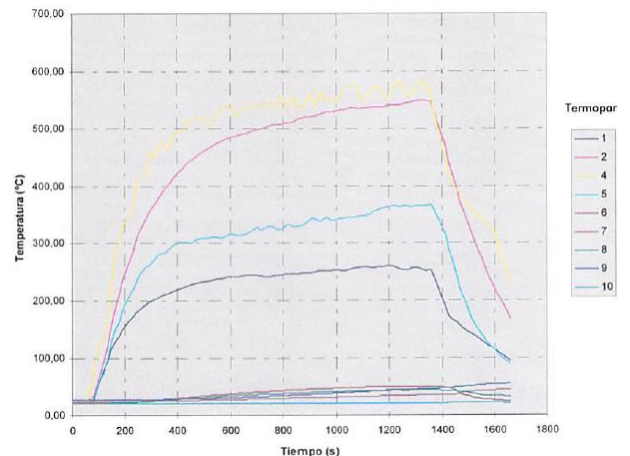


Fig. 29. Señales de temperatura registradas durante el ensayo.

Con todo ello queda claro que los resultados numéricos no pueden ser completamente validados, pero en la comparación se comprueba que tanto los resultados numéricos como los experimentales no difieren en un valor excesivo, por lo que se puede concluir que los resultados numéricos obtenidos podrían ser válidos.



9. CONCLUSIONES

1) Las pruebas efectuadas con distintas densidades de mallado ofrecen poca diferencia de resultado en cuanto a temperaturas promedio en distintos planos del dominio, y flujos máxicos verticales, en consecuencia, se puede asumir que los mallados son adecuados y que el mallado escogido (mallado intermedio de 250.000 celdas hexaédricas) es suficiente para los propósitos del estudio.

2) El efecto de la radiación es significativo en los resultados a pesar de que solo se ha incorporado radiación desde las 2 parrillas externas de cada bloque, es decir, las simulaciones sin incluir la radiación pueden inducir a una distorsión significativa en los resultados.

3) El efecto de la porosidad de los contornos de la caja de resistencias es particularmente significativo para el caso de la superficie del techo. Al menos, dicha superficie debería de tener una porosidad efectiva del 50%, pues la disminución de la porosidad por debajo de ese valor da lugar a incrementos notables de temperatura. Para las otras superficies, sin embargo, el efecto es menos relevante.

4) el efecto de incrementar la potencia eléctrica a disipar es principalmente el de incrementar la temperatura en cada superficie de la resistencia, aproximadamente a razón de 100°C en las parrillas superiores por cada 100 kW añadidos para la configuración ensayada. En cambio, el flujo máxico de aire circulante crece en muy poca medida al incrementar la potencia.

5) Los datos experimentales disponibles se refieren a una resistencia de configuración diferente a la simulada, por lo que la diferencia entre las temperaturas medidas y calculadas es significativa. Sin embargo esa diferencia se justifica bien por la mejor capacidad de circulación de aire del modelo, el hecho de que las medidas se refieren a los puntos de mayor temperatura, y, sobre todo, a que las predicciones se refieren a temperatura del aire, mientras que las medidas se refieren a temperatura de las propias parrillas. Así pues, los resultados de las simulaciones

efectuadas se pueden considerar de magnitud razonable.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Aktiebolaget Kanthal*. "The Kanthal Handbook: Electric Heating and Resistance Material". 1963.
- [2] M. M. A. Bhutta, N. Hayat, M. H. Bashir, A. R. Khan, K. N. Ahmad, S. Khan. "CFD applications in various heat exchanger designs: A review". *Applied Thermal Engineering* 32, 1-12. 2012.
- [3] Q. Nguyen, K. V. Pochiraju. "Behavior of thermoelectric generators exposed to transient heat sources". *Applied Thermal Engineering* 51, 1-9. 2013.
- [4] D. Mitrani, J. Salazar, A. Turo, et al. "One-dimensional modeling of TE devices considering temperature - dependent parameters using SPICE". *Microelectronics Journal* 40, 1398-1405. 2009.
- [5] F. R. Menter. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *AIAA Journal*, vol. 32, no 8. pp. 1598-1605. 1994.