

Estudio comparativo del comportamiento térmico de diferentes disipadores de calor para impresoras 3D a través de MEF

R. Jerez Mesa¹, G. Gómez Gras², V. Plana García³, J.A. Travieso Rodríguez⁴, J. Llumà Fuentes⁵

¹EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Ingeniería Mecánica. ramon.jerez@upc.edu

²EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Ingeniería Mecánica. giovanni.gomez@upc.edu

³EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Ingeniería Mecánica. victoria.pl.ga@outlook.com

⁴EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de Ingeniería Mecánica. antonio.travieso@upc.edu

⁵EEBE. Universitat Politècnica de Catalunya. Dpto. de C^a de Materiales e Ing^a Metalúrgica. jordi.lluma@upc.edu

Las impresoras 3D de código abierto han experimentado una rápida expansión durante los últimos años, protagonizando una verdadera revolución a niveles doméstico y educativo, y ocupando nuevos nichos de mercado como tecnología de fabricación más allá de su aplicación histórica reducida al ámbito industrial. Este artículo centra su análisis en una de las partes de estos dispositivos, a saber, el cabezal extrusor, y tiene como objetivo estudiar su comportamiento térmico comparando la eficacia y funcionamiento de tres diferentes soluciones geométricas de su disipador de calor. La primera se corresponde con un extrusor comercial, mientras que las otras dos han sido fabricadas en el taller de la universidad. Por otro lado, se incluye en el análisis la variación del caudal de refrigeración del ventilador acoplado a dichos disipadores. En conjunto, ambos componentes son responsables de la disipación convectiva de calor que asegura la conservación de los elementos estructurales de la máquina. Para ello, se ha elaborado un modelo de elementos finitos que representa el perfil de temperaturas de los tres extrusores analizados en estado estacionario. Estos resultados analíticos son posteriormente comparados con el perfil real de temperaturas, elaborado con resultados reales medidos a través de un montaje experimental.

1. Introducción

La impresión 3D es uno de los principales vectores de innovación en el campo de las tecnologías de fabricación a nivel mundial. Se trata de un término genérico empleado para denominar cualquier proceso de fabricación aditivo o capa a capa, esto es, un conjunto de técnicas empleadas para obtener piezas finales o prototipos a partir de un archivo CAD por adición progresiva de un material en bruto. La estereolitografía, el *laminated object manufacturing* (LOM) o el *fused deposition modeling* (FDM) son algunos de estos procesos. La principal diferencia entre ellos es el estado del material bruto empleado, su estado de agregación inicial, y la manera en que es procesado para ser introducido en la máquina [1]. La principal ventaja de estos sistemas es que permiten fabricar piezas personalizadas de geometría más o menos compleja, para aplicaciones específicas en un corto período de tiempo [2]. El potencial de los sistemas de impresión 3D para conseguir geometrías complicadas, inviables mediante otras técnicas, y la posibilidad de procesar materiales biocompatibles, la posiciona como tecnología de referencia para desarrollo de negocios [3] y la promoción de áreas estratégicas de desarrollo como es la bioingeniería [4].

De todas las tecnologías de fabricación aditiva, la de FDM ha inspirado recientemente iniciativas en código abierto para desarrollar dispositivos de impresión capaces de satisfacer la necesidad de usuarios en contextos no industriales [5]. La FDM se basa en extruir un filamento caliente de un material termoplástico (habitualmente ABS, PLA y PC, entre otros) mediante un cabezal extrusor. Dicho componente está montado en un sistema motorizado, que operado a través de un código de control numérico, se desplaza según un patrón preconcebido. Durante este movimiento, el sistema alimenta material semifundido, conformando así la geometría de la capa en cuestión. Cuando esta capa es completada, el cabezal extrusor asciende una altura determinada, y la siguiente capa comienza a ser depositada [6].

Las primeras impresoras 3D de sobremesa fueron desarrolladas por un grupo liderado por el profesor Adrian Bowyer, en la Universidad de Bath, dando lugar a la iniciativa *Replicating Rapid Prototyper*, también conocida como RepRap. El resultado de este proyecto fue un diseño abierto de impresora 3D autorreproducible, publicando

en la red los componentes y los sistemas de funcionamiento en que se basa el sistema [7]. A lo largo de los años, la accesibilidad a la información sobre impresoras 3D de código abierto ha aumentado gracias a la contribución de usuarios innovadores y *spin-offs* inspirados en la iniciativa RepRap [8]. Como consecuencia de este hecho, la impresión 3D se ha expandido rápidamente a nivel doméstico, hecho también que se ha reforzado por el bajo precio por el que se pueden adquirir los dispositivos de este tipo. La adopción de la impresión 3D por parte de usuarios no industriales también ha llegado al ámbito de los centros educativos, donde se emplea como recurso de innovación educativa de manera satisfactoria [9]. Junto con el desarrollo de aspectos técnicos sobre impresoras 3D de código abierto, otros aspectos económicos ligados al proceso han sido estudiados, definiendo métodos para calcular el coste que supone fabricar piezas con las mismas [10,11].

A pesar del crecimiento del conocimiento que la comunidad ha impulsado durante los últimos años, y que ha favorecido de manera indiscutible la expansión de la impresión 3D, la falta de conocimiento corroborado a nivel científico-técnico para las etapas críticas del proceso, como la del mecanismo de extrusión en caliente, es notable. Algunas soluciones técnicas para dichas fases particulares han sido resueltas combinando componentes comerciales sin un estudio concreto del funcionamiento, sino basándose en prácticas empíricas de carácter amateur. Sin embargo, para que las impresoras 3D RepRap puedan convertirse en sistemas de fabricación de sobremesa robustos y confiables, estos aspectos deben ser estudiados y caracterizados desde un punto de vista de ingeniería.

Este artículo trata sobre una de las subfases dentro del proceso térmico implicado en un proceso de fabricación FDM. La historia térmica de las piezas fabricadas y el comportamiento del sistema FDM es un aspecto crítico para determinar sus propiedades mecánicas. Varios investigadores han demostrado que dichas características dependen íntimamente de la fortaleza de los enlaces entre filamentos depositados, consecuencia justamente del proceso de extrusión en caliente [12,13]. Por otro lado, la deformación residual es un defecto a menudo presente en piezas FDM. La deformación observada en estas piezas es causada principalmente por las tensiones residuales adquiridas durante la extrusión en caliente del material, y son consecuencia del comportamiento término del sistema [14]. Aunque la estrategia de deposición de material es altamente influyente en los resultados, profundizar en el comportamiento térmico del cabezal extrusor, sin tener en cuenta su traslación a lo largo y ancho del volumen de fabricación, es un paso ineludible para mejorar la precisión dimensional y la resistencia mecánica de las piezas fabricadas con FDM [15].

En este sentido, diversos autores han desarrollado modelos matemáticos que permiten comprender el comportamiento mecánico del proceso de FDM. Bellini et al. (2004) desarrollaron un modelo matemático para predecir el comportamiento de los extrusores, deduciendo una función de transferencia que explica el proceso [16]. Otros autores han concentrado sus esfuerzos de investigación en definir un modelo de elementos finitos en dos dimensiones para predecir la posición del frente de semifusión dentro de un modelo concreto de extrusor, prediciendo la caída de presión debida al cambio de estado y flujo viscoso del material. Estos resultados fueron confirmados experimentalmente [17,18]. Sin embargo, los autores referenciados no tratan la evolución de la temperatura externa del cabezal extrusor a lo largo del proceso de fabricación, y su impacto en las partes físicas de la máquina, como es el objetivo de esta contribución.

El proceso térmico en un sistema FDM tiene lugar en el licuefactor o cabezal extrusor, donde se produce la entrada del material, su posterior calentamiento y extrusión facilitada por un sistema continuo de alimentación del material. El material en bruto es introducido habitualmente a través de un sistema de fricción activado por un motor conectado a la placa base de la impresora, y con suficiente fuerza como para superar las presiones necesarias para hacer pasar el material semifundido por la punta del extrusor. A medida que el material desciende, su temperatura aumenta por encima de su temperatura de transición vítrea, y es finalmente extruído. Un conjunto de termopares y termistores monitorizan la temperatura del sistema, con el fin de mantener la temperatura de la punta del extrusor lo más constante posible a través de un sistema de retroalimentación operado por una placa Arduino de código abierto. Las especificaciones de temperatura deben cumplir con dos condiciones. Primero, la temperatura en la punta del extrusor debe ser mantenida lo más constante posible para asegurar el flujo del material, y no bloquear así el orificio de salida. En segundo lugar, la temperatura exterior de extrusor debe ser reducida a lo largo de su cuerpo, y debe alcanzar una temperatura lo más próxima posible a la temperatura ambiente en su parte más alta. Esto es necesario para garantizar que los elementos estructurales de la impresora fabricados en PLA o ABS no sean dañados por exceso de temperatura, y no comprometan la estabilidad del sistema de fabricación. Por este motivo, los extrusores de las impresoras 3D tienen diferentes mecanismos para prevenir la conducción de calor hacia su parte superior.

Así, puede afirmarse que el rendimiento perfecto de una impresora se daría en el momento en que toda esa energía calorífica liberada por la resistencia se utilizará en su totalidad para fundir el filamento, pero en la realidad todo ese calor se disipa por efecto conjugado de convección y conducción hacia el resto de la estructura de la impresora. Este exceso de temperatura puede llegar a generar graves problemas en las impresoras autoreproducibles. Hay que

pensar que muchos componentes autorreproducibles están fabricados de materiales como el PLA, que comienza a deformarse plásticamente a temperaturas cercanas a los 35°. En esta contribución, se compara el comportamiento térmico de tres extrusores basados en el mismo sistema, pero cambiando el método por el cual se produce disipación de calor por convección, para evaluar la mayor o menor idoneidad de cada uno de ellos a nivel de durabilidad y fiabilidad de una impresora 3D. Para ello, se ha diseñado un modelo de elementos finitos que, al ser comparado con valores tomados en condiciones reales, permitirá extraer conclusiones a este respecto.

2. Modelo de elementos finitos

2.1. Geometría del modelo

La figura 1 muestra la estructura fundamental de los extrusores considerados para este estudio. Todos ellos se componen de cuatro partes diferenciadas:

- **Bloque térmico.** En él se aloja la resistencia encargada de generar el flujo térmico y el termistor que permite monitorizar los valores de temperatura, y que ayuda al sistema a regular la temperatura prefijada a través del programa de gestión de la impresora. Este bloque está fabricado en aluminio AW-3003-h18, con alta conductividad térmica para asegurar el correcto flujo de calor, y se acopla al extrusor por unión roscada para transmitir el calor con las menos pérdidas posibles.
- **Extrusor.** Fabricado en bronce EN CW614N para facilitar el deslizamiento interior del material semifundido, y el calentamiento por transmisión desde el bloque calefactor. Al que se une mediante una rosca. El filamento se alimenta al sistema con un diámetro inicial de 2,88 mm. A su salida, el material extruido puede llegar a un diámetro final de 0,3 mm, según la boquilla escogida por el usuario. De esta manera, variando el diámetro del extrusor se puede controlar el diámetro del material de salida.
- **Barrera de calor.** Se trata de un cilindro roscado que sirve de unión entre el bloque térmico y el disipador y a través del cual pasa el filamento de camino al extrusor. Su función es la de frenar el avance del frente térmico a lo largo del extrusor, por lo que es la primera medida que previene el sobrecalentamiento del sistema. El material de la barrera de calor es una aleación de acero de baja conductividad térmica (41 W/mK).
- **Disipador.** Fabricado en aluminio AW-3003-h18, es una estructura ligera aleteada que facilita la disipación de calor por convección forzada. Es pues, el segundo mecanismo por el cual se frena el aumento de la temperatura en los puntos más próximos del extrusor a la estructura de la impresora. En este trabajo, se prueban tres configuraciones diferentes de la geometría de las aletas.

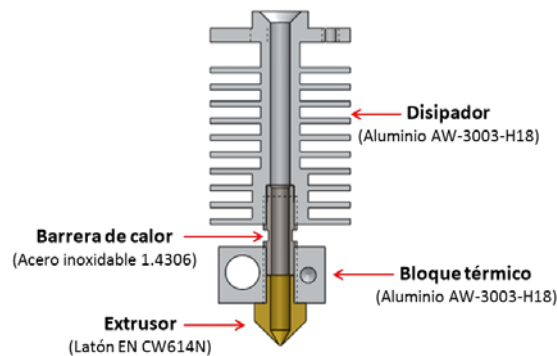


Figura 1: Estructura constructiva fundamental de los extrusores analizados. El elemento que es objeto del estudio, y es analizado en tres diferentes geometrías es el disipador de calor intermedio.

Las tres diferentes configuraciones de los extrusores están representadas en la figura 2. El BCNozzle es el extrusor comercial fabricado por BCN3D Technologies. Se trata de un cuerpo aleteado, cuyas aletas tiene forma de planos circulares de 1 mm de espesor y están separadas a 2 mm entre ellas. El Twist3D+ y el X-Truder han sido de concepción propia. El primero es una variación del Twist3D, que estaba formado por dos superficies helicoidales desfasadas 180° como superficie de disipación, con el fin de hacer más turbulento el flujo de aire entre ambas. El empleado en este trabajo es una variación con una única superficie helicoidal de 1 mm de espesor y 3 mm de paso de la hélice. Por último, el X-Truder tiene una estructura similar al BCNozzle, cambiando las dimensiones del aleteado. En este caso, cada aleta tiene un espesor de 2,5 mm, y están separadas entre sí a la misma distancia.

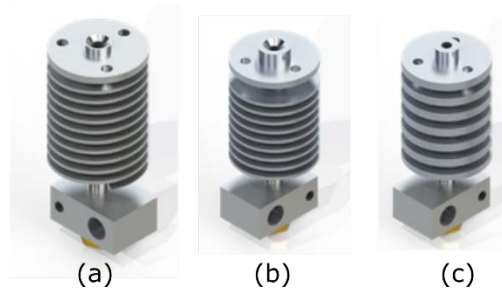


Figura 2: Vista renderizada de los tres disipadores de calor analizados. (a) BCNozzle, de BCN3D Technologies. Geometrías diseñadas por los autores, (b) Twist3D+ y (c) X-Truder.

En el modelo, la geometría ha sido definida mediante el software Solidworks, y ha sido importada mediante el módulo *LiveLink* de *Comsol Multiphysics*, haciendo así la gestión de la geometría en tiempo real lo cual hace menos complejo el problema. Los materiales han sido asignados según se ha indicado, haciendo uso de la biblioteca de materiales de *Comsol Multiphysics*.

2.2. Modelización de la convección forzada

Se han definido una serie de dominios aéreos alrededor de los sólidos del modelo, para representar los fenómenos de convección térmica que permiten la activación del ventilador de refrigeración acoplado al sistema. Así, en este trabajo se analiza también la interacción de diferentes caudales de aire con las tres geometrías de disipador descritas. El microprocesador con el que se opera la impresora emplea una función PWM (*pulse-width modulation*, o modulación por anchos de pulso) para controlar la energía que se proporciona a una carga modificando el proceso de trabajo de una señal digital cuadrada. Ambas variables se pueden regular directamente mediante cualquier software enfocado a la gestión de la impresora. Sin embargo, no permite regular directamente el caudal de aire, sino que este control se lleva a cabo fijando porcentajes de operación. Como alternativa, Jerez-Mesa et al. (2016) [19] definieron una relación discreta entre la función PWM y la velocidad del flujo de aire, que se emplea en este trabajo para evaluar el comportamiento del sistema a velocidades de aire 10 y 20 m/s.

2.3. Ecuaciones constitutivas del modelo

Las ecuaciones que gobiernan la física del problema en el régimen estacionario se corresponden con la ecuación de continuidad (ecuación 1) y la de Navier-Stokes para fluidos newtonianos (ecuación 2), en el caso de los dominios del modelo constituidos por aire [20,21].

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del fluido y \mathbf{u} es la velocidad del fluido.

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right) + \mathbf{F} \quad (2)$$

donde p es la presión del fluido, μ es la viscosidad dinámica, \mathbf{I} es la matriz identidad, T es la temperatura y \mathbf{F} son las fuerzas externas aplicadas sobre el fluido.

Para los dominios sólidos, el modelo resuelve la ecuación de la energía (ecuación 3)

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q} \quad (3)$$

donde C_p es la capacidad calorífica a presión constante, k es la conductividad térmica y Q es el flujo de calor.

2.4. Condiciones de contorno y valores iniciales

El modelo se ha definido en tres dimensiones, dado que el extrusor Twist3D+ no presenta la posibilidad de definir simetría de ningún tipo en común con las otras dos geometrías. Esto aumentará el tiempo de procesamiento del modelo, pero permitirá que los resultados entre los tres extrusores puedan ser comparados. P, se toma la hipótesis de no deslizamiento del aire sobre las paredes del sólido, esto es, la velocidad del aire en contacto con el extrusor es nula. Por último, se considera que el modelo está aislado térmicamente, y que el flujo de aire entrante lo hace a temperatura ambiente de 20°C. La figura 3 resume algunas de las condiciones de contorno tomadas para definir el modelo.

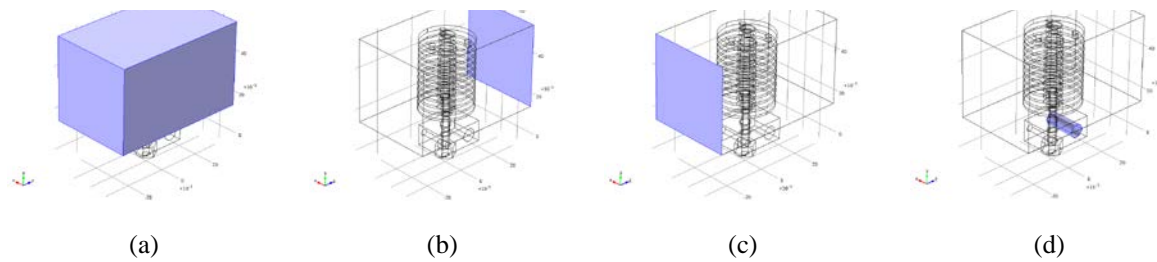


Figura 3: Condiciones de contorno impuestas al modelo. (a) volumen de control del aire que rodea el extrusor (b) superficie de flujo de entrada de aire. (c) superficie de flujo de salida de aire. (d) superficie de flujo de calor de entrada, que modela la resistencia instalada físicamente dentro de bloque térmico.

2.5. Convergencia del mallado

El proceso de mallado de los modelos es uno de los puntos más críticos de una simulación computacional después de una buena definición de las condiciones iniciales y de contorno. Sin embargo, también conlleva un incremento de la dificultad de cálculo y, por tanto, un aumento del tiempo de simulación. Es por ello que es importante definir una malla que permita la realización de los cálculos en un tiempo razonable pero con resultados válidos.

Para determinar el tamaño de malla a utilizar se ha realizado un estudio de convergencia considerando válido un error relativo del 2% entre dos mallas. Así, se han definido cinco tamaños de malla: extremadamente gruesa, más gruesa, normal, fina, más fina. En la figura 4 se muestran los resultados de la convergencia obtenida y el tiempo de cálculo que ha sido necesario para cada una de las simulaciones, para las cuatro diferentes cotas consideradas en el modelo, y una velocidad de ventilador del 10%. Como se puede ver, la malla normal es aquella en la que los errores relativos para todas las cotas consideradas son menores del 2%, y es la que se toma por tanto para analizar el modelo.

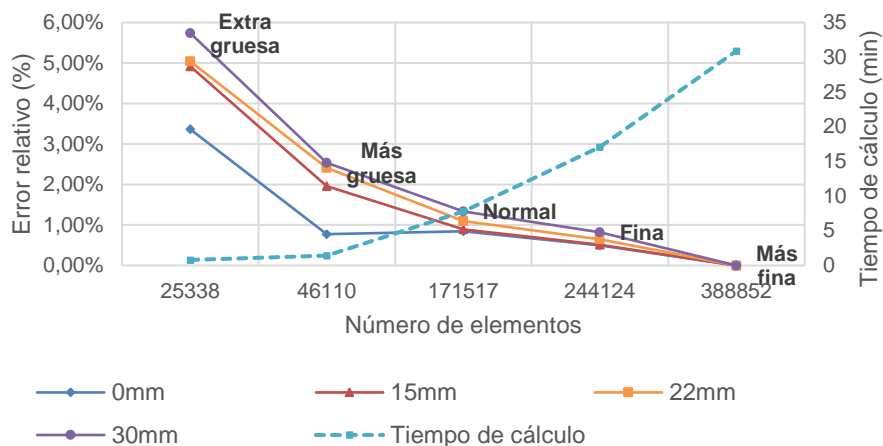


Figura 4: Representación gráfica del estudio de convergencia del mallado del modelo de elementos finitos para las diferentes cotas analizadas.

Los resultados obtenidos al analizar los tres modelos se representan en la figura 5, para velocidades del caudal de aire de 0,70 y 0,25 m/s. La cota 0 mm se corresponde con el punto inferior del cuerpo disipador, inmediatamente por arriba de la barrera de calor de acero inoxidable, mientras que los 30 mm se corresponden con el punto superior del disipador, en contacto con el sistema de soporte de la impresora. Como puede verse el comportamiento es similar en ambos casos, pese a que, como cabía esperar, un flujo de aire mayor genera menores temperaturas en el cuerpo disipador por hacer más intenso el fenómeno de convección forzada. Los tres disipadores analizados parecen tener un comportamiento similar en la primera etapa, mientras que el comportamiento es divergente a partir de la cota de 15 mm. A partir de ese punto, el disipador con aletas cilíndricas gruesas consigue, según el modelo, disminuir la temperatura en menor medida. Los otros dos tienen un comportamiento similar, llegando el Twist3D a los 64°C de temperatura mínima en el punto más alto del cuerpo disipador.

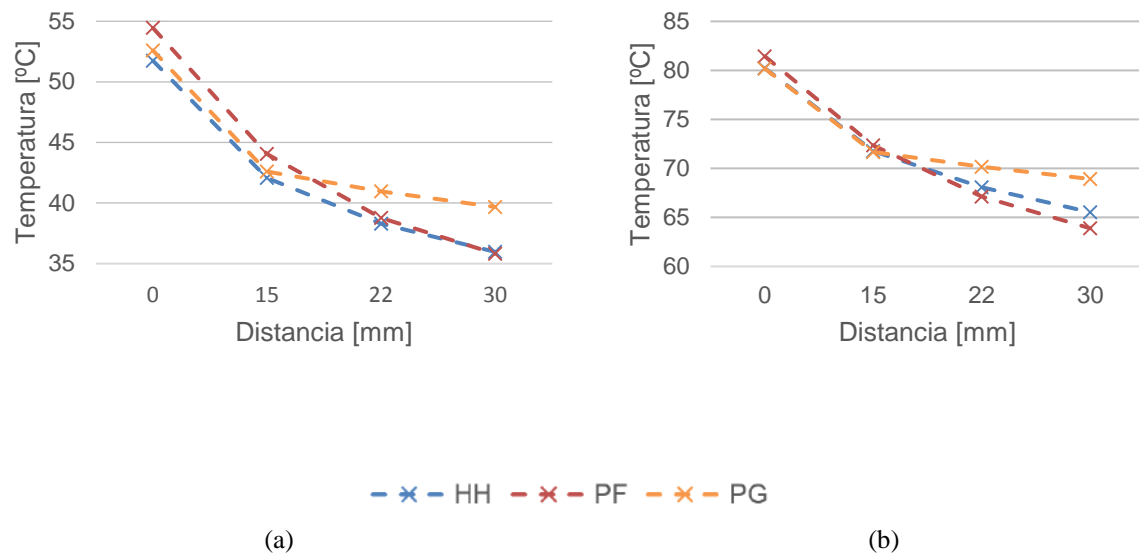


Figura 5: Resultados del modelo computacional definido para los tres extrusores. (a) con velocidad del ventilador de 0,70 m/s (20% de la función PWM). (b) con velocidad 0,25 m/s (10% PWM)

3. Validación experimental del MEF

El experimento descrito a continuación se realizó para registrar la temperatura en la superficie de los disipadores estudiados en puntos equidistantes distribuidos a 0, 15, 22 y 30 mm a lo largo del cuerpo disipador, como se ha explicado en el apartado anterior. Se han llevado a cabo varias repeticiones de los experimentos para las dos situaciones analizadas de ventilador a 10% y 20%, siguiendo un montaje que se muestra en la figura 6. Como puede verse, la impresora ha sido comandada mediante el programa libre Repetier-host, y las temperaturas han sido medidas mediante termopares tipo K, y el software de adquisición de datos PicoLog.

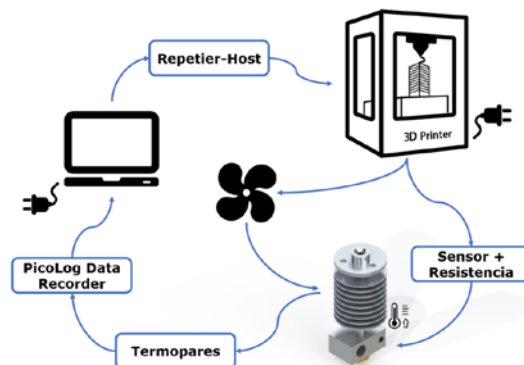


Figura 6: Esquema del montaje experimental.

Los resultados obtenidos pueden verse en la figura 7. Además de la información gráfica, los resultados han sido tratados con el método de Tukey, a través del software Minitab, que permite realizar un ANOVA cruzado para determinar diferencia estadística significativa entre más de dos conjuntos de datos simultáneamente (tabla 1). En el caso del funcionamiento del ventilador al 10%, se puede determinar una diferencia significativa en el punto superior de la pieza. El modelo BCNozzle es el que más calor logra disipar, al contrario de los otros dos que, además, son estadísticamente iguales. Además, el punto correspondiente a 22 mm de altura para el 10% del ventilador también muestra valores de temperaturas para los tres disipadores son estadísticamente diferentes. Para el resto de casos siempre hay al menos una igualdad estadística.

Para la velocidad de 20%, los resultados revelan una mayor diferencia significativa del disipador X-Truder en los puntos centrales del mismo, pese a que el resultado final muestra una mayor uniformidad de temperaturas en el punto superior. Esta información que puede ser extraída gráficamente es confirmada por los datos estadísticos extraídos de la aplicación del método de Tukey, expuestos en la tabla 1.

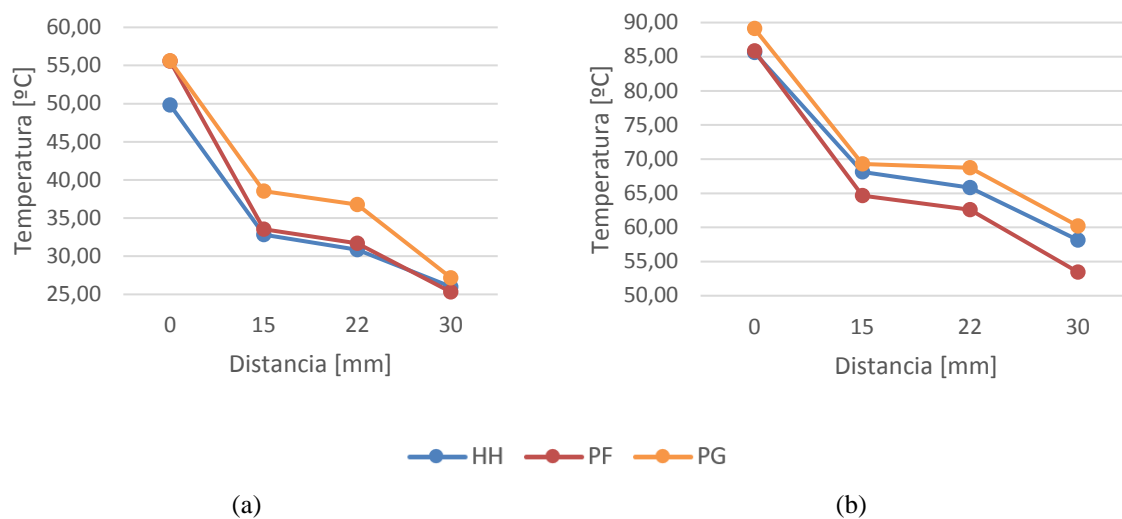


Figura 7: Perfil de temperaturas en los tres modelos de disipador, medidos experimentalmente. (a) Con velocidad del ventilador de 0,70 m/s (20% de la función PWM). (b) Con velocidad 0,25 m/s (10% PWM)

Tabla 1: Resumen de resultados del método de Tukey aplicado a los casos de estudio.

Disipador	v = 10%				v = 20%			
	0 mm	15 mm	22 mm	30 mm	0 mm	15 mm	22 mm	30 mm
HH	B	A	B	A	B	B	B	A
PF	B	B	C	B	A	B	B	A
PG	A	A	A	A	A	A	A	A

4. Conclusiones

En este artículo se han comparado tres geometrías de disipador de calor en un extrusor de impresora 3D, asistidos por dos niveles diferentes de caudal de aire en un proceso de convección forzada para su enfriamiento. El análisis ha sido llevado a cabo combinando un modelo teórico resuelto a través del método de los elementos finitos, combinado con la medida en un contexto real mediante un montaje experimental de termopares acoplados al extrusor. En vista a los resultados obtenidos, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. Los tres modelos de extrusor estudiados muestran diferencias significativas en su funcionamiento, tanto en el modelo teórico como en el caso experimental real, siendo los modelos BCNozzle y Twist3D los que dan lugar a menores temperaturas en el punto superior del cuerpo del extrusor.
2. El modelo de elementos finitos definido es muy conservador si se compara con las medidas de temperatura tomadas en el montaje experimental, en tanto que da lugar a temperaturas más de 10°C más altas. Esto puede deberse a la imposición de la condición de aislamiento térmico del volumen de control alrededor del extrusor, que hace que el calor sólo pueda salir del modelo por convección forzada.
3. Los resultados obtenidos con el extrusor asistido por el ventilador al 10% de velocidad revela mayor variabilidad de los datos, y por tanto puede decirse que empleando una velocidad más alta para la convección se pueden obtener resultados más uniformes y estables en el tiempo, así como conseguir que los extrusores trabajen a regímenes más similares. Además, el uso del ventilador al 20% de velocidad permite obtener perfiles de temperaturas en general cercanos a los 25°C por debajo del perfil del proceso refrigerado con velocidad 10%.
4. Si se fija una velocidad del ventilador del 20% para el proceso de impresión, el disipador de aletas gruesas, o PG, se presenta como la mejor solución técnica por su mayor facilidad y rapidez de fabricación, y por obtener resultados estadísticamente iguales que los otros dos disipadores considerados en el estudio.

5. Referencias

- [1] H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, (2015) 1-17.
- [2] B. Berman. 3-D printing: The new industrial revolution, *Business Horizons*, 55(2), (2012), 155-162.
- [3] T. Rayna, L. Striukova. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technology Forecasting and Social Change*, 102, (2016), 214-224.
- [4] S.H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-9), (2013), 1191-1203.
- [5] D. Günther, B. Heymel, J.F. Günther, I. Ederer. Continuous 3D-printing for additive manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 20(4), (2014), 320-327.
- [6] N. Turner, B. Strong, S.A. Gold. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), (2014), 192-204.
- [7] Wiki del Proyecto RepRap. www.reprap.org. Visitado por última vez el 08/05/2015
- [8] J. Kentzer, B. Koch, M. Thiim, R.W. Jones, E. Villumsen. An open source hardware-based mechatronics project: The replicating rapid 3-D printer. 4th International Conference on Mechatronics, Kuala Lumpur, Malaysia, (2011).
- [9] V. Kostakis, V. Niaros, C. Giotitsas. Open source 3D printing as a means of learning: An educational experiment in two high schools in Greece, *Telematics and Informatics*, 32(1), (2015), 118-128.
- [10] C.H. Pereira Mello, R. Calandrin Martins, B. Rosa Parra B, E. de Oliveira Pamplona, E. Gomes Salgado, R. Tavares Seguso. Systematic proposal to calculate price of prototypes manufactured through rapid prototyping an FDM 3D printer in a university lab, *Rapid Prototyping Journal*, 16(6), (2010), 411-416.
- [11] B.T. Wittbrodt, A.G. Glover, J. Laureto, G.C. Anzalone, D. Oppliger, J.L. Irwin. Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers, *Mechatronics*, 23(6), (2013), 713-726.
- [12] J. Ciurana, L. Serenoa, E. Valles. Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing system for PLA scaffolds manufacture, *Procedia CIRP*, 5, (2013), 152-157.
- [13] A. Lanzotti, D.M. Del Giudice, A. Lepore, G. Staiano, M. Martorelli. On the Geometric Accuracy of RepRap Open-Source Three-Dimensional Printer, *Journal of Mechanical Design*, 137(10), (2015), 101703.
- [14] Y. Zhang, K. Chou. A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part B Journal of Engineering Manufacture*, 222(8), (2008), 959-968.
- [15] M. Domingo-Espin, J.M. Puigoriol-Forcada, A.A. Garcia-Granada, J. Lluma, S. Borros, G. Reyes. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design*, 83, (2015), 670-677.
- [16] A. Bellini, S. Guçeri, M. Bertoldi. Liquefier dynamics in fused deposition. *Journal of Manufacturing Science and technology*, 126(2), (2004), 237-246.
- [17] M.A. Yarimci, T. Hattori, I. Guçeri, S.C. Danforth. Thermal analysis of fused deposition. *Solid Freeform Fabrication Conference*, Austin, Texas, USA, (1997).
- [18] H.S. Ramanath HS, C.K. Chua, Leong KF, Shah KD. Melt flow behaviour of poly-ε-caprolactone in fused deposition modelling. *Journal of Material Science: Materials in Medicine*, 19(7), (2008), 2541-2550.
- [19] R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodríguez, X. Corbella, R. Busqué, G. Gomez-Gras. Finite element analysis of the thermal behaviour of a RepRap 3D printer liquefier. *Mechatronics* (2016) doi:10.1016/j.mechatronics.2016.04.007
- [20] V. Barbu. *Stabilization of Navier–Stokes Flows*. Ed. Springer, 2011. ISBN: 9780857290434
- [21] Reddy JN, Gartling DK. *The finite element method in heat transfer and fluid dynamics*. 3rd ed. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2010.