

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2022

INFORME DEL PROYECTO REF. SV-22-GIJON-1-10

1. Datos del proyecto

Título: Desarrollo de un cabezal extrusor rotativo para aplicaciones de fabricación aditiva

Fechas inicial y final del proyecto: 04/07/2022 - 31/12/2022

Investigador/a Principal: David Blanco Fernández

Otros investigadores: Braulio José Álvarez Álvarez, Pedro Fernández Álvarez, Gonzalo Valiño Riestra, Natalia Beltrán Delgado, Fernando Peña Cambón

Personal contratado: Miguel Rodríguez Rodríguez

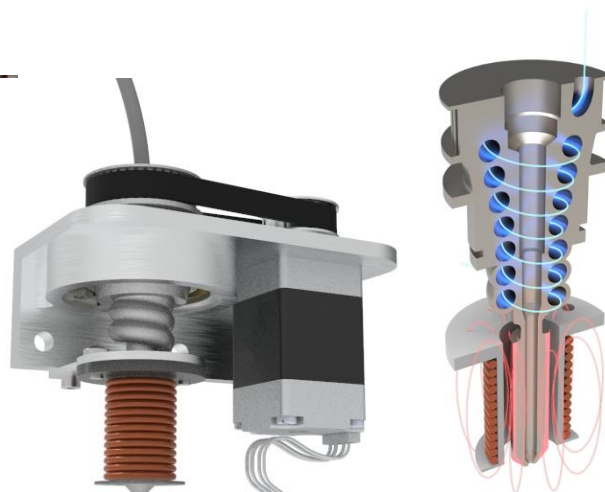
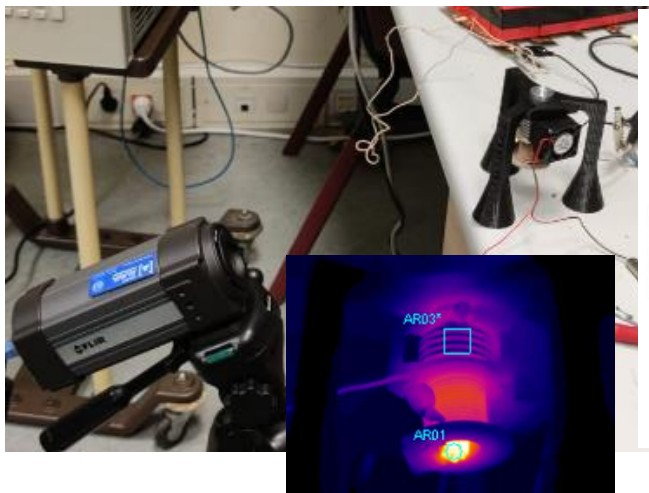
Fechas inicial y final de contratación:

Empresas o instituciones colaboradoras: IDONIAL Centro Tecnológico, THESTEELPRINTERS S.L.

Redes sociales de investigadores y empresas (Linkedin, Twitter, Instagram):

<https://www.linkedin.com/in/david-blanco-96699944/>; [linkedin.com/in/miguel-rodriguez-rodriguez](https://www.linkedin.com/in/miguel-rodriguez-rodriguez)

2. Resumen Gráfico



3. Memoria descriptiva del proyecto

3.1 Resumen ejecutivo

El proyecto titulado: " Desarrollo de un cabezal extrusor rotativo para aplicaciones de fabricación aditiva" se inició a mediados de julio de 2022 con la contratación de D. Miguel Rodríguez Rodríguez como personal investigador.

El primer objetivo comenzó con un estudio del estado del arte acerca de los diferentes cabezales de extrusión existentes en el mercado, así como una investigación sobre los diferentes sistemas de rotación o de giro que podrían integrarse sobre estos. El hecho de que los cartuchos térmicos, componentes encargados de aportar calor para fundir el material a extruir, precisasen de cables de alimentación, implicaba un gran inconveniente a la hora de que el cabezal pudiese rotar. Ante esta situación, se llegó a la innovadora solución de implementar un sistema de calentamiento por inducción, que podría ser mucho eficiente que los sistemas de calentamiento convencionales y que pudiese dar solución a dicho problema.

Así pues, los siguientes pasos realizados se basaron en el estudio y experimentación del modelo electromagnético necesario para generar el calentamiento por inducción. En un primer momento, se intentó desarrollar el modelo matemático que permitiese determinar el fenómeno electromagnético acaecido en el interior del cabezal. No obstante, no se lograron alcanzar los resultados esperados con dicho modelo, por lo que finalmente se optó por utilizar diferentes softwares de simulación basados en el método de los elementos finitos (MEF). Es importante resaltar, que los avances logrados con el desarrollo del modelo matemático no se han desechado y aún están en estudio, con el objetivo de disponer de un modelo propio que pueda explicar el fenómeno de inducción y servir como base para trabajos futuros.

Una vez estudiado y analizado el ámbito del electromagnetismo en el que se iba a trabajar, se procedió a realizar un estudio de los parámetros más influyentes a tener en cuenta. También se realizó un informe acerca de los posibles materiales a utilizar (ferromagnéticos). En función de dichos parámetros se realizó el diseño de un primer prototipo de cabezal de calentamiento por inducción. La fabricación de dicho prototipo se llevó a cabo en el taller del Área de Ingeniería de los procesos de Fabricación; de igual modo, el montaje del circuito electrónico de control para la realización de las pruebas se realizó en el laboratorio del Área de Ingeniería Electrónica y Automática. Posteriormente, se procedió a realizar la experimentación de dicho prototipo para validar los datos obtenidos en las simulaciones teóricas realizadas, usando para ello, los medios disponibles en citados laboratorios (fuentes de alimentación, osciloscopios, termopares, cámaras termográficas...). Dichos resultados coincidieron de manera bastante precisa con los resultados obtenidos con anterioridad en las simulaciones teóricas, obteniéndose, por tanto, unas conclusiones muy prometedoras. En el primer prototipo realizado se conseguía lograr una distribución de temperaturas en el conducto calefactor semejante a la de otros cabezales comerciales, con la diferencia destacable de que el consumo energético se lograba reducir en torno a un 30-60%. Además, dicho prototipo lograba extruir el material introducido (PLA) de manera fluida y estable.

Una vez corroborado que el modelado electromagnético y térmico del primer prototipo había sido un éxito, se procedió a realizar un segundo diseño que ya dispusiese de un sistema de rotación. A su vez, también se realizó el diseño de una placa de control electrónico mucho más reducida y con un carácter más comercial.

A fecha de redacción de este informe, no se ha llegado a realizar las pruebas pertinentes con el segundo prototipo desarrollado, que se encuentra actualmente en proceso de fabricación. La dificultad de desarrollar el modelo electromagnético consumió más tiempo del previsto en la planificación inicial del proyecto, lo que generó retrasos que no han permitido completar todas las tareas previstas. No obstante, si se ha logrado cumplir con hitos importantes que no estaban contemplados de inicio, como el haber completado con éxito un primer prototipo de calentamiento por inducción. Este diseño supone una importante innovación con muchas posibilidades futuras para el desarrollo industrial de la fabricación aditiva. Los objetivos pendientes se completarán a lo largo de los próximos meses, una vez se complete la fabricación del segundo prototipo, y tendrá continuidad con la elaboración de un trabajo fin de máster sobre esta temática a cargo de D. Miguel Rodríguez Rodríguez.

3.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

El objetivo inicial de este proyecto consistía en el desarrollo de un cabezal rotativo para máquinas de fabricación aditiva mediante la extrusión de polímeros termoplásticos. El propósito de emplear un cabezal rotativo radica en la necesidad de orientarlo de manera óptima durante la utilización de boquillas con geometrías no circulares (resultado del proyecto SV-21-GIJÓN-1-13). La capacidad de orientar un cabezal con secciones no circulares permitiría reducir los tiempos de fabricación de una manera considerable y por tanto el coste de las piezas fabricadas. Este propósito pasaba por pasar de un estado actual de desarrollo tecnológico TRL1 a un nivel de validación a nivel de componentes en laboratorio o TRL4.

Para alcanzar el objetivo final del proyecto se comenzó con un estudio del arte a cerca de los cabezales comerciales existentes en el mercado y el funcionamiento de estos. A lo largo de dicho estudio se llegó a la conclusión de que una solución factible y novedosa podría emplear un sistema de calentamiento por inducción. Al contrario que los sistemas tradicionales de calentamiento mediante el uso de cartuchos térmicos, el uso de la tecnología de inducción podría generar un aprovechamiento eficiente desde el punto de vista energético, con un calentamiento óptimo y concentrado en las zonas objetivo, así como una rotación libre del cabezal, sin el impedimento que disponen los cabezales actuales (limitados por la necesidad de estar conectados mediante cables para la alimentación del cartucho térmico).

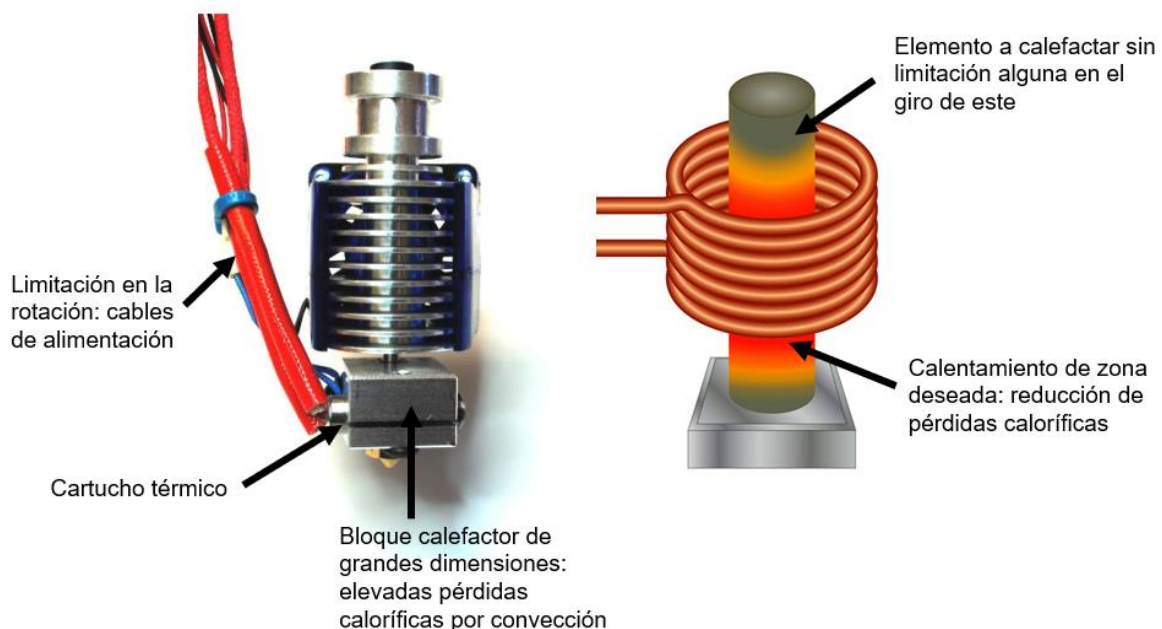


Figura 1 · A la izquierda, extrusor comercial E3D V6 de calentamiento mediante cartucho térmico; a la derecha, diseño conceptual del sistema de calentamiento por inducción propuesto

El calentamiento por inducción se basa en el fenómeno de la inductancia eléctrica, que se produce cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor y produce un campo magnético alrededor de él. Cuando un conductor está expuesto a un campo magnético fluctuante, se produce una fuerza electromotriz en el conductor, que a su vez produce una corriente eléctrica en él. Esta corriente eléctrica produce calor a través del efecto Joule, lo que a su vez calienta el conductor. Dicho sistema de calentamiento ya es empleado en ámbitos muy variados, que abarcan desde sistemas de

tratamientos térmicos de piezas en industria, hasta placas de inducción para cocinas. Por tanto, su utilización en un sistema de extrusión y como el que considerado en este proyecto podría resultar factible.

En primera instancia, se pretendió realizar un modelo matemático que permitiese describir el fenómeno de inducción electromagnética en el cabezal. No obstante, tal y como se pudo comprobar a posteriori, de manera experimental, existen pequeñas diferencias entre los resultados del modelo matemático y el modelo experimental. De hecho, el equipo investigador sigue analizando el modelo en busca del error que origina dichas discrepancias. Ante esta situación se procedió al uso de varios softwares de simulaciones electromagnéticas más avanzados, basados en elementos finitos, como "Ansys Electronics" o "FEMM". Mediante el manejo y estudio de dichas herramientas se pudieron analizar cuales eran los parámetros más influyentes en el proceso de inducción electromagnético. Así, respecto a la geometría de la bobina inductora, los factores más influyentes eran: el número de espiras, el diámetro medio de la bobina, la longitud de la bobina, y en menor medida, el diámetro y el tipo de cable utilizado. Con relación al sistema eléctrico de alimentación, los parámetros más destacables resultaban ser: el valor eficaz de la corriente senoidal introducida y su frecuencia. Y, por último, relativo al calentador (elemento del cabezal sobre el que se genera el calor): la permeabilidad y conductividad eléctrica del material utilizado, su diámetro exterior y su longitud.

Una vez conocidos dichos parámetros, se procedió a realizar un estudio más detallado a cerca de la relación existente entre ambos y la manera en la que la combinación de estos pudiese permitir un calentamiento lo más óptimo posible. Así pues, las principales conclusiones obtenidas en dicho estudio son las que se enumeran a continuación:

1. El valor de la corriente eficaz introducida es directamente proporcional a la potencia calorífica generada en el calentador.
2. La frecuencia con la que se alimenta el sistema es directamente proporcional a la potencia calorífica generada en el calentador.
3. A menor distancia radial entre la bobina y el calentador mayor es la potencia calorífica generada (Figura 2)
4. La potencia calorífica generada aumenta de manera lineal al aumentar la longitud del calentador. Para longitudes de calentador mayores que la longitud de la bobina, la potencia calorífica se estabiliza y no aumenta (Figura 3).
5. La utilización de materiales con baja conductividad eléctrica y alta permeabilidad magnética en el calentador permiten lograr una mayor potencia calorífica generada en su interior.

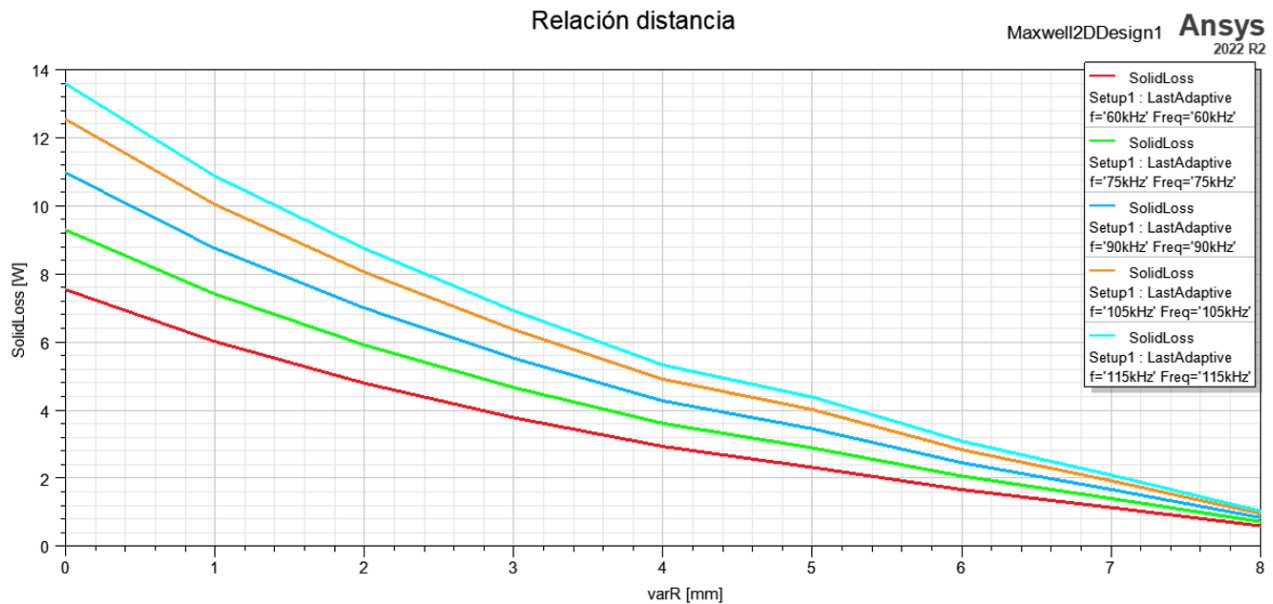


Figura 2 · Relación entre la potencia calorífica generada en función de la distancia radial relativa entre la bobina y el calentador a diversas frecuencias de ensayo.

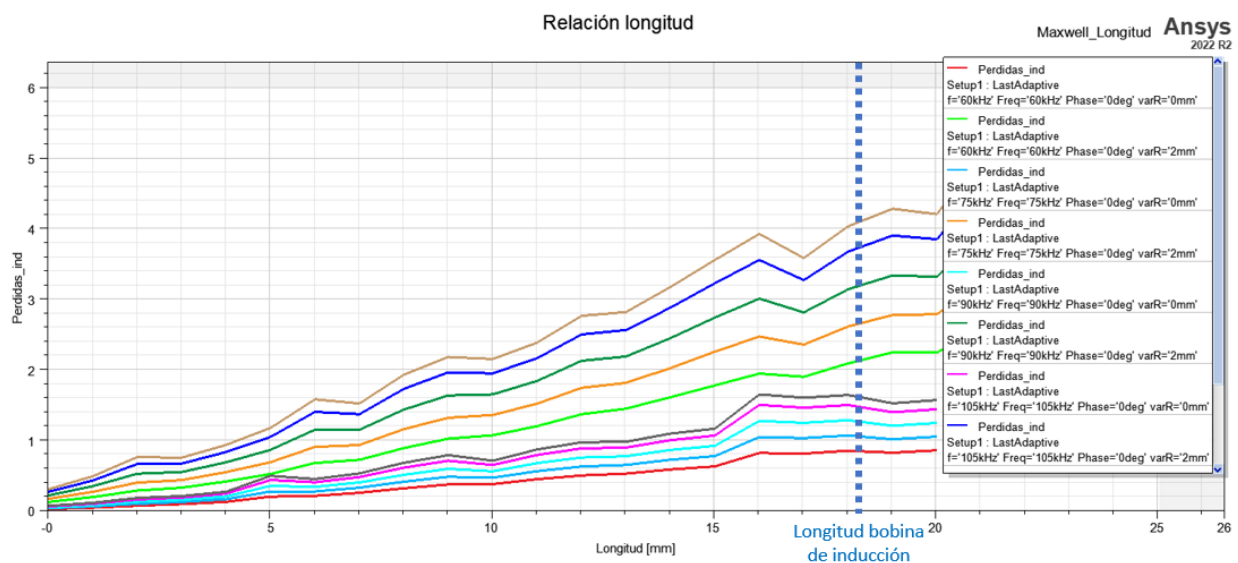


Figura 3 · Relación entre la potencia calorífica generada en función de la longitud del calentador.

En función de los resultados obtenidos, se procedió a realizar un estudio de posibles materiales a utilizar, y a proceder con el primer diseño de un prototipo.

El diseño del primer prototipo se realizó con la idea de que este pudiese ser fácilmente adaptable a cualquier otro cabezal comercial existente, realizando las mínimas modificaciones. Así pues, se empleó un conducto de rotura térmica de titanio y un disipador de aluminio 6061 con geometrías similares a los utilizados en otros cabezales comerciales, así como una boquilla comercial de latón con un orificio circular de 0,4mm. Respecto al calentador, se utilizó un cilindro hueco de diámetro exterior 8mm, con un roscado interior de M6 y una longitud 18mm, mecanizado sobre una pieza de partida de un acero de la serie 420 (acero ferromagnético). La fabricación de dicho cabezal se llevó a cabo en el taller del Área de Ingeniería de Fabricación.



Figura 4 · A la izquierda, el diseño del primer prototipo de extrusor por inducción, a la derecha, el extrusor comercial Volcano.

Además, con los medios disponible en el laboratorio del Área de ingeniería Electrónica se procedió a la construcción de un circuito electrónico de pruebas para poder realizar los ensayos experimentales. La realización de las pruebas experimentales permitió corroborar los resultados inicialmente obtenidos en las simulaciones, tanto electromagnéticas, como térmicas. Se realizaron diversos ensayos a diferentes intensidades de corriente, frecuencias, situaciones con el ventilador encendido o apagado... Para la medición de dichos parámetros se emplearon diversos osciloscopios, pinzas amperimétricas..., así como la utilización de una cámara termográfica para la obtención de las temperaturas. En todas las situaciones ensayadas los consumos de energía por el sistema eran los esperados, al igual que la potencia calorífica suministrada y la temperatura alcanzada en los diversos puntos del cabezal.

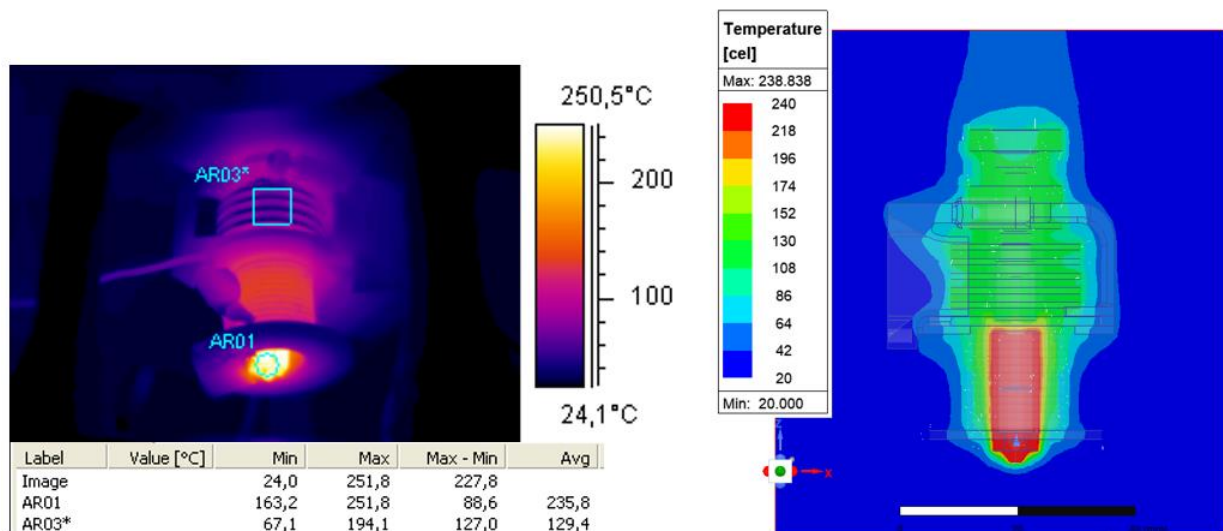


Figura 5 · A la izquierda, los resultados térmicos obtenidos mediante el uso de la cámara termográfica; a la derecha los resultados térmicos obtenidos en Ansys, durante el ensayo del extrusor alimentado con una corriente senoidal de 3,5A de valor eficaz y una frecuencia de 75kHz (Situación estática con el ventilador apagado).

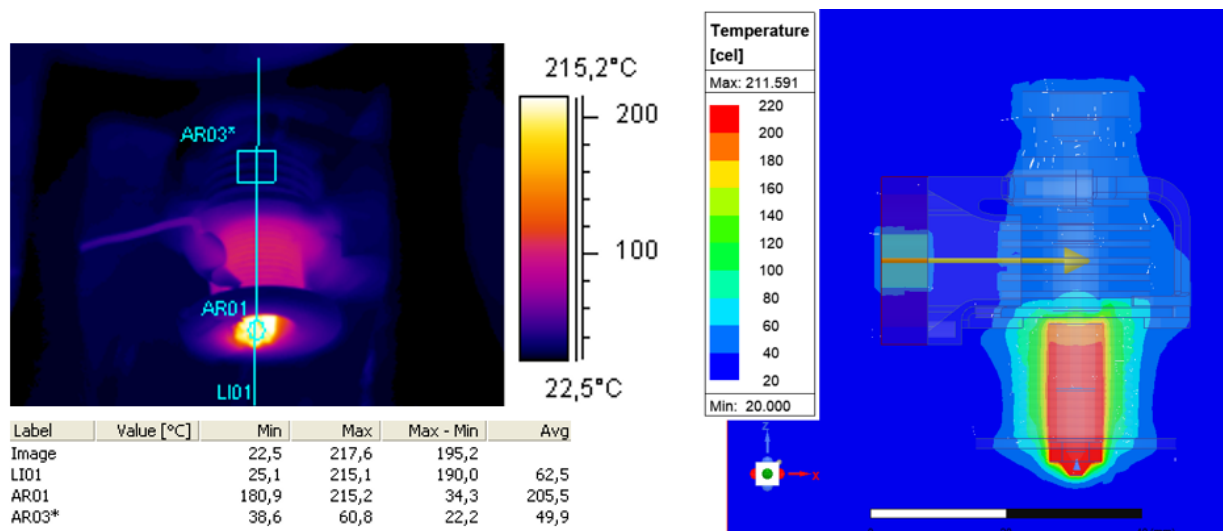


Figura 6 · A la izquierda, los resultados térmicos obtenidos mediante el uso de la cámara termográfica; a la derecha los resultados térmicos obtenidos en Ansys, durante el ensayo del extrusor alimentado con una corriente senoidal de 3,5A de valor eficaz y una frecuencia de 75kHz (Situación estática con el ventilador encendido).

El hecho de que la geometría del prototipo fuese similar a la de otros cabezales comerciales, y que, por tanto, la distribución de temperaturas también lo fuese, originaba que el flujo de material fuese fluido y estable, similar al de otros equipos. En próximos meses se procederá a realizar una comparativa más detallada sobre las velocidades de deposición alcanzadas en uno u otro, así como las calidades de estas.

En función de esta primera investigación, acerca del fenómeno electromagnético, es reseñable destacar la eficiencia que supone implementar un sistema de calentamiento por inducción frente a otros sistemas convencionales. Al inicio del proyecto se sabía que el hecho de implementar un sistema de calentamiento por inducción podía otorgar una mejor eficiencia en la extrusión de material, pero no se sabía a ciencia cierta cuanto era su alcance o escala. Con las pruebas realizadas se ha podido verificar que el consumo energético se reduce considerablemente en comparación con el uso de un cartucho térmico. El ejemplo de uso de un cabezal comercial, como puede ser el E3D V6, presenta un consumo medio de 8W [1] para extruir PLA a 220°C cuando el ventilador de este se encuentra apagado. Con el primer prototipo de inducción fabricado se ha podido corroborar que, para fundir PLA a esa temperatura, con el ventilador apagado, el consumo se reduce hasta los 5,2W (reducción del consumo de 35%). Y en la situación en la que el E3D V6 precisa fundir ese mismo material, a esa misma temperatura, pero esta vez con el ventilador encendido, su potencia consumida se dispara hasta los 16W, mientras que para el cabezal inductivo este solamente asciende hasta los 6W, suponiendo en este caso, una diferencia de consumos de 10W (reducción del 62,5%). De este modo se cumple de manera satisfactoria uno de los objetivos planteados al inicio del proyecto que tenía como meta fabricar, modelar y estudiar la viabilidad técnica de la implementación de un sistema de calentamiento por inducción en un cabezal de extrusión de termoplásticos.

Una vez comprobado que el primer prototipo de inducción fabricado presentaba los resultados esperados, se procedió a realizar un diseño de cabezal definitivo, en el que se incluyese tanto el sistema de rotación, como el sistema de calentamiento por inducción, con el fin de cumplimentar así el objetivo principal de este proyecto.

En el diseño de dicho cabezal se optó por utilizar un motor paso a paso "nema 8", para generar el giro del cabezal, acoplado a un sistema de transmisión por correa, siendo este el mecanismo que mejor relación precisión-peso otorgaba. Con el objetivo de simplificar el montaje del cabezal y sus partes, se vislumbró la posibilidad de fabricar un cabezal hecho en una única pieza mediante sinterizado láser con un acero martensítico M300 (acero ferromagnético válido para el proceso de inducción). Aprovechando las ventajas que aportaba dicho proceso de fabricación al diseño del cabezal, se optó por incorporar un sistema de refrigeración interno de aire que permitiese evacuar una mayor cantidad de calor generado en el dissipador y así mejorar el flujo de material por el interior del conducto. Además, también se integró en la parte superior una zona de engrane con la correa, a modo de polea, para integrar así todo el sistema del extrusor rotatorio en una única pieza.

Actualmente se han realizado tanto la simulación electromagnética, como la simulación térmica del diseño final, a expensas de que cuando este sea fabricado pueda ser ensayado y sus resultados puedan ser comparados y analizados.

A la par, se ha realizado el diseño de una placa de control más reducida, y de carácter más comercial para el control del calentamiento inductivo, y se está trabajando en el diseño de la placa para el control del sistema de rotación.

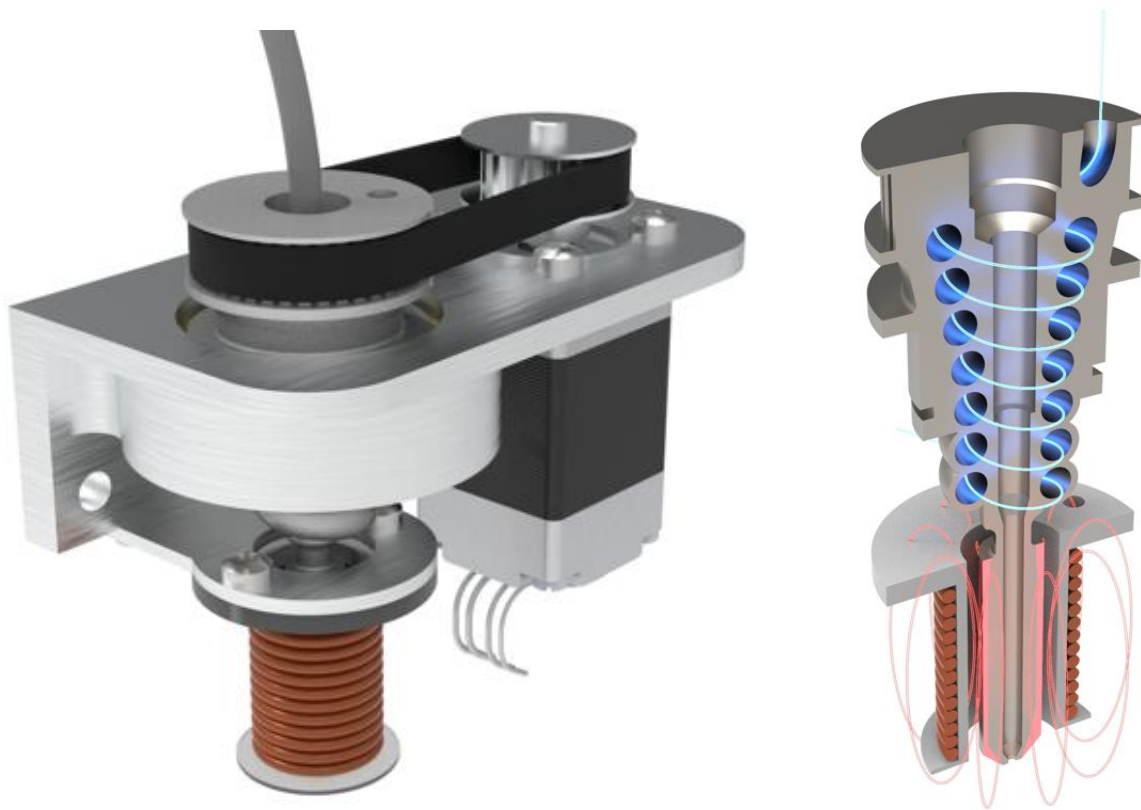


Figura 7 · A la izquierda, el diseño del cabezal rotativo elaborado, y a la derecha, una vista de corte del extrusor final, con los canales internos para el sistema de refrigeración.

3.3 Tareas realizadas

Las actividades realizadas a lo largo de este proyecto han sido las siguientes:

- Análisis del estado del arte. Estudio de diferentes cabezales de extrusión para procesos MEX y los posibles sistemas de rotación adaptables a estos.
- Desarrollo y valoración de alternativas conceptuales.

- Estudio y familiarización con modelos electromagnéticos, así como los softwares para la simulación de estos.
- Diseño y fabricación de un primer prototipo de cabezal calentado por inducción.
- Diseño y construcción de un circuito de pruebas para el control electrónico del mismo.
- Validación experimental del modelo electromagnético y térmico realizado sobre el primer prototipo de cabezal.
- Pruebas de extrusión sobre el primer prototipo.
- Realización del diseño de cabezal definitivo, con calentamiento por inducción, con refrigeración interna y con un sistema de rotación.
- Diseño de un circuito electrónico pre-industrial óptimo y reducido para el control eléctrico.

3.4 Resultados obtenidos

Los principales resultados obtenidos se listan a continuación:

1. Se ha realizado un estudio de los parámetros más influyentes en sistema de calentamiento por inducción, así como la relación existente entre ellos.
2. Se ha diseñado y fabricado con éxito un primer prototipo de cabezal por calentamiento por inducción.
3. El modelo electromagnético y térmico de dicho cabezal fue validado con éxito mediante la realización de ensayos experimentales.
4. El primer prototipo construido permitía la extrusión de filamento de una manera óptima.
5. Con dicho prototipo se ha logrado obtener una reducción de consumos energéticos en torno al 30- 60% en comparación con otros cabezales comerciales.
6. Se ha diseñado un segundo diseño de cabezal pre-industrial que además del calentamiento por inducción, dispusiese de un sistema de refrigeración interna, así como un sistema de rotación para su utilización de boquillas con orificios de diferentes geometrías.

3.5 Trabajos o necesidades futuras

Los resultados obtenidos permiten anticipar que la utilización de un sistema de calentamiento por inducción en cabezales MEX permiten reducir de manera considerable el consumo energético respecto a los sistemas de calentamiento tradicionales. Con el primer prototipo desarrollado se ha podido comprobar que dicho consumo se llega a reducir considerablemente respecto a otros dispositivos comerciales. Sin embargo, la cantidad de tiempo empleada en alcanzar dicho hito no ha permitido concluir con la experimentación del segundo prototipo dispuesto con el sistema de rotación (actualmente en construcción) en los plazos originalmente previstos. Por ello, están actualmente en desarrollo los siguientes trabajos:

1. Experimentación y puesta en funcionamiento del segundo prototipo diseñado.
2. Evaluación de las diferencias obtenidas entre piezas fabricadas mediante la utilización de dicho cabezal y otros comerciales.

3.6 Divulgación de los resultados

Hasta la fecha de redacción de este documento no ha sido posible desarrollar ninguna acción divulgativa de los resultados en forma de artículo científico o comunicación en congreso. No obstante, en meses futuros, mediante la continuación con dicho estudio, se intentará realizar al menos una publicación a cerca del proceso de inducción desarrollado en los prototipos ensayados. Dicha publicación se realizará a través de las webs de los grupos de investigación que participan de este proyecto: IPFResearch (<http://www.ipfresearch.com>) y ARAMO (<https://aramoblog.wordpress.com/>). Y, además, se pretenderá que esta sea publicada en una o varias revistas científicas indexadas dentro del campo de la ingeniería de fabricación.

Asimismo, en línea con los compromisos de divulgación recogidos en la propuesta, se ha planteado una propuesta de trabajo fin de máster. Dicho trabajo ha sido recientemente aprobado por la Comisión Académica del Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Oviedo y se completará a lo largo del primer semestre de 2023. El trabajo es:

1. Desarrollo de un cabezal MEX de extrusión no circular y calentamiento inductivo. Alumno: Miguel Rodríguez Rodríguez. Tutores: David Blanco Fernández y Juan Antonio Martín Ramos.

4. Memoria económica

4.1 Gastos:

Incluir los gastos asociados al proyecto: personal del contratado IUTA u otras personas colaboradoras, materiales utilizados, amortización de equipos durante el proyecto,...

Concepto	Gasto
Personal	2742€
Fungibles	
Amortización	
...	
TOTAL GASTOS	2742€

4.2 Ingresos:

Incluir la financiación del proyecto: ayuda del IUTA, ingresos aportados por entidades colaboradoras, financiación propia,...

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
Ayuda IUTA		
TOTAL INGRESOS		

5. Bibliografía

1. I. Díaz, D. Blanco, N. Beltrán. *Desarrollo de un cabezal de alta productividad para equipos de fabricación aditiva mediante extrusión de termoplásticos*. TFM, Master en Ingeniería Mecatrónica, Universidad de Oviedo, Julio 2022.
2. L. Pérez, D. Blanco. *Evaluación, optimización e industrialización de un cabezal todo metal para fabricación aditiva mediante tecnología*. TFM, Máster en Ingeniería Industrial, Universidad de Oviedo, Julio 2016.
3. N. A. Sukindar and M. K. A. Mohd Ariffin, "An Analysis on Finding the Optimum Die Angle of Polylactic Acid in Fused Deposition Modelling," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 835, pp. 254–259, May 2016, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.835.254
4. E. A. Papon, A. Haque, M. Ali, and R. Sharif, "Effect of Nozzle Geometry on Melt Flow Simulation and Structural Property of Thermoplastic Nanocomposites in Fused Deposition Modeling Additive manufacturing of fiber reinforced composites View project Annular Turbulent non-swirling and swirling impinging," doi: 10.12783/asc2017/15339
5. B. Gharehpapagh, M. Dolen, and U. Yaman, "Automation and Intelligent Manufacturing," 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.007
6. R. Löffler and M. Koch, "Innovative Extruder Concept for Fast and Efficient Additive Manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 10, pp. 242–247, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.IFACOL.2019.10.071.
7. Winder Gonzalez. *Diseño y construcción de una bobina de calentamiento por inducción para fundición de titanio*. 2008.
8. T. Tichy, O. Seifl, P. Vesely, K. Dusek and D. Busek. *Mathematical Modelling of Temperature Distribution in Selected Parts of FFF Printer during 3D Printing Process*. December 2021
9. H. S. Ramanath, C. K. Chua, K. F. Leong, and K. D. Shah, "Melt flow behaviour of poly-epsilon-caprolactone in fused deposition modelling," *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 19, no. 7, pp. 2541–2550, Jul. 2008, doi: 10.1007/S10856-007-3203-6