

**Universidad Internacional de La Rioja (UNIR)**

**ESIT**

**Máster Universitario en Industria 4.0**

# Metodología para la transformación de granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

**Trabajo Fin de Máster**

**presentado por:** Colunge López, Jorge Andrés

**Director/a:** Ortún Terrazas, Carlos Javier

## Resumen

El presente trabajo de investigación, se enfoca en la recopilación de las diferentes tecnologías de la industria 4.0, cuya aplicación dentro de una granja de impresión 3D 3.0 pueda proyectar su transformación para optimizar el proceso de fabricación, empleando algunas herramientas del concepto de fabricación inteligente.

Para el estudio respectivo, se hizo una exhaustiva revisión documental, relacionada a algunas de las tecnologías más relevantes, en la industria 4.0, desarrolladas en diferentes áreas, que puedan orientar el planteamiento de una metodología estratégica para la gestión de los equipos que hagan parte de la granja.

Para dar apertura a la investigación, se realizó una detallada descripción de los conceptos necesarios para comprender su orientación, delimitando las particularidades y necesidades de las impresoras 3D, así como sus partes, entre otras características. Igualmente, se describieron los diferentes conceptos que engloban las tecnologías, y que podrán solucionar los requerimientos del proceso de fabricación.

Finalmente, con el análisis de toda la información, se plantea la metodología para la transformación de una granja de impresión 3D 3.0 a 4.0, con la estructuración de 4 fases que describen con una metodología flexible, secuencial, adaptativa y modular.

**Palabras clave:** Fabricación aditiva, granja de impresión 3D, transformación digital, IoT.

## Abstract

The present research work focuses on the compilation of the different technologies of industry 4.0, whose application within a 3D 3.0 printing farm could project its transformation to optimize the manufacturing process to the maximum, using some tools of the manufacturing concept. intelligent.

For the respective study, an exhaustive documentary review was made, related to some of the most relevant technologies, in industry 4.0, developed in different areas, which can guide the approach of a strategic methodology for the management of the teams that are part of the farm.

To open up the investigation, a detailed description of the concepts necessary to understand its orientation was made, defining the particularities and needs of 3D printers, as well as their parts, among other characteristics. Likewise, the different concepts that encompass the technologies, which will be able to solve the requirements of the manufacturing process.

Finally, with the analysis of all the information, the methodology for the transformation of a 3D printing farm from 3.0 to 4.0 is proposed, with the structuring of 4 phases that describe a sequential and modular methodology.

**Keywords:** Additive manufacturing, 3D printing farm, digital transformation

## Índice de contenidos

1. Introducción .....	9
1.1. Motivación .....	10
1.2. Planteamiento del trabajo .....	12
1.3. Estructura de capítulos .....	12
2. Contexto y estado del arte .....	13
2.1. Descripción general del contexto del proyecto.....	13
2.2. Proyectos relacionados con el tema del TFM .....	16
2.2.1. Octoprint.....	16
2.2.2. Ultimaker Cura Connect .....	16
2.2.3. Stratasys GrabCAD Print.....	17
2.2.4. Formlabs Dashboard .....	17
2.2.5. 3D Systems 3D Sprint .....	17
2.2.6. Prusa pro AFS.....	18
2.3. Tecnologías relacionadas con el tema del TFM.....	18
2.3.1. Fabricación inteligente.....	18
2.3.2. Fabricación aditiva.....	19
2.3.3. <i>Firmwares</i> de impresoras 3D FDM. ....	25
2.3.4. Internet de las cosas (IoT). ....	27
2.3.5. Big Data.....	27
2.3.6. Robótica y sistemas ciberfísicos.....	28
2.3.7. Machine learning .....	29
2.4. Conclusiones sobre el estado del arte .....	29
3. Descripción general de la contribución del TFM.....	30
3.1. Objetivos .....	30
3.1.1. Objetivo general .....	30

3.1.2. Objetivos específicos.....	30
3.2. Metodología del trabajo .....	30
3.3. Descripción general de las partes o componentes de la propuesta .....	31
4. Desarrollo específico de la contribución.....	33
4.1. Fase 1 .....	35
4.1.1. Sensores y datos.....	35
4.1.2. Comunicación.....	42
4.1.3. Procesamiento y visualización.....	46
4.2. Fase 2 .....	47
4.3. Fase 3 .....	49
4.4. Fase 4 .....	51
4.4.1. Adaptación de impresora 3D .....	52
4.4.2. Sistema cartesiano .....	54
4.4.3. Brazo robótico .....	56
5. Conclusiones y trabajos futuros .....	59
5.1.1. “Líneas de trabajo futuras” .....	59
6. Referencias bibliográficas.....	61

## Índice de figuras

Figura 1. Prusa Pro AFS.....	10
Figura 2. Costo de producción relacionado con la impresión 3D.....	15
Figura 3. Extrusor. ....	21
Figura 4. Fusor. ....	21
Figura 5. Varillas y rodamientos.....	22
Figura 6. Husillos y correas.....	22
Figura 7. Cama de impresión.....	23
Figura 8. Placa Base.....	24
Figura 9. Esquema general de la metodología.....	33
Figura 10. Estructura de la metodología. ....	33
Figura 11. Estructura modular de la metodología.....	34
Figura 12. Arquitectura de integración. ....	41
Figura 13. Arquitectura de la comunicación. ....	42
Figura 14. Protocolos principales IoT.....	44
Figura 15. Wireframe del Dashboard. ....	46
Figura 16. Implantación de Fase 2.....	47
Figura 17. Arquitectura Fase 2.....	48
Figura 18. Implementación Fase 3.....	49
Figura 19. Diagrama del procesamiento. ....	51
Figura 20. Implementación fase 4.....	52
Figura 21. Adaptación de la impresora.....	53
Figura 22. Test de adherencia de las piezas.....	53
Figura 23. Granja de impresoras 3D adaptadas.....	54
Figura 24. Fabrica digital de la Universidad de Ciencias Aplicadas Technikum. ....	55
Figura 25. Sistema Prusa AFS.....	56

Figura 26. Proyecto Skywalker.....	56
Figura 27. Fabrica digital, implementación de brazos robóticos.....	57
Figura 28. Esquema de implementación de la cuarta fase.....	58

## Índice de tablas

Tabla 1. Partes de impresoras FDM: cartesiana, polar, delta y brazo robótico.....	24
Tabla 2. Datos de impresoras FDM: cartesiana, polar, delta y brazo robótico.....	40
Tabla 3. Comparativa principales protocolos IoT .....	45

## 1. Introducción

Actualmente la fabricación aditiva (en adelante, FA), se encuentra en un proceso de crecimiento en todo el mundo, siendo una de las tecnologías de la industria 4.0 con mayor expansión en los últimos años (Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman, & Dolen, 2017). La FA está basada en la idea de una fabricación inteligente, que busca crear productos personalizados y bajo demanda, manteniendo una relación directa entre la producción y los requerimientos del consumidor en un ambiente de participación interdisciplinaria en el desarrollo de los productos (Richter, Watschke, Schumacher, & Vietor, 2018).

Con la mejora de las máquinas de impresión 3D, su relevancia en el mercado ha incrementado, pasando de ser tecnología usada principalmente por científicos, ingenieros y/o aficionados de la impresión, a convertirse en una alternativa competitiva para el desarrollo de productos de consumo (Wong & Hernandez, 2012). Sin embargo, la FA presenta algunas limitaciones significativas referentes a la capacidad de producción, repetibilidad y elevado tiempo para fabricar las piezas (Wong & Hernandez, 2012). Como solución, en los últimos años, se ha extendido una tendencia hacia la paralelización del trabajo mediante el uso de varias máquinas. En la FA esta idea se conoce bajo el concepto de “Granja de impresión”, el cual consiste en el trabajo de varias impresoras de forma paralela en el proceso de fabricación, aplicando el concepto de *pooling* en el campo de la impresión 3D (Z-T, 2016), cuya capacidad productiva incrementa conforme al número de máquinas disponibles, sin perder los valores añadidos de personalización y producción bajo demanda.

Con más impresoras disponibles se acorta el tiempo necesario para producir lotes, pero se escala, a su vez, la gestión de las impresoras (Contreras, 3dnatives, 2018). Mientras que la impresión con una impresora es manejable por un solo operario, gestionar los requerimientos de varias, se convierte en una actividad complicada, puesto que a menudo requiere de varios trabajadores. A este hecho, se suma la necesidad de trabajo presencial para retirar las piezas y reanudar el proceso de fabricación, lo cual generalmente se produce fuera del horario laboral del operario. Asimismo, el operario debe supervisar otros factores en el funcionamiento de las máquinas como: i) la disponibilidad de filamento, ii) atascos en el extrusor, iii) pérdida de pasos en los motores, iv) problemas de adherencia de las piezas a la cama, v) fallas en la energía, vi) errores de impresión como el warping, entre otros (Zahera, 2012).

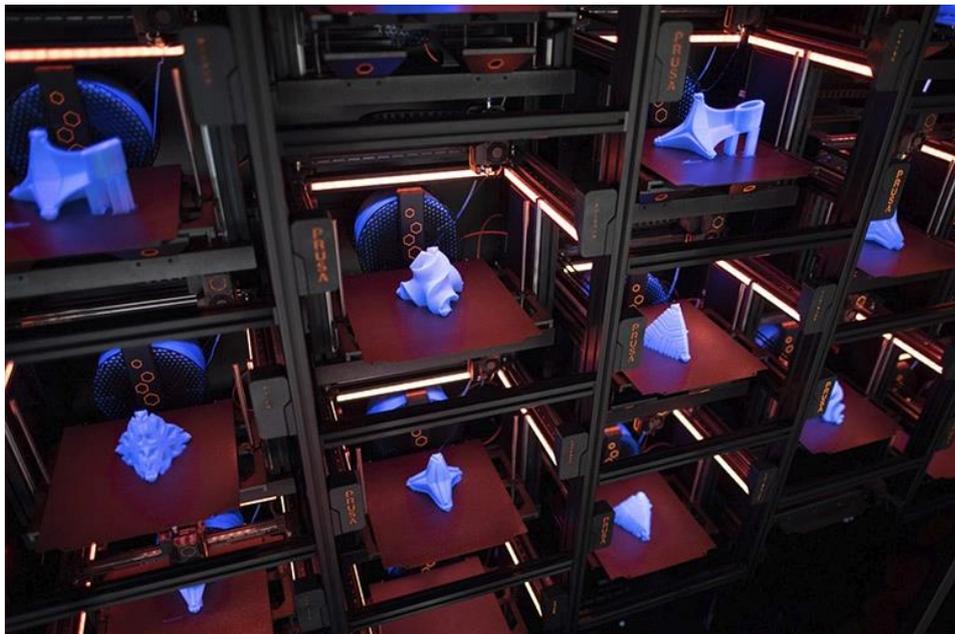
Aunque la fabricación aditiva es de las tecnologías más relevantes en la cuarta revolución industrial, la gestión de las granjas de impresión, no está caracterizada por la aplicación herramientas inteligentes de gestión y que continúa utilizando los procesos tradicionales de la

Metodología para la transformación de

granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

industria 3.0. Para adaptar la gestión dentro del concepto de Industria 4.0, fabricantes como PRUSA, han comenzado a utilizar el concepto de “granja 4.0 de impresión 3D” y ha sido presentado recientemente en la EXPO 2020 de Dubái. El prototipo de PRUSA para la administración de una granja de impresoras 3D Prusa Pro AFS, integra versiones adaptadas de sus impresoras de forma modular y con un robot cartesiano con un efector final, diseñado para retirar las bases de impresión con las piezas terminadas. Además, el sistema monitoriza cada impresora durante el proceso de fabricación, obteniendo los datos que cada máquina puede ofrecer y procesándolos de manera automática. Este aspecto soluciona, en gran medida, los problemas anteriormente descritos. Así, PRUSA planea lanzar próximamente al mercado; este sistema, el cual se encuentra aún en desarrollo y del que se conocen aún pocos detalles (Impresoras3D.com, 2021).

**Figura 1.** *Prusa Pro AFS.*



*Nota: Esta figura muestra la Prusa Pro AFS en la EXPO 2020 de Dubái. Reproducida de Impresoras3D.com, 2021.*

## 1.1. Motivación

Partiendo del planteamiento de PRUSA con su prototipo Prusa Pro AFS, surge la pregunta de si es posible lograr un nivel de gestión similar, adaptando granjas de impresión ya existentes,

Metodología para la transformación de

granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

con distintas versiones de impresora. Con base en lo anterior, y considerando que el prototipo de PRUSA contiene impresoras 3D diseñadas específicamente para el sistema de gestión, no es posible integrar impresoras de diferentes versiones, siendo así un sistema bastante limitado y poco adaptativo.

La experiencia personal de varios años de trabajo en el área, han motivado la búsqueda de herramientas que solucionen algunas de las problemáticas de gestión citadas anteriormente, y que permitan optimizar los procesos de fabricación. Para garantizar calidad en las piezas impresas, el manejo de varias impresoras demanda gran cantidad de tiempo, debido a que se debe supervisar que cada parámetro esté en condiciones ideales para el funcionamiento. Generalmente, i) se debe nivelar la cama de impresión para una correcta adhesión del material, ii) cambiar filamento iii) purgar filamento, para evitar residuos del filamento anterior, iv) inspeccionar la primera capa de impresión para garantizar un buen proceso de fabricación, entre otros.

Teniendo en cuenta lo anterior, se pretende desarrollar un trabajo de investigación sobre diversas herramientas y tecnologías habilitadoras de la industria 4.0, tanto de software como de hardware, que permitan definir una estrategia flexible, adaptativa y extensible para la transformación de una granja 3.0 de impresión 3D a 4.0. Para ello, a continuación, se desarrollará una búsqueda exhaustiva de información sobre las tecnologías existentes de gestión, análisis, procesamiento y visualización de datos, como también de sistemas robóticos que pudiesen ser fácilmente adaptables al proceso.

El trabajo tiene un carácter documental y; está orientado a la revisión y recolección de información relativa a las impresoras 3D, el concepto de granja de impresoras y sus necesidades, para la optimización del proceso de fabricación. Se ha decidido realizar este trabajo, ya que, tras una primera búsqueda de información, se comprobó que no existía ningún análisis respecto a las tecnologías de la industria 4.0, que solucionen los problemas a la hora de gestionar más de dos impresoras 3D a la vez y/o que permita desarrollar una metodología para la adaptación de las granjas de impresión 3D en un contexto de fabricación inteligente.

Debido a esto, sería este un primer paso investigativo en el área. Sin embargo, el alcance del presente trabajo, y tal como se acordó con el director del trabajo, no es posible proyectarlo hasta su desarrollo e implementación, debido a los tiempos en que se encuentra planteado el TFM.

## 1.2. Planteamiento del trabajo

Para la identificación de las herramientas de transformación de la granja 3.0 a 4.0 de impresión 3D, en el presente trabajo se investigarán los requerimientos de un sistema que permita: i) integrar cada una de las máquinas en el proceso de producción a través de herramientas digitales, ii) garantizar el desarrollo óptimo del proceso de fabricación, iii) identificar las variables que puede aportar cada una de las impresoras mediante el uso de protocolos de comunicación entre máquinas. Algunas de estas variables pueden ser: i) temperatura del Hotend, ii) temperatura de la cama, iii) información del sensor final de filamento, iv) progreso de la impresión. Por otra parte, es fundamental también el registro de variables externas como: i) la temperatura ambiental, ii) la humedad, iii) el estado de la impresión, iv) detección de fallas en la calidad de la pieza o en el proceso de fabricación, como la pérdida de pasos, v) estado de la impresora, como el sobrecalentamiento de los drivers, entre otros parámetros. Estos parámetros deberán ser analizados por el sistema de forma autónoma para gestionar el proceso de fabricación.

A todo lo anterior se suma, el análisis de la integración de otros sistemas robóticos que permitan la manipulación de las piezas fabricadas y los insumos de fabricación. Por ende, se puede detallar que la investigación se centrará en dos frentes. En primer lugar, aquellos aspectos referentes a los datos como software para la gestión de la granja y, en segundo lugar, el sistema ciberfísico, que integra diversos elementos robóticos para la gestión mecánica y automatizada del proceso.

Al finalizar esta investigación, se pretende obtener estándares que fundamenten la metodología. A su vez, se espera definir una lista de tecnologías existentes que cumplan a cabalidad con los mismos y que puedan ser estas consideradas como herramientas para la transformación de una granja 3.0 de impresión 3D a 4.0. Por otra parte, se pretende explorar nuevas líneas de investigación y nichos de mercado, en las que se puedan destacar tecnologías de las cuales no existen desarrollo o adaptaciones para este fin, si hubiera lugar.

## 1.3. Estructura de capítulos

El presente documento, está organizado de la siguiente manera: En el **capítulo primero**, se realiza una breve introducción en el tema de investigación y las problemáticas que presenta el área de estudio, para de esta manera contextualizar el entorno en que se encuentra

actualmente una de las tecnologías más importantes dentro de la industria 4.0 como es la impresión 3D.

Posteriormente, en el **segundo capítulo**, se abordan los conceptos que se requieren profundizar dentro del trabajo de investigación, recopilando la información relevante, que conformará el estado del arte. Continuando así con el **capítulo tres**, en el cual se especifican los objetivos y la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo de investigación.

En el **capítulo cuarto**, se recopila la información documental encontrada, previa revisión y el desarrollo de la metodología propuesta para la transformación de granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0. Finalmente, en el **quinto capítulo** se encuentran las conclusiones de la investigación.

## 2. Contexto y estado del arte

### 2.1. Descripción general del contexto del proyecto

El término **impresión 3D**, se refiere específicamente al proceso **FA** que consiste en crear un sólido, aumentando material de forma paulatina y con un alto grado de precisión (Zahera, 2012), Por oposición, la **fabricación por sustracción** o mecanización se basa en la eliminación de material. La fabricación aditiva es un conglomerado de tecnologías, entre las cuales se encuentran: i) la estereolitografía o *stereolithography* (siglas en inglés, SLA), ii) la sinterización Selectiva por Láser o SLS, iii) fabricación por inyección y iv) por deposición de material fundido o *Fused Deposition Modeling* (FDM) (Impresoras3D.com, 2021).

Las anteriores, permiten crear sólidos de diferentes maneras, teniendo en cuenta los diferentes materiales para la fabricación de las piezas. Entre estas tecnologías destacan: la **FDM**, que funde un filamento termoplástico y lo deposita en estado viscoso, capa a capa a través de una boquilla, para terminar solidificando al salir de ella. Por otro lado, la **SLA** que utiliza resina líquida fotopolímera, es curada por un haz de luz láser convirtiéndola en sólida capa por capa y dar forma al objeto (Rodríguez, 2001).

En la actualidad, las impresoras **FDM** Y **SLA** lideran el mercado, y son las tecnologías más extendidas a nivel mundial. En el caso del **FDM**, el uso de esta tecnología se ha potenciado con proyectos como el **RepRap** para el desarrollo de impresoras de código abierto, auto replicables y de bajo costo, que ha hecho accesible esta tecnología fuera de ambientes industriales (Ciurana, Serenó, & Èlia, 2013).

Ambas tecnologías, tienen sus ventajas y desventajas, por un lado, las piezas fabricadas en **FDM** tienen un menor costo de producción, tardan menos y el proceso de fabricación es más sencillo y fácil de gestionar que en el resto de tecnología de Impresión. Sin embargo, la calidad superficial no es la mejor y, por ende, suele ser necesario realizar postprocesado a las piezas. Mientras que, los acabados superficiales del **SLA** y la precisión dimensional son mejores. Por el contrario, el proceso de fabricación es más complejo, difícil de gestionar, toma más tiempo y los costos por unidad son mayores (Choudhari & Patil, 2013, september).

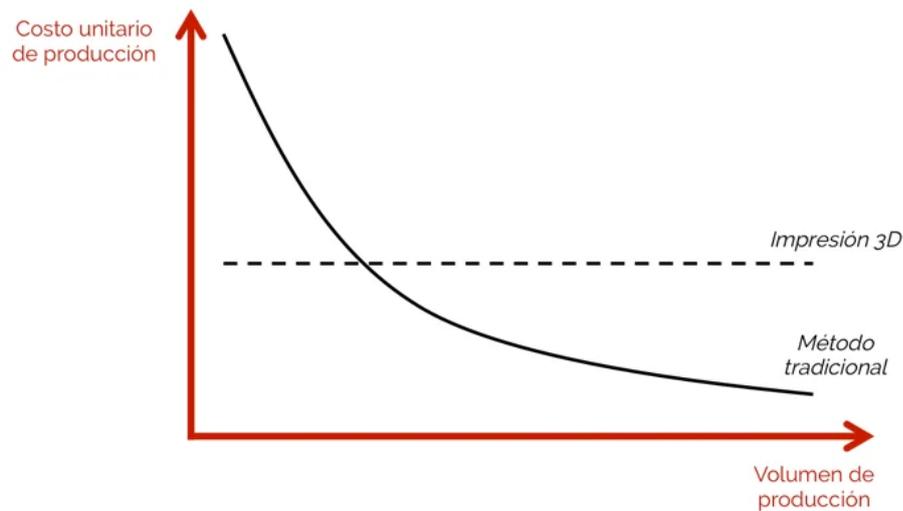
La fabricación aditiva o **impresión 3D** tiene grandes ventajas respecto a la fabricación tradicional. Por un lado, al simplificar el proceso de fabricación, permite la personalización de los productos y la fabricación a un costo significativamente bajo. Este aspecto, supone una revolución a los conceptos comerciales de producción preestablecidos, permitiendo conectar pequeños fabricantes con los consumidores finales.

La impresión 3D simplifica la cadena de comercialización y suministro, ahorrando costos elevados de logística e inventarios físicos, cambiándolos por digitales. Además, esta tecnología permite desarrollar sólidos más complejos, de mayor resistencia o flexibilidad, modificando su densidad, reduciendo la cantidad de piezas de una máquina, realizando prototipos de forma ágil y a bajo coste, entre otras (Z-T, 2016).

A pesar de estos beneficios, las tecnologías de fabricación aditiva cuentan con limitaciones importantes a la hora de producir medianas o grandes cantidades. Esto es debido al tiempo que tarda en producirse una sola pieza, lo cual no es inconveniente cuando el objetivo es la producción en masa de un producto específico, ya que para ello se puede recurrir a la fabricación tradicional.

Dicho esto, conviene subrayar, que ambas no son antagonistas, ninguna es mejor que la otra, depende su adecuación al caso en concreto. Para casos de producción en grandes cantidades de un mismo producto, el costo unitario es menor con los métodos tradicionales, como se muestra en la figura 2. Sin embargo, el inconveniente se presenta cuando se requiere fabricar en periodos cortos de tiempo varios objetos diferentes entre sí, ya sea para prototipado o como productos finales. Esto genera una desventaja competitiva frente a los métodos tradicionales, dificultando el aprovechamiento de la fabricación aditiva en ambientes competitivos (Contreras, 3dnatives, 2018).

**Figura 2.** Costo de producción relacionado con la impresión 3D.



*Nota: Esta figura muestra una comparativa del costo de producción entre el método tradicional y la impresión 3D. Reproducida de Contreras, 2018.*

Para solucionar los inconvenientes anteriormente descritos, algunos estudios (Z-T, 2016) han implementado el concepto de granja de impresión 3D o *3D printer farm*, escalando horizontalmente el sistema, con varias máquinas que funcionan de forma paralela para satisfacer la demanda de producción. Sin embargo, la implantación de este tipo de sistemas acarrea un problema de gestión, debido a la organización del flujo de trabajo de cada máquina, el seguimiento, control e inspección de cada uno de los procesos de fabricación y el mantenimiento y reparación de cada equipo, además de procesos complementarios como lo puede ser el postprocesado.

Por esta razón, algunos fabricantes importantes como Ultimaker, Stratasys, Formlabs, 3D Systems y Prusa han comenzado a desarrollar nuevos sistemas que faciliten la gestión de las granjas de impresión. Desafortunadamente, estos sistemas funcionan únicamente con sus impresoras y aún no solucionan el problema en su totalidad (Gushchin, Martynovich, & Torubarov, March 2019).

## 2.2. Proyectos relacionados con el tema del TFM

A pesar de la influencia que tiene la impresión 3D en la actualidad, las herramientas existentes para la gestión de varias de estas, sobre todo de código abierto, son bastante limitadas (Radaviciute, 2022). A continuación, revisaremos algunas de las alternativas más relevantes, y su funcionamiento.

### 2.2.1. Octoprint

Es un software de código abierto para el control y administración de impresoras 3D, de manera remota (Marchante, 3D Natives, 2020). Está disponible de forma gratuita y su funcionamiento, se basa en una interfaz web, la cual se debe conectar a la red local. Esto permite, enviar archivos Gcode a las máquinas vinculadas, cuya conexión se realiza generalmente con la ayuda de una Raspberry Pi. Además, cuenta con un sistema compatible con cámaras, para facilitar el monitoreo de una impresión en tiempo real, logrando así, un seguimiento eficaz del progreso de las piezas (Marchante, 3D Natives, 2020).

Algunos de los parámetros que controla, son: i) paso a paso de motores ii) temperatura de la placa iii) temperatura del extrusor iv) inicio de una impresión v) pausar o detener impresión, entre otras (Octoprint, 2013).

### 2.2.2. Ultimaker Cura Connect

Es un software de impresión 3D de código abierto, creado con el propósito de preparar las impresiones. Integra un software de CAD, otorgando la posibilidad de visibilizar una simulación, aprovechando así la personalización de configuraciones en pro de conseguir un control completo de los parámetros requeridos para el óptimo funcionamiento de la fabricación (Ultimaker, 2022).

Las impresiones se distribuyen entre un grupo de impresoras para una producción eficiente y aprovechable. La asignación de las impresoras, se determina según si se detectan en funcionamiento o no (Ultimaker, 2022).

Adicional, las piezas impresas se pueden supervisar con facilidad, a través de su interfaz, en la cual también se puede programar de forma sencilla para que, al finalizar una impresión, la siguiente se imprimirá automáticamente (3DNeworld, 2018).

Es posible dar prioridad a las impresiones sobre otras, las cuales pueden ser configuradas en la cola de impresión sin tener que cambiar materiales, u otros parámetros importantes (3DNeworld, 2018).

### **2.2.3. Stratasys GrabCAD Print**

Es una solución para mejorar el trabajo con impresoras FDM y PolyJet. Esta última, propia de la empresa Stratasys (Gushchin, Martynovich, & Torubarov, March 2019).

Stratasys GrabCAD Print permite realizar un seguimiento de los materiales y mantener las impresoras conectadas a varios dispositivos (Gushchin, Martynovich, & Torubarov, March 2019). Además, esta solución maximiza la organización de impresión, teniendo en cuenta la disponibilidad de las impresoras, el tiempo estimado, y otras consideraciones importantes, lo que mejora la eficacia en la cola de impresión (GRABCAD PRINT, 2022 ).

Posee, sin embargo, una limitación en cuanto a la compatibilidad, debido a que solo puede ser utilizado en ciertas impresoras 3D de Stratasys y requiere de una PC con sistema operativo Windows (Gushchin, Martynovich, & Torubarov, March 2019).

### **2.2.4. Formlabs Dashboard**

Es una solución de Formlabs para sus impresoras Form 2 SLA, y que permite administrar mediante una aplicación en la nube, varias impresoras conectadas a través de Internet. Se puede monitorear el uso de materiales y consultar pedidos realizados a Formlabs (Formlabs, 2020). Posee gran capacidad de control remoto, la gestión de la impresión como también su estado. Por ejemplo, puede verse el tipo y la cantidad de materiales disponibles para imprimir. También es posible configurarla para recibir notificaciones por medio de mensaje o correo electrónico, sobre aspectos como inicio, finalización o interrupción en el proceso de impresión (Gushchin, Martynovich, & Torubarov, March 2019).

Para su funcionamiento es obligatorio que las impresoras estén conectadas permanentemente a Internet, lo cual en cierta medida es un factor limitante. Por otra parte, no tiene en cuenta requerimientos adicionales para la tecnología de impresión SLA como: i) el dispositivo para lavar la resina y ii) el dispositivo para curar el producto impreso (Gushchin, Martynovich, & Torubarov, March 2019).

### **2.2.5. 3D Systems 3D Sprint**

Es un software de la empresa 3D Systems para la gestión de impresoras SL. Las impresoras se vinculan a través de una red local. Permite ejecutar trabajos más rápido con una priorización de impresiones en la cola de impresión, iniciando de forma automática, y enviando los trabajos de menor prioridad al segundo plano (Gushchin, Martynovich, & Torubarov, March 2019).

Se muestra el estado de cada impresora en una pestaña donde se visualiza la cola de impresión. Sin embargo, no cuenta con una distribución uniforme de carga de trabajo en las impresoras, ni tampoco un seguimiento de las horas de trabajo (Gushchin, Martynovich, & Torubarov, March 2019).

Lo anterior, hace que algunas de las impresoras pueden tener mayor desgaste que otras, provocando problemas y fallas prematuras (Gushchin, Martynovich, & Torubarov, March 2019).

3D Sprint ofrece herramientas que le permiten imprimir mejores piezas en 3D sin necesidad de un software costoso para lograrlo. Prepara y optimiza los datos CAD, para posteriormente gestionar el proceso de fabricación aditiva en las impresoras 3D (3D Technology Ltd, 2022). Las herramientas de monitoreo de 3D Sprint le permite optimizar los niveles de material y el uso antes y durante la operación de impresión (3D Technology Ltd, 2022).

#### **2.2.6. Prusa pro AFS**

Denominado Sistema de Granja Autónoma o *Autonomous Farm System* es la propuesta de Prusa para crear prototipos rápidos y producción de pequeños lotes. Cuenta con 34 impresoras 3D Original Prusa CoreXY, una interfaz de pantalla táctil y mecanismos de recogida y dispensación de piezas automática (Prusa Research by Josef Prusa, 2022).

El diseño y construcción de las impresoras de este sistema, ubicadas estratégicamente en un equipo especial y un software gestiona toda la granja, diseñado con algoritmos inteligentes para la asignación de las tareas propias de cada proceso de impresión y recopilar datos (Prusa Research by Josef Prusa, 2022).

### **2.3. Tecnologías relacionadas con el tema del TFM**

A continuación, el trabajo describirá las tecnologías relacionadas al proceso de fabricación y las tecnologías que ayudan a su gestión.

#### **2.3.1. Fabricación inteligente.**

En la industria 4.0, una fábrica inteligente tiene como objetivo flexibilizar y aumentar la eficiencia del proceso productivo, para satisfacer las necesidades de consumidores (Hozdić, 2015), y las exigencias de un entorno, donde el ciclo de vida de los productos es mucho más

corto, debido a los rápidos cambios tecnológicos (Mabkhot, Al-Ahmari, Salah, & Alkhalefah, 2018).

Para adaptarse a este nuevo entorno y perfil de consumidores, las fábricas aplican la integración vertical como estrategia para compartir información con los socios, proveedores y clientes (Hozdić, 2015). Esto les permite conocer de primera mano las necesidades y requerimientos para el proceso de diseño y fabricación con metodologías como el “*design thinking*”. Además, esto permite la integración vertical de los procesos organizacionales, desde la concepción del producto hasta su desarrollo (Hozdić, 2015). Como resultado, se obtiene un sistema que integra totalmente los procesos, tanto intrínsecos como extrínsecos al proceso de fabricación.

### **2.3.2. Fabricación aditiva.**

La fabricación aditiva o FA es un concepto que abarca muchas tecnologías, y que es referenciado por diversos términos, incluida la impresión 3D, el prototipado rápido, la fabricación digital directa, la fabricación en capas y la fabricación de aditivos (Universidad Internacional de Valencia, 2019). Para llevar a cabo un proceso de fabricación aditiva se requiere: i) un ordenador ii) un software de modelado 3D y iii) un equipo de fabricación aditiva.

La **FA** ofrece a los consumidores y profesionales, la facilidad de fabricar, reparar y personalizar productos (Universidad Internacional de Valencia, 2019). El proceso se basa, en convertir un modelo digital en un objeto tridimensional sólido. Para materializar este concepto, varias tecnologías de impresión 3D se han desarrollado en la industria, con la finalidad de lograr la creación de un modelo físico, añadiendo material capa por capa (Marchante, 3D Natives, 2020).

Actualmente existen impresoras 3D para múltiples materiales, dirigidas a las necesidades específicas del mercado. Para el fin investigativo del presente proyecto, es importante profundizar en los tipos de impresoras **FDM**, descritas a continuación:

#### **2.3.2.1. Impresora 3D Cartesiana**

Se denominan de esta manera, debido a que sus movimientos siguen los 3 ejes dimensionales X, Y, y Z, en un sistema cartesiano. Es el tipo de impresoras más comunes en el mercado y existen de dos tipos: Cartesiana con movimiento de cabezal en el eje XY y con movimiento de cabezal en eje XZ (Contreras, 3D natives el sitio web de la impresion 3D, 2020).

### 2.3.2.2. **Impresora 3D Delta**

Una de las características más destacada de esta impresora, es su cama circular, además del extrusor fijado por una configuración triangular, que le permite moverse en eje X, Y y Z y definiendo los límites de alcance, en el diámetro de la cama o base, la cual es estática, y la altura de los brazos (Contreras, 3D natives el sitio web de la impresion 3D, 2020).

### 2.3.2.3. **Impresora 3D Polares**

Los conjuntos de coordenadas de esta impresora, describen puntos en una cuadrícula circular, determinados con ángulo y longitud. La base de impresión, es redonda y gira mientras el cabezal de impresión se mueve hacia arriba, abajo, izquierda y derecha. Cabe resaltar que estas soluciones polares, pueden funcionar con dos motores, a diferencia que las impresoras cartesianas o delta, las cuales necesitan un motor en cada eje (Contreras, 3D natives el sitio web de la impresion 3D, 2020).

### 2.3.2.4. **Brazos robóticos**

La impresión con un brazo robótico, se encuentra aún en desarrollo. Únicamente se ha implementado en algunas empresas (Contreras, 3D natives el sitio web de la impresion 3D, 2020). Sin embargo, la innovación de este método de fabricación, es debido a que no necesita una base de impresión fija, permitiendo mayor movilidad y la posibilidad de automatizar los procesos productivos de forma rápida y sencilla. Además, el movimiento del cabezal es flexible, abriendo posibilidades de diseños complejos, aunque se sigue trabajando para alcanzar la calidad y precisión de otras impresoras (Contreras, 3D natives el sitio web de la impresion 3D, 2020).

Para entender mejor el funcionamiento de las impresoras 3D, es necesario conocer las partes que las componen, teniendo en cuenta que cada una, forma el objeto con ciertas particularidades. A continuación, se relaciona algunas partes y las impresoras que las tienen:

### 2.3.2.5. **Extrusor:**

Cumple la función de empujar el material hasta la boquilla (Servitec3D, 2021). Se compone de un motor que ejerce la fuerza de empuje, ruedas dentadas encargadas de la tracción del filamento, rodamientos de presión que proporciona continuidad en el movimiento del material, y una polea (TintasyTonerCompatibles.es, 2021).

**Figura 3.** *Extrusor.*



*Fuente: Reproducida de Servitec3D, 2021.*

#### 2.3.2.6. **Fusor:**

Es una parte esencial en esta tecnología, debido a que es el encargado de derretir el material, para posteriormente ser depositado en la cama (TintasyTonerCompatibles.es, 2021). Está conformado por un hotend, el cual calienta el filamento, un sensor de temperatura y una boquilla, que es el orificio por donde el material es expulsado, marcando el diámetro de la extrusión (TintasyTonerCompatibles.es, 2021).

**Figura 4.** *Fusor.*



*Fuente: Reproducida de TintasyTonerCompatibles.es, 2021.*

#### 2.3.2.7. **Ejes:**

Es el componente que guía el movimiento de la impresora en X, Y y Z (TintasyTonerCompatibles.es, 2021).

Metodología para la transformación de

### 2.3.2.8. Varillas y rodamientos:

Las varillas sirven de guía para los componentes móviles, ayudando un adecuado desplazamiento, durante el funcionamiento de la impresora. Las piezas móviles, son las que generalmente van montadas en los rodamientos (TintasyTonerCompatibles.es, 2021).

**Figura 5.** Varillas y rodamientos.



*Fuente: Reproducida de TintasyTonerCompatibles.es, 2021.*

### 2.3.2.9. Husillos y correas:

Se encargan de transmitir el movimiento ejercido por motores, sirviendo de guía para los ejes (TintasyTonerCompatibles.es, 2021).

**Figura 6.** Husillos y correas.

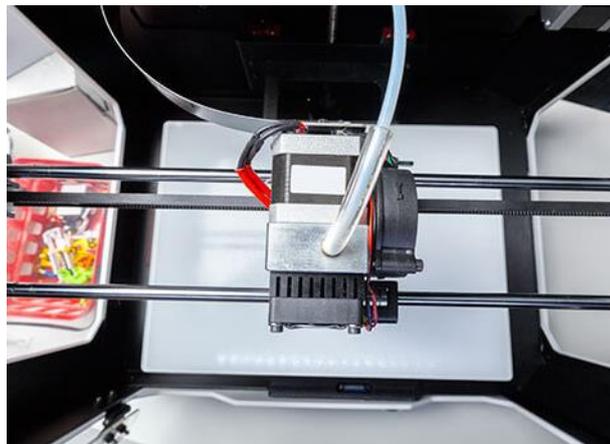


*Fuente: Reproducida de TintasyTonerCompatibles.es, 2021.*

#### 2.3.2.10. **Cama o base:**

Es la superficie sobre la cual se deposita el material. Entre sus componentes contiene una resistencia que le permite calentarse, garantizando una mayor adhesión del filamento en la primera capa de impresión (Servitec3D, 2021).

**Figura 7.** *Cama de impresión.*



*Fuente: Reproducida de Servitec3D, 2021.*

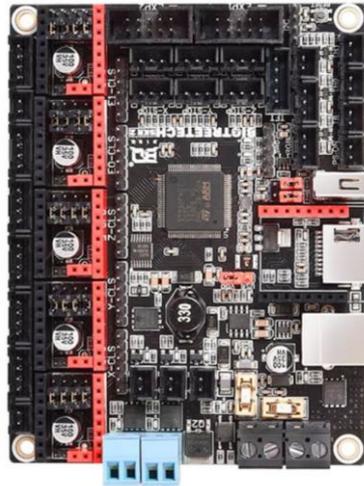
#### 2.3.2.11. **Fuente de alimentación:**

Convierte la corriente de la red eléctrica en corriente continua, alimentando la impresora 3D de energía para que pueda funcionar (Servitec3D, 2021).

#### 2.3.2.12. **Placa Base:**

Es el componente electrónico donde se conectan los elementos de la impresora 3D, controlando igualmente sus funciones. Está conformada por un procesador que interpreta las instrucciones, los datos y realiza los cálculos que se requieren para la impresión de una pieza, desde el momento en que ingresa el Gcode. También cuenta con controladores de motores, regulando la salida del voltaje. Adicional, tiene entradas USB y lector de tarjetas USB (TintasyTonerCompatibles.es, 2021).

**Figura 8.** *Placa Base.*



*Fuente: Reproducida de TintasyTonerCompatibles.es, 2021.*

Teniendo en cuenta las partes, anteriormente descritas, se relaciona en la siguiente tabla, aquellos que conforman los diferentes tipos de impresoras 3D, marcando con una “x”:

**Tabla 1.** *Partes de impresoras FDM: cartesiana, polar, delta y brazo robótico.*

Partes	Cartesiana	Delta	Polar	Brazo robótico
<b>Extrusor</b>	X	X	X	X
<b>Fusor</b>	X	X	X	X
<b>Ejes</b>	X	X		
<b>Varillas y rodamientos</b>	X	X		
<b>Husillos y correas</b>	X	X		
<b>Cama o base</b>	X	X	X	
<b>Fuente de alimentación</b>	X	X	X	X
<b>Placa Base</b>	X	X	X	X

*Nota: Esta tabla muestra principales partes de los diferentes tipos de impresoras.*

Terminado el reconocimiento de las partes de una impresora 3D, es necesario ahondar sobre un término indispensable para el funcionamiento de una impresora, este es el *G-Code*. En primer lugar, se debe precisar que un objeto se puede imprimir en 3D, debido a la transformación del archivo que compone el diseño inicial, en formato CAD a un formato de operaciones de impresiones a través de **software de corte**, conocido también como **laminado** (Marchante, 3D Natives, 2020).

Los programas de laminado, se encargan de convertir el diseño digital inicial, que se encuentra en archivo STL, a un archivo específico para el control de la impresora 3D. Este archivo se compone por el *G-Code*, cuyo lenguaje de programación le permite a la impresora, entender los comandos para fabricar la pieza final (Marchante, 3D Natives, 2020).

### **2.3.3. Firmwares de impresoras 3D FDM.**

El *firmware* hace referencia al vínculo entre el *software* y el *hardware*, convirtiendo las entradas del *software* en una salida comprensible para el *hardware* de la impresora (Mejia, 2021). Dentro del proceso de impresión 3D, este proceso se presenta cuando se envía un código G a la impresora 3D, desde el *software* de laminado. En ese orden de ideas, el *firmware* “crea” el código y da una salida a los motores paso a paso, los calentadores, la pantalla, y demás componentes que forman parte del proceso de fabricación (Mejia, 2021).

Es importante tener en cuenta que las placas base, no ejecutan todos los *firmwares*. Y en sentido contrario, todos los *firmwares* no son universalmente compatibles. A continuación, se resaltan algunos:

#### **2.3.3.1. Marlin**

Este es uno de los *firmwares* más conocidos y utilizados. Muchas impresoras 3D lo tienen incluido por su buen nivel para la personalización y por la gran interacción y apoyo de la comunidad (Mejia, 2021). Tiene una versión para placas de 8 bits y otra para placas de 32 bits. Es tan adaptable que incluso puede ser usado en construcciones propias de impresoras 3D. Adicional, es usado en máquinas CNC y grabadores láser (Mejia, 2021).

#### **2.3.3.2. Klipper**

Se usa para impresoras 3D más reciente y que contienen mayor cantidad de funciones (Mejia, 2021). Se destaca por su capacidad para realizar cálculos a gran velocidad, lo que da como resultado, mejores velocidades de impresión. Para ello, se utiliza un ordenador de placa única adicional, por ejemplo, una Raspberry Pi (Mejia, 2021).

Puede funcionar en muchas impresoras 3D cartesianas y delta. El firmware de Klipper está programado en Python.

#### 2.3.3.3. Prusa

Es una de las versiones modificadas del firmware de Marlin. Fue ajustada para funcionar con placas Einsy Rambo, propias de las impresoras 3D Prusa. Cabe resaltar que, las impresoras Prusa son algunas de las mejores en el mercado (Mejia, 2021).

#### 2.3.3.4. Repetier

Es reconocido por generar impresiones 3D rápidas y fiables, funcionando tanto para impresoras 3D cartesianas como delta (Mejia, 2021). Es altamente personalizable, debido a que utilizando la herramienta de configuración se puede ajustar varios parámetros. Es un código abierto y de descarga gratuita, lo cual ayuda a su continua actualización y mantenimiento (Mejia, 2021).

#### 2.3.3.5. RepRap

El firmware RepRap fue uno de los primeros en soportar placas de 32 bits. Se actualizan con facilidad a través de una tarjeta SD. Cuenta con una herramienta de configuración en línea que ayuda actualizar el archivo (Mejia, 2021). Su limitación está, en funcionar únicamente en placas que utilizan chips AVR de 32 bits (Mejia, 2021).

#### 2.3.3.6. Smoothieware

Fue diseñado para placas de 32 bits, de las más importantes se encuentra Smoothieboard y la Azteeg X5 Mini (Mejia, 2021). Permite una gran cantidad de configuraciones personalizadas, incluyendo la posibilidad de añadir motores paso a paso adicionales y configurar la placa para el corte por láser o el fresado CNC (Mejia, 2021).

#### 2.3.3.7. Ultimaker

Teniendo en cuenta que las impresoras Ultimaker tiene 2 placas, una basada en Arduino y otra basada en Linux, la primera ejecuta un *firmware* Marlin procesando los códigos G de "bajo nivel", y la segunda interpreta los de mayor complejidad (Foro Ultimaker Comunidad de Expertos en Impresión 3D, 2019).

#### 2.3.3.8. Griffin

Este *firmware* es ligeramente diferente del Marlin estándar (Foro Ultimaker Comunidad de Expertos en Impresión 3D, 2019). Una de las modificaciones más significativas, se encuentra

Metodología para la transformación de

en la implementación de una función, en la que se le indica a la impresora 3D, el diámetro del filamento (Foro Ultimaker Comunidad de Expertos en Impresión 3D, 2019).

#### 2.3.3.9. Makerbot

Este *firmware* está basado en la versión Marlin, con modificaciones que permiten compatibilidad exclusiva para las impresoras 3D Makerbot Replicator y su diseño electrónico, generando igualmente una excelente calidad en el resultado de las impresiones (ccyclone, 2015).

#### 2.3.4. Internet de las cosas (IoT).

La IoT hace referencia a la interconexión en red de los objetos, los cuales, muchas veces cuentan con algún tipo de inteligencia (Silvestre, 2017). El Internet es la herramienta principal con la cual los dispositivos se comunican electrónicamente y comparten información del entorno. Por esta razón, la IoT se considera una verdadera evolución de las conexiones en Internet, pues añade interconectividad extensa, y con una mejor percepción de los datos y servicios inteligentes más complejos (Silvestre, 2017).

Introduce una gran variedad de oportunidades en el acceso de datos (Silvestre, 2017). Adicionalmente, es la clave para el aumento de la productividad empresarial, debido a la distribución en la red, con la ayuda de dispositivos inteligentes y la personalización de servicios y productos según los requerimientos del cliente (Silvestre, 2017).

Entendido lo anterior, se puede inferir que dentro de las granjas de impresión 3D, su aplicación genera variedad de alternativas para su gestión, considerando que permitiría la comunicación entre equipos, y la adquisición de datos de manera sencilla en tiempo real.

#### 2.3.5. Big Data.

Este término, se refiere a cantidades masivas de datos que se acumulan en la sensorización de las impresoras 3D, difíciles de analizar y gestionar usando herramientas convencionales. Para el adecuado manejo de estos datos, que pueden provenir de múltiples fuentes, es necesario tener dos componentes tanto de hardware como de software.

Actualmente, existen varias tecnologías relacionadas a la gestión de datos en la FA, por ejemplo, Apache Hadoop. Este es un software de código abierto, usado principalmente en aplicaciones que almacenan datos distribuidos (Juan José Camargo, 2015), es decir, que se encuentran almacenados en varios equipos conectadas entre sí (Tecnologías información, 2018). La gestión, se realiza a través de grupos de ordenadores que utilizan modelos sencillos

de programación. Está diseñado para pasar de los servidores individuales a diferentes máquinas, cada oferta local de computación y almacenamiento (Juan José Camargo, 2015).

#### **2.3.5.1. Cloud Computing**

El Cloud Computing, es una tecnología con un crecimiento exponencial en los últimos años, ofreciendo grandes beneficios referentes a la capacidad de cómputo de grandes cantidades de datos, a través de la nube, generando una relación “*win to win*” entre el prestador del servicio y el consumidor, tal como lo describen (Qian, Luo, Du, & Guo, 2009), detallando cinco características principales de la computación en la nube (i) recursos informáticos a gran escala, (ii) capacidad y elasticidad (iii) grupo de recursos compartidos tanto virtualizados como físicos, (iv) programación dinámica de recursos y (v) propósito general.

En la computación en la nube los datos son enviados haciendo uso de la red, a un centro de procesamiento centralizado en la nube, encargado de solventar las necesidades de cómputo y almacenamiento requeridas (Cao, Liu, Meng, & Sun, 2020).

#### **2.3.5.2. Edge Computing**

El Edge Computing surge en respuesta a los problemas de congestión de la red, la lentitud en respuesta (alta latencia) y, la deficiente seguridad y privacidad de los modelos de computación en la nube convencionales (Cao, Liu, Meng, & Sun, 2020). El Edge Computing ofrece, ofreciendo un nuevo paradigma de computación de computación, enfocada en el procesamiento de pequeñas cantidades de datos cerca al usuario o la fuente de datos (borde), reduciendo la congestión en la red, protegiendo los datos sensibles y permitiendo el desarrollo de implementaciones que necesitan respuestas de cómputo en tiempo real o baja latencia (Cao, Liu, Meng, & Sun, 2020).

#### **2.3.6. Robótica y sistemas ciberfísicos.**

Es un sistema compuesto por diversas herramientas de computación, comunicación y almacenamiento de datos, que funciona con algoritmos que a su vez se integran y conectan a internet a través de redes digitales globales (bizintek Ingeniería y Diseño de Productos, 2019). Este tiene la capacidad de controlar artefactos físicos, entre ellos mecanismos robóticos, que pueden estar diseñados para desempeñar acciones específicas durante el proceso de impresión, en los diferentes sistemas, permitiendo una infinidad de posibilidades, para resolver problemas o satisfacer necesidades desde múltiples campos de aplicación. Por ejemplo, la extracción automática de piezas de la impresora (bizintek Ingeniería y Diseño de Productos, 2019).

Metodología para la transformación de  
granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

### 2.3.7. Machine learning

El aprendizaje automático, es una rama dentro de la evolución que han tenido los algoritmos computacionales a lo largo de los años, los cuales se diseñaron para imitar de cierta forma la inteligencia humana, basando su aprendizaje, en el análisis y recolección de datos del entorno (Murphy, 2015). Son considerados una base fundamental para el desarrollo de la nueva era tecnológica, donde el big data se sitúa en todos los campos cotidianos (Murphy, 2015).

La aplicación de estas técnicas basadas en el aprendizaje automático, forman parte de lo denominado inteligencia artificial, y han dado resultados exitosos en diversas áreas que abarcan entornos como el reconocimiento de patrones, la visión por computadora, la ingeniería de naves espaciales, las finanzas, el entretenimiento, entre otros (Murphy, 2015). Las grandes capacidades de los algoritmos para aprender de su contexto y traducir la información en acciones específicas, permite mejorar tanto la seguridad como la eficacia de la práctica de diferentes tareas, lo que conduciría a mejores resultados (Murphy, 2015).

## 2.4. Conclusiones sobre el estado del arte

La recopilación y descripción de las tecnologías abarcadas en este apartado, otorgan un panorama general del estado actual y el avance que se ha presentado en los últimos años, frente a herramientas que, llevadas a procesos concretos como la FA, genera muchas posibilidades para optimizar y hacer más eficaz cada etapa. Además, muestra el entorno tecnológico, como un área interdisciplinaria donde se han involucrado diferentes campos, en el desarrollo de soluciones que facilitan cada vez más, el manejo y ejecución de acciones específicas, liberando al ser humano de tareas repetitivas y que, al escalarse, generan problemas en su gestión.

Las soluciones que se han planteado por diferentes empresas, como Ultimaker, Prusa, makerbot, entre otros, se han basado en planteamientos concretos para impresoras 3D de sus propias marcas. No se ha tenido en cuenta, sin embargo, que las granjas de impresión 3D pueden estar compuestas por impresoras de diferentes referencias, y que requieren también de una adecuada gestión para el proceso de fabricación.

Por otra parte, todos los informes, documentación e información en general, referente a impresoras 3D, ayuda a profundizar en los conocimientos sobre su funcionamiento y de esta manera identificar detalladamente las necesidades que poseen, para contemplar las posibles soluciones tecnológicas que ayudarían a resolverlas.

## 3. Descripción general de la contribución del TFM

### 3.1. Objetivos

#### 3.1.1. Objetivo general

Teniendo en cuenta que, al incrementar la cantidad de máquinas en el proceso de paralelización de impresoras 3D, se dificulta solventar, de manera simultánea, las necesidades de cada una, haciendo que el proceso sea lento y poco eficiente. El objetivo de este trabajo de investigación, es desarrollar una metodología para la transformación de granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0, recolectando información de tecnologías existentes en la industria 4.0 aplicables, que disminuya la intervención humana y facilite su gestión.

#### 3.1.2. Objetivos específicos

- Analizar las necesidades de granjas 3.0 de impresión 3D, para la transformación a 4.0.
- Determinar tecnologías existentes, aplicables a las granjas 3.0 de impresión 3D, para la transformación a 4.0.
- Definir la metodología para la transformación de granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0.

### 3.2. Metodología del trabajo

El presente trabajo de investigación se trabajará bajo una metodología de investigación secuencial, la cual parte de la recopilación de información referente a los parámetros que se deben tener en cuenta, dentro del proceso de impresión 3D y el trabajo ejercido por el operario, en la gestión de una granja de impresoras 3D.

Esta fase, en primer lugar, se analiza desde la experiencia personal, tras varios años en el manejo de impresoras 3D y la determinación del funcionamiento de este tipo de máquina, describiendo las etapas previas al proceso de fabricación, aspectos como: i) calibración, ii) inserción de filamento, iii) tensión de bandas, entre otros.

Posteriormente, se recopilará información sobre los factores externos que influyen directamente en la calidad de la impresión, y se describirán, por ejemplo: i) temperatura ambiente, ii) humedad y iii) flujo de aire. Conocidos algunos aspectos relevantes a tener en cuenta, dentro del proceso de fabricación, se relacionará las problemáticas existentes en la

gestión de cada factor determinante para garantizar tanto la eficiencia, como la calidad de impresión de las máquinas.

### 3.3. Descripción general de las partes o componentes de la propuesta

Las tecnologías de la industria 4.0, aplicables, adaptables y extensibles a las necesidades que presenta una granja de impresión 3D, serán recopiladas y analizadas desde estudios existentes, fundamentando el alcance dentro de la gestión, para que se transforme de 3.0 a 4.0.

Incluirá entre tanto, conceptos fundamentales para comprender la impresión 3D, i) cómo funciona esta área tecnología, ii) las dificultades en la gestión de varias impresoras 3D, iii) los parámetros a tener en cuenta para garantizar la calidad y la eficiencia en la impresión iv) tecnologías adaptables a las granjas de impresión 3.0 para su transformación a 4.0.

#### **Alcance y limitaciones**

Se pretende con este trabajo de investigación, conocer las herramientas de la industria 4.0 que puedan transformar una granja de impresión 3D 3.0 a 4.0, solucionando el problema de gestión que actualmente existe, a través de una metodología que sea adaptativa y flexible. Hasta ahora, no se había planteado ninguna solución holística ni universal.

Con respecto a las limitaciones de este trabajo, se estudiará únicamente las granjas de impresión 3D con tecnología FDM, por ser las más extendidas a nivel mundial, y por ser la tecnología en la que más experiencia se puede aportar. No se considera factible, de hecho, la generalización de la metodología de transformación para abarcar más de una tecnología de FA debido a que cada una contiene sus propias necesidades.

Por otra parte, no se tendrán en cuenta factores como el resultado final de las piezas impresas, en cuanto a resistencia de materiales, u otras características propias de los objetos imprimibles.

Además, debido al límite de tiempo planteado para el desarrollo del presente TFM, no es factible desarrollar o implementar la metodología de transformación completa. Sin embargo, este trabajo de investigación, logra ser un gran inicio para conocer el amplio panorama que se vive dentro de la experiencia del proceso de impresión 3D en granjas y la implementación del concepto de fabricación inteligente a este.

Metodología para la transformación de

granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

### **Listado de participantes**

Para el presente trabajo de investigación, se contará con la participación del autor, Jorge Andres Colunge Lopez, encargado de realizar la exhaustiva recopilación de información referente al tema planteado, y la del Dr. Javier Ortún Terrazas, encargado de supervisar y dirigir la investigación, como director del Trabajo Final de Estudios.

### **Tecnologías implicadas**

En este trabajo se estudiarán algunas de las tecnologías habilitadoras de la industria 4.0 como la fabricación aditiva, internet de las cosas (IoT), big data, machine learning, robótica y sistemas ciberfísicos.

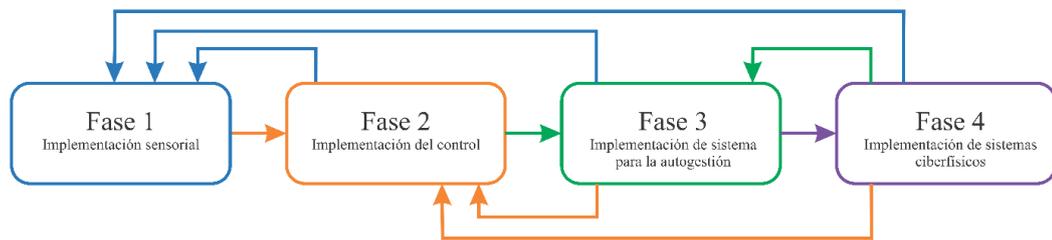
### **Resultados esperados**

Se espera lograr una metodología que oriente de manera general la transformación de una granja de impresoras 3D 3.0 a 4.0 abriendo de esta manera un nuevo panorama para futuras investigaciones, relacionadas a su gestión, haciendo uso de las tecnologías aplicables aquí recopiladas y teniendo en cuenta las necesidades que el proceso de fabricación aditiva demanda.

## 4. Desarrollo específico de la contribución

Dando inicio al desarrollo de la metodología para la transformación de granjas de impresión 3D, de un modelo de producción automatizado, hacia un modelo de fabricación inteligente, comprendido en el concepto de industria 4.0, se establecen cuatro fases secuenciales y modulares.

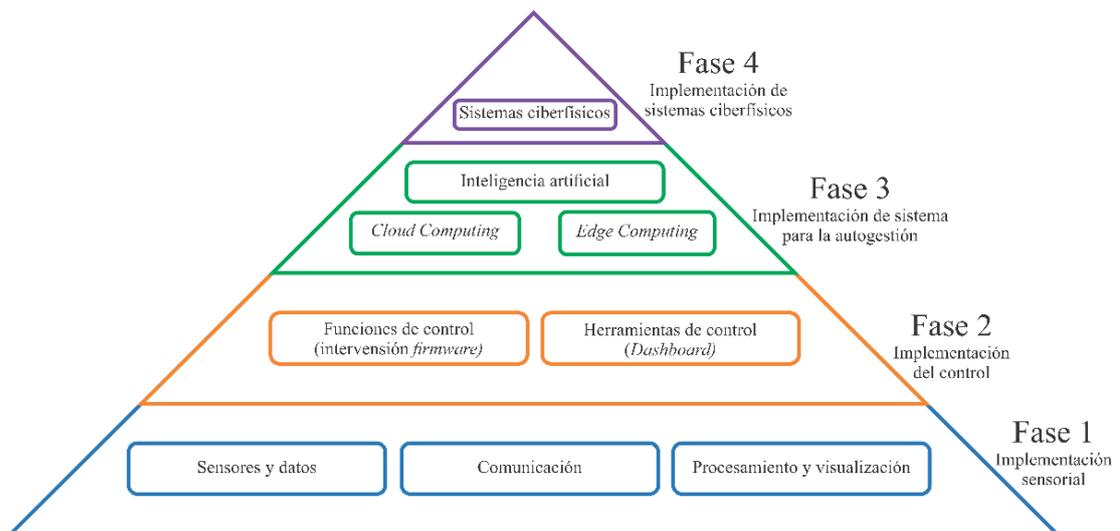
**Figura 9.** Esquema general de la metodología.



*Nota: Esta figura representa el esquema secuencial de la metodología y las rutas que se pueden dar.*

El objetivo de esta estructura es que la metodología se adapte a las necesidades de cada granja de impresión 3D, dado que es posible tomar algunas partes de cada fase y realizar varios ciclos recorriendo las fases según convenga. Esto marca un referente, teniendo en cuenta las tecnologías aplicables al proceso de impresión 3D FDM.

**Figura 10.** Estructura de la metodología.



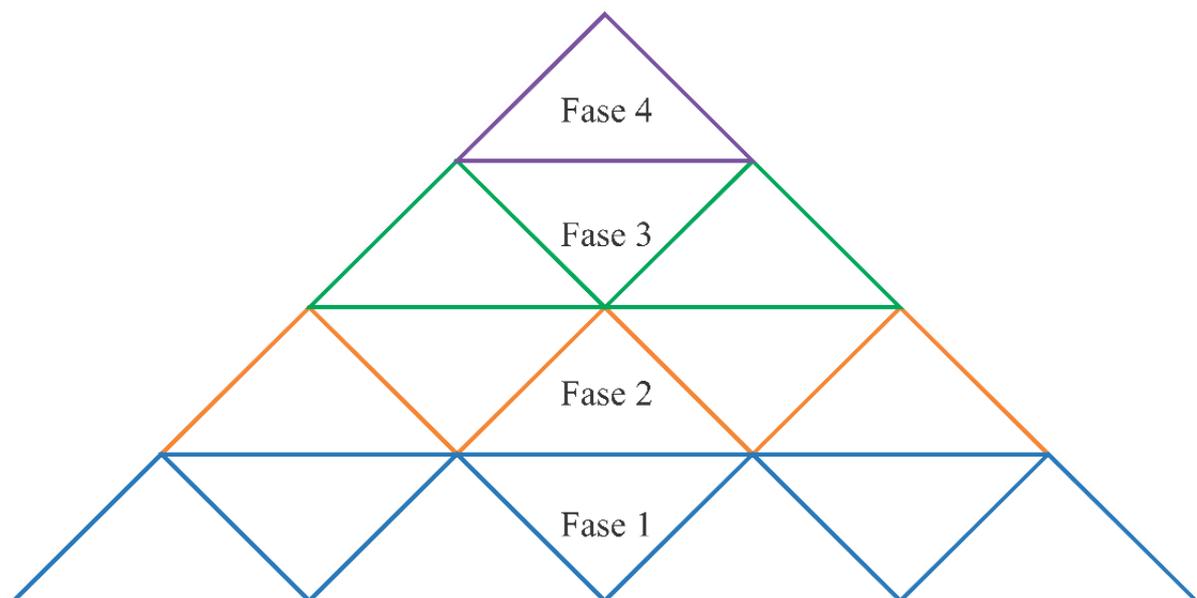
Metodología para la transformación de  
granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

El planteamiento de estas fases, parte de las necesidades más básicas hasta procesos más complejos de una granja de impresión 3D. La **primera fase** se enfoca en la adquisición, procesamiento y visualización de datos provenientes de las impresoras 3D, que ayuden a tomar decisiones a los operarios y tener mayor control de un gran número de máquinas.

La **segunda fase**, se enfoca en la operación y control de las impresoras de forma remota, por parte del operario, siendo este el responsable de la toma de decisiones con base a la información obtenida en la primera fase, con comunicación bidireccional entre el sistema y las máquinas. La **tercera fase** se enfoca en la autogestión del sistema, integrando inteligencia artificial para el desarrollo del proceso productivo, con base a la información y el sistema establecido en las dos primeras fases. De esta manera el operario ejerce actividades de supervisión del sistema y actividades físicas, externas al sistema.

Por último, la **cuarta fase**, se enfoca en la integración de sistemas ciberfísicos que se encarguen de las actividades complementarias y hagan la granja completamente inteligente, capaz de autogestionarse en su totalidad. Cabe resaltar que esta metodología contempla, únicamente el proceso de fabricación y desconoce procesos previos o posteriores en el funcionamiento de la granja de impresión 3D.

**Figura 11.** Estructura modular de la metodología.



*Nota: Esta figura representa la estructura modular de la metodología, lo cual permite hacer implementaciones parciales en cada fase.*

## 4.1. FASE 1

Como se ha detallado anteriormente, una granja de impresión 3D, se basa en el modelo de automatización de la industria 3.0, fabricando piezas de forma automatizada, pero poco eficiente en la gestión de la producción masiva. Por esta razón, la primera fase de la metodología, busca otorgar información al encargado de la gestión para facilitar el proceso.

El objetivo de esta fase es obtener mediante sensores toda la información posible de las impresoras 3D y procesarla para ser visualizada, por lo tanto, se subdivide en tres categorías, (i) **sensores y datos**, (ii) **comunicación**, (iii) **procesamiento y visualización**, basadas en 3 capas de IoT (i) **Capa de adquisición de datos**, (ii) **Capa de red** y (iii) **Capa de servicio** (Salama, Elkaseer, Saied, Ali, & Scholz, 2018, Septiembre), en las cuales profundizaremos a continuación.

### 4.1.1. Sensores y datos

Es importante destacar que, dentro de la tecnología de impresión 3D FDM existen varios tipos y modelos, por lo que cambia la información que se puede obtener de ellas a través de los sensores incorporados de fábrica. De tal manera, el primer paso en esta fase es estandarizar la información requerida para la transformación de una granja 3.0 de impresión 3D a 4.0.

A continuación, se especifican algunos de los datos que se pueden obtener de los diversos tipos de impresoras 3D, algunos de estos datos son proporcionados inicialmente por las impresoras gracias a los sensores incorporados de fábrica, pero otros son datos adicionales, los cuales requieren la implementación de sistemas externos.

#### 4.1.1.1. Temperatura de la cama

Como se observó anteriormente, la mayoría de impresoras incorporan cama caliente y su temperatura se determina dependiendo del material que se vaya a imprimir, asegurando la adherencia de la pieza a la cama. Este dato se obtiene del sensor que la impresora trae de fábrica, que suele ser un termistor NTC. Sin embargo, se pueden encontrar otro tipo de sensores. El firmware de cada impresora incorpora los datos de calibración para obtener el valor de la temperatura (Douglas, 2021), siendo este el proceso que se utilizará. La obtención de este dato en el sistema es obligatoria, siempre y cuando la impresora cuente con cama caliente de fábrica.

#### 4.1.1.2. Temperatura del Hotend

Al igual que el parámetro anterior, vienen dados según el material que se utilice en el proceso de impresión. Lo importante en este apartado, es garantizar que la temperatura se mantenga constante durante el proceso y no tenga variaciones que afecten la calidad de la pieza (Lepoivre, Boyard, Levy, & Sobotka, 2020). El proceso para obtener el valor de la temperatura es igual que el de la cama, el *firmware* de la máquina obtiene el valor de un sensor regularmente NTC y contrasta estos valores con los datos de calibración, solo que las temperaturas alcanzadas son mayores, ya que en este punto se busca la fusión de los materiales (Douglas, 2021).

#### 4.1.1.3. Final de filamento

En la actualidad la mayoría de las impresoras 3D FDM cuentan con sensor final de filamento, encargado de detectar la presencia de material para impresión y detener el proceso de fabricación si este se agota. Son sensores final de carrera (*endstop*), y tienen dos estados, activos o no, según la configuración normalmente abierta (NA) o normalmente cerrada (NC) del circuito del sensor. Con ello, se realiza la configuración del *firmware*, para tomar las medidas requeridas (3DWork, 2020).

#### 4.1.1.4. Velocidad del ventilador de capa

Este valor se ingresa en el *G-Code* de cada pieza, según sus requerimientos, dado que dependiendo del material es necesario enfriarlo al salir de la boquilla para evitar deformaciones de la pieza por sobrecalentamiento, pero en ciertos casos este enfriamiento se debe realizar de forma gradual para evitar deformaciones (filament2print, 2020). El valor de la velocidad del ventilador de capa, no se obtiene mediante sensores, sino de lo estipulado en el código, sin embargo, el correcto funcionamiento del mismo se puede evaluar de forma adicional con una cámara térmica para el material depositado por el extrusor (MoviTHERM, 2017).

#### 4.1.1.5. Posición inicial (*Home*)

Esta posición funciona como un punto de origen en un espacio cartesiano, las impresoras 3D requieren un dato para identificar desde donde parten todos los movimientos del efector final y evitar golpes con la estructura (RepRap.org, 2015). En la mayoría de las impresoras se utilizan sensores finales de carrera mecánicos, siendo estos los más económicos. Sin embargo, son también frecuentes los finales de carrera ópticos y magnéticos, en los topes de

los ejes en los que se mueve el efector final o en la cama si tiene movimiento (O'Connell, 2020).

#### 4.1.1.6. Posición del efector final

Las impresoras 3D cartesianas, delta y polares asumen la ubicación del efector final gracias a las órdenes dadas por el G-Code. Sin embargo, la mayoría no cuentan con un sistema para evaluar que efectivamente se encuentra en la posición esperada, debido a que son motores paso a paso o servomotores los encargados del movimiento, y pueden perder pasos debido a varios factores como, (i) poca tensión de las bandas, deterioro de los usillos o los sistemas que transmiten los movimientos, (ii) resistencia al movimiento, por choques con las piezas o agentes externos, superficies de desplazamiento rugosas por deterioro del material, suciedad o mala lubricación, sistemas de rodamientos defectuosos, , (iii) motores imperfectos o de mala calidad, (iv) problemas con los controladores o *drivers* de motores, debido a fallas permanentes del dispositivo, errores en la calibración o fallas por sobrecalentamiento (elecfreaks, 2014).

En el caso de las impresoras 3D de brazo robótico, cuenta con sensores para conocer el grado de giro de cada articulación. De esta manera, calculan la posición del efector final y no es necesario calcular una posición de inicio, por lo cual es un sistema más flexible, pero con algunas limitaciones, como el hecho de que la libertad en los movimientos, complica la creación de estándares en el proceso. Cabe resaltar que es una tecnología en desarrollo y con mucho potencial (Kauppila, 2021). Los sensores más utilizados en este sistema, suelen ser *encoder* de efecto optoeléctrico o efecto electromagnético en los motores o unidades de medición inercial (IMU por sus siglas en inglés) como giroscopios en los eslabones (Wang, et al., 2020), teniendo como referencia este sistema puede ser aplicado a otros tipos de impresoras 3D FDM.

#### 4.1.1.7. Nivelación de la cama

Es fundamental para que la pieza se adhiera al soporte e inicie la impresión correctamente. El proceso de nivelación de la cama se puede hacer de forma manual, ajustando su posición o la altura del cabezal (z-offset) en el firmware. Este proceso devenga mucho tiempo y carece de exactitud, además no contempla las deformaciones que con el tiempo se generan en la superficie de impresión. Otra manera de realizar este proceso es la nivelación automática de la cama (ABL por sus siglas en inglés) haciendo uso de sensores de efecto hall, inductivos, efector inteligente, infrarrojo, piezoeléctrico, entre otros, para realizar una malla de nivelación que garantiza la misma distancia entre la boquilla y la cama (O'Connell, 2021).

#### 4.1.1.8. Progreso de impresión

A medida que avanza la ejecución del código, la impresora informa el tiempo estimado para la finalización del proceso de fabricación. En algunos casos, el tiempo lo estima la impresora con base a las capas que faltan por imprimir. Por otro lado, el tiempo estimado se incorpora en el G-Code y lo calcula el laminador, lo cual suele ser más preciso gracias a que utiliza los parámetros de impresión para la estimación (Capel, 2016), este dato es importante para organizar la producción.

#### 4.1.1.9. Estado de la impresora

Este dato es intuitivo, consiste en conocer si la impresora se encuentra imprimiendo, pausada o inactiva.

#### 4.1.1.10. Cantidad de filamento

De la misma manera que funciona el cálculo del tiempo, los laminadores realizan una estimación de material requerido en un proceso de fabricación, este dato se debe almacenar y comparar con el material cargado, estimando el material disponible, también puede usarse un sensor de peso para calcular de forma certera el filamento consumido. Algunas impresoras, sobre todo las de gama alta cuentan con sistemas comunicación de campo cercano (NFC por sus siglas en inglés) para detectar el material que ha sido cargado, siempre y cuando sea de la misma marca y almacenan en el chip la cantidad de material consumido haciendo uso de sensores de flujo instalados en la máquina (Ultimaker, 2021).

#### 4.1.1.11. Reconocimiento del filamento

Como se explica anteriormente, si la impresora cuenta con sistemas de reconocimiento de filamento y consumo del mismo se debe transmitir esa información al sistema de gestión. De la misma forma, se puede incorporar un sistema en la granja de impresión 3D, que funcione de forma similar con cualquier marca de filamento, agregando al mismo etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID por sus siglas en inglés), NFC, código de respuesta rápida (QR por sus siglas en inglés) o códigos de barras.

#### 4.1.1.12. Flujo del Extrusor

El flujo es un parámetro establecido en la configuración del proceso de fabricación. Sin embargo, como se ha detallado en apartados anteriores, es posible corroborar mediante sensores que el dato esperado y real concuerdan. En este caso se pueden utilizar sensores de flujo de material, sensores de efecto hall o cámaras. Los dos últimos permiten además

Metodología para la transformación de

evaluar la correcta deposición del material en la pieza y detectar fallos en la impresión (Aidala, Eichenberger, Chan, Wilkinson, & Okwudire, 2022), pero hacen parte de fases posteriores.

#### 4.1.1.13. Temperatura de los *Drivers* y electrónica

En la electrónica de las impresoras existen muchos componentes que generan calor, entre ellos los *drivers* de motores, los ventiladores ayudan a disipar el calor y proteger los componentes. Regularmente se conectan directamente a la fuente de la impresora. Por esta razón se prenden a su máxima potencia si la impresora se encuentra encendida (HTA3D, 2022). Como se expuso en el apartado de posición del efector final, una de las razones en la pérdida de pasos es el sobrecalentamiento de los *drivers* de motores (Posadas, 2015). De esta manera, para procesos de fabricación prolongados se puede incorporar sensores de temperatura y evitar fallas.

#### 4.1.1.14. Temperatura del Hotend en la zona de disipación

El disipador del Hotend tiene la función de liberar el calor para proteger los elementos de la impresora y evitar la deformación del filamento fuera de la boquilla. Para realizar la transferencia de calor se ubica un ventilador en el disipador, este dato se puede obtener con sensores de temperatura (García, 2016).

#### 4.1.1.15. Vibración

Las vibraciones generadas por los movimientos de la impresora afectan la calidad de las piezas fabricadas (Marchante, Este algoritmo reduce la vibración de tu impresora 3D FDM sin afectar a la velocidad, 2022). Para tomar acciones correctivas se puede obtener el valor de las vibraciones con unidades de medición inercial (IMU).

#### 4.1.1.16. Temperatura ambiental

La temperatura ambiente afecta el proceso de fabricación, siendo muy importante refrigerar el material extruido para evitar que se deforme. Con temperaturas ambientales elevadas, superiores a 30 grados centígrados (Tridi, 2020), el proceso se dificulta. Por el contrario, con temperaturas ambientales muy bajas el material se enfría muy rápido, causando dificultades en la adherencia entre capas, contracciones del material, y otras causas que afectan a la calidad de la pieza (filament2print, 2017).

Si la impresora cuenta con habitáculo, es importante para mantener temperaturas adecuada para la impresión dependiendo del material utilizado en el proceso de fabricación.

**Tabla 2.** Datos de impresoras FDM: cartesiana, polar, delta y brazo robótico.

Dato	Sensores	Estado			
		Cartesiana	Polar	Delta	Brazo Robótico
<b>Temperatura de la cama</b>	- Termistor NTC - Termistor PTC - Transductor termopar (termocupla) - Sensor de temperatura digital	S	S	S	N
<b>Temperatura del Hotend</b>	- Termistor NTC - Termistor PTC - Transductor termopar (termocupla) - Sensor de temperatura digital	S	S	S	S
<b>Final de filamento</b>	- Sensor final de carrera mecánico ( <i>mechanical endstop</i> ) - Sensor final de carrera óptico ( <i>optical endstop</i> )	S	S	S	S
<b>Velocidad del ventilador de capa</b>	- Para la velocidad del ventilador es el valor estipulado en el G-Code. - Para inspeccionar el correcto funcionamiento del ventilador de capa se puede utilizar una cámara térmica (Opcional).	S	S	S	S
<b>Posición inicial (Home)</b>	- Sensor final de carrera mecánico ( <i>mechanical endstop</i> ) - Sensor final de carrera óptico ( <i>optical endstop</i> ) - Sensor final de carrera inductivo - Sensor final de carrera magnético de efecto hall	S	S	S	S
<b>Posición del efector final</b>	- En el caso de las impresoras cartesianas, delta y polares, este dato se obtiene de las órdenes del G-Code, pero no tienen relevancia en la gestión. - Encoder optoelectrónico. - Encoder electromagnético. - Sensor IMU.	N	N	N	S
<b>Nivelación de la cama</b>	- Sensor de efecto hall - Sensor inductivo - Efector inteligente - Sensor infrarrojo - Sensor piezoeléctrico	S	S	S	S
<b>Progreso de impresión</b>	- Este dato se obtiene del G-Code.	S	S	S	S
<b>Estado de la impresora</b>	- El sistema debe informar el estado.	S	S	S	S
<b>Cantidad de filamento</b>	- El sistema debe informar el material consumido en un proceso de fabricación. - Sensor de peso - Sensor de flujo - Sistema NFC - Sistema RFID - Sistema de códigos QR. - Sistema de código de barras	S	S	S	S
<b>Reconocimiento del filamento</b>	- Sistema NFC - Sistema RFID - Sistema de códigos QR. - Sistema de código de barras	N	N	N	N
<b>Flujo del Extrusor</b>	- Sensor de efecto hall - Sensor de flujo - Cámara	S	S	S	S
<b>Temperatura de los Drivers y electrónica</b>	- Termistor NTC - Termistor PTC - Transductor termopar (termocupla) - Sensor de temperatura digital	N	N	N	N
<b>Temperatura del Hotend en la zona de disipación</b>	- Termistor NTC - Termistor PTC - Transductor termopar (termocupla) - Sensor de temperatura digital	N	N	N	N
<b>Vibración</b>	- Sensor IMU.	N	N	N	N/A
<b>Temperatura ambiental</b>	- Termistor NTC - Termistor PTC - Transductor termopar (termocupla) - Sensor de temperatura digital	N	N	N	N

*Nota: Esta tabla muestra los datos que se pueden obtener de los diferentes tipos de impresoras, con el estado S: si es necesario obtener el dato, N: si no es necesario y N/A: si no aplica.*

Metodología para la transformación de

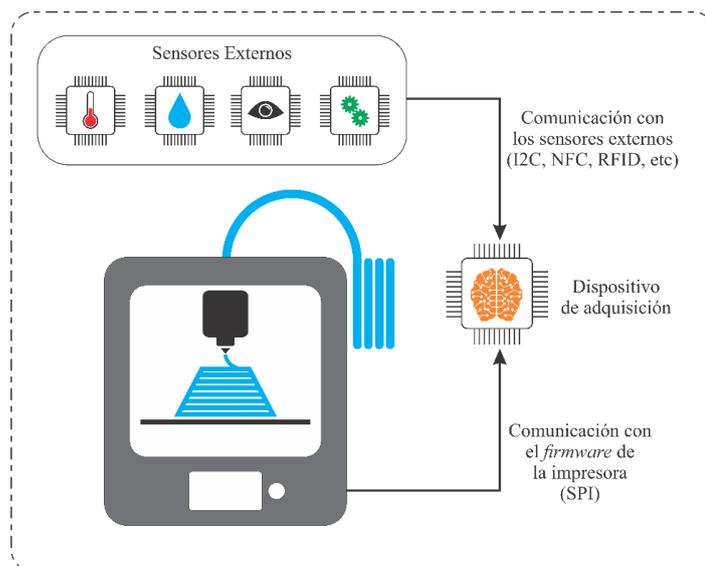
granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

De la tabla anterior se evidencia la cantidad de datos que se pueden obtener de una impresora 3D, haciendo necesario contar con un sistema de gestión cuando son elevados los números de impresoras que se deben supervisar.

Cabe aclarar que la obligatoriedad de obtener un dato no implica que este se debe conocer mediante la implementación de sensores, cada granja de impresoras es libre de explorar la tecnología más adecuada según los requerimientos de su sistema, de la misma manera la implementación de gran cantidad de sensores ayuda a controlar cada aspecto del proceso de fabricación, pero se debe analizar si se acopla a las necesidades y la relación de costo beneficio.

Dentro de una implementación IoT, cada impresora 3D se establece como un nodo, de tal manera que se debe asignar un dispositivo encargado de recopilar los datos anteriormente descritos, implementando diversos protocolos de comunicación según sea el caso. Por ejemplo, para obtener los datos del *firmware* se puede implementar una comunicación sincrónica de los dispositivos mediante Interfaz Periférica Serial (SPI por sus siglas en inglés) (Salama, Elkaseer, Saied, Ali, & Scholz, 2018, Septiembre). Sin embargo, para los datos obtenidos de sensores externos al sistema de fábrica, dependerá del sensor. Por ejemplo, los sensores IMU utilizan un protocolo serial específico de circuito inter-integrado (I2C por sus siglas en inglés) (Ferrer Calatayud, 2015), la comunicación NFC, RFID, entre otras, además de los dispositivos conectados directamente de forma digital o analógica.

**Figura 12.** *Arquitectura de integración.*



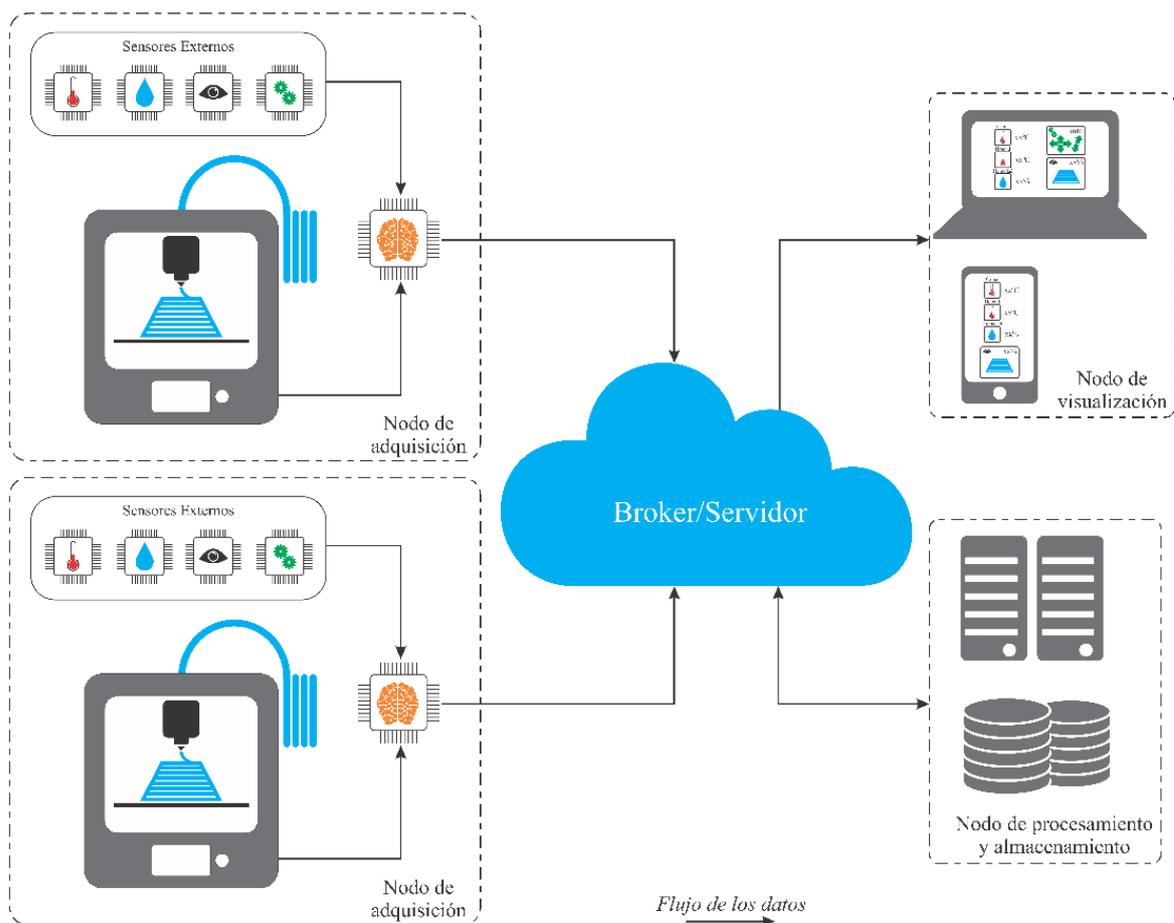
*Nota: Esta figura muestra la integración de los dispositivos con cada impresora de la granja.*

#### 4.1.2. Comunicación

Una vez establecidos los sensores, datos necesarios en el sistema y protocolos para recopilar la información en un dispositivo que actúa como nodo representativo de cada impresora, se procede a la comunicación entre nodos, contemplada en la segunda capa del IoT.

La comunicación en esta metodología se establece entre cuatro nodos. El primero es el desarrollado en el paso anterior, llamado nodo de adquisición. Se encarga de obtener los datos requeridos por el sistema, implementando varios protocolos de comunicación según la necesidad y tratarlos para ser transmitidos, conforme a las especificaciones de cada dato. Dado que a este nodo llega solo la información proveniente de una impresora, pero esta información puede ser muy diversa, se considera que está compuesto de subnodos de adquisición.

**Figura 13.** *Arquitectura de la comunicación.*



*Nota: Esta figura muestra arquitectura de comunicación a implementar en la primera fase con una sola dirección en el flujo de los datos (desde el nodo de adquisición al de visualización).*

El segundo nodo, es el encargado de la interacción entre el humano y la máquina, en él se alojan las aplicaciones de visualización de datos, en el cual profundizaremos en el tercer paso de la primera fase. El tercer nodo, es un sistema o aplicación, encargado de almacenar y procesar la información obtenida en la nube, sirviendo, además, de respaldo del sistema, en caso de pérdidas de conexión a internet. El cuarto nodo, se denomina *Broker* o servidor, es el encargado de distribuir la información entre los nodos, siendo un intermediario en el sistema IoT, en la primera fase de esta metodología, recopila la información de cada nodo de adquisición y la distribuye a los demás nodos (Salama, Elkaseer, Saied, Ali, & Scholz, 2018, Septiembre).

#### 4.1.2.1. Protocolo de acceso a la red

Para el acceso de los nodos a la red, se recomienda conexiones de forma inalámbrica, dado que un sistema cableado es poco escalable debido a los puertos disponibles y complejidad que supone la implementación de varios cables en una granja para conectar todos los nodos. Por otro lado, para las conexiones inalámbricas se recomienda implementar WI-FI, dado que algunas impresoras traen de fábrica la opción de conectarse a la red usando puertos USB, Ethernet y WI-FI. Por ende, esta última es la más adaptable y versátil para el sistema.

#### 4.1.2.2. Protocolo de transmisión

Para la conexión entre nodos, se establece el protocolo de comunicación que soporte todo el sistema, este ejerce como un conjunto de reglas y normas para que dos o más dispositivos transmitan entre si información, lo cual es conocido como comunicación máquina a máquina (Machine to Machine M2M por sus siglas en ingles) (Barbara IoT, 2021). Para la implementación en soluciones IoT, existen varios protocolos de comunicación como MQTT, CoAP, AMQP y HTTP. En este documento, se detallan las características principales de cada uno y se recomienda analizar el protocolo que más se adapte a las necesidades específicas de cada granja de impresión 3D.

**Figura 14.** *Protocolos principales IoT.*

Capas de TCP/IP	Protocolos IoT
Aplicación	CoAP, MQTT, HTTP, AMQP, Otros
Transporte	TCP, UDP, UDP
Internet	TCP, 6LoWPAN, RPL
Red	IEEE 802.15.4, IEEE 802.11/b/g/n/ac/ad/ah/ax, IEEE 802.3 Ethernet, GSM, LPWAN, LTE

*Nota: Esta figura muestra los principales protocolos de comunicación IoT por cada capa de la arquitectura TCP/IP. Reproducida de Mishra & Kertesz, 2020.*

- **MQTT**

Protocolo de transporte de telemetría de Message Queue Server, es un protocolo de comunicación bidireccional, basado en mensajería de publicación y suscripción. Puede funcionar en redes poco estables o de ancho de banda reducido, garantizando una entrega confiable con bajo consumo de energía. Es un protocolo fácil de implementar establecido por tres componentes, editor o productor, *bróker* y *consumidor* o *suscriptor* (Mishra & Kertesz, 2020).

- **CoAP**

Protocolo de aplicación restringida, es un protocolo con enfoque cliente/servidor, en el cual se publica la información recopilada, un cliente puede acceder a ella realizando solicitudes con comandos "GET" y enviar información utilizando comandos de actuación y control "PUT" y "POST". Sigue un enfoque de transferencia de estado representacional (RES por sus siglas en inglés), además, incorpora un enfoque cliente/bróker, en el cual el cliente se puede suscribir

a conjuntos de recursos, para recibir actualizaciones sobre sus estaos (Coetzee, Oosthuizen, & Mkhize, 2018).

- **AMQP**

Protocolo Avanzado de Cola de Mensajes, Es un protocolo de comunicación ligero que al igual que CoAP, soporta arquitectura de publicación/suscripción y solicitud/respuesta, en las cuales se soportan colas de mensajería fiables, publicaciones y suscripciones de temas, enrutamiento y transacciones flexibles (Naik, 2017).

- **HTTP**

Protocolo de transporte de hipertexto. Es un protocolo de mensajería web, admite arquitectura de solicitud/respuesta basado en enfoque RES, y utiliza un identificador de recursos universal (URI por sus siglas en inglés) para el conjunto de recursos, con el cual el cliente los puede obtener (Naik, 2017).

**Tabla 3. Comparativa principales protocolos IoT**

Crterios	MQTT	CoAP	AMQP	HTTP
1. Año	1999	2010	2003	1997
2. Arquitectura	Cliente/Broker	Cliente/Servidor o Cliente/Broker	Cliente/Broker o Cliente/Servidor	Cliente/Servidor
3. Abstracción	Publicación/Suscripción	Solicitud/Respuesta o Publicación/Suscripción	Publicación/Suscripción o Solicitud/Respuesta	Solicitud/Respuesta
4. Tamaño de encabezado	2 Bytes	4 Bytes	8 Bytes	Indefinido
5. Tamaño del mensaje	Pequeño e indefinido (hasta 256MB)	Pequeño e indefinido (normalmente pequeño, para caber en datagrama IP único)	Negociable e indefinido	Grande e indefinido (depende del servidor web o la tecnología de programación)
6. Semántica / Métodos	Conectar, desconectar, publicar, suscribir, darse de baja, cerrar	Obtener, publicar, poner, eliminar	Consumir, entregar, publicar, obtener, seleccionar, reconocer, eliminar, nack, recuperar, rechazar, abrir, cerrar	Obtener, publicar, encabezar, poner, parche, opciones, conectar, borrar
7. Cache y proxy parcial	Soporte	Si	Si	Si
8. Calidad del servicio (QoS) y fiabilidad	QoS 0: A lo sumo una vez (dispara y olvida) QoS 1: Al menos una vez QoS 2: Exactamente una vez	Mensaje confirmable (similar a QoS 0) o mensaje no confirmable (similar a QoS 1)	Formato de liquidación (similar a QoS 0) o formato inquietante (similar a QoS 1)	Limitado (a través protocolo de transporte – TCP)
9. Normas	OASIS, Funciones Eclipse	IETF, Fundación Eclipse	OASIS, ISO/IEC	IETF y W3C
10. Protocolo de transporte	TCP (MQTT-SN puede usar UDP)	UDP, SCTP	TCP, SCTP	TCP
11. Seguridad	TLS/SSL	DLTS, IPSec	TLS/SSL, IPSec, SASL	TLS/SSL
12. Puerto predeterminado	1883/8883 (TLS/SSL)	5683 (Puerto UDP) / 5684 (DLTS)	5671 (TLS/SSL), 5672	80/443 (TLS/SSL)
13. Formato de codificación	Binario	Binario	Binario	Texto
14. Modelo de licencias	Código abierto	Código abierto	Código abierto	Libre
15. Apoyo organizacional	IBM, Facebook, Eurotech, Cisco, Red Hat, Software AG, Tibco, ITSO, M2Mi, Amazon Web Services (AWS), InduSoft, Fiorano	Large Web Community Support, Cisco, Contiki, Erika, IoTivity	Microsoft, JP Morgan, Bank of America, Barclays, Goldman Sachs, Credit Suisse	Global Web Protocol Standard

*Nota: Esta tabla muestra una comparativa de los principales protocolos de comunicación IoT adaptada de Naik, 2017.*

Metodología para la transformación de

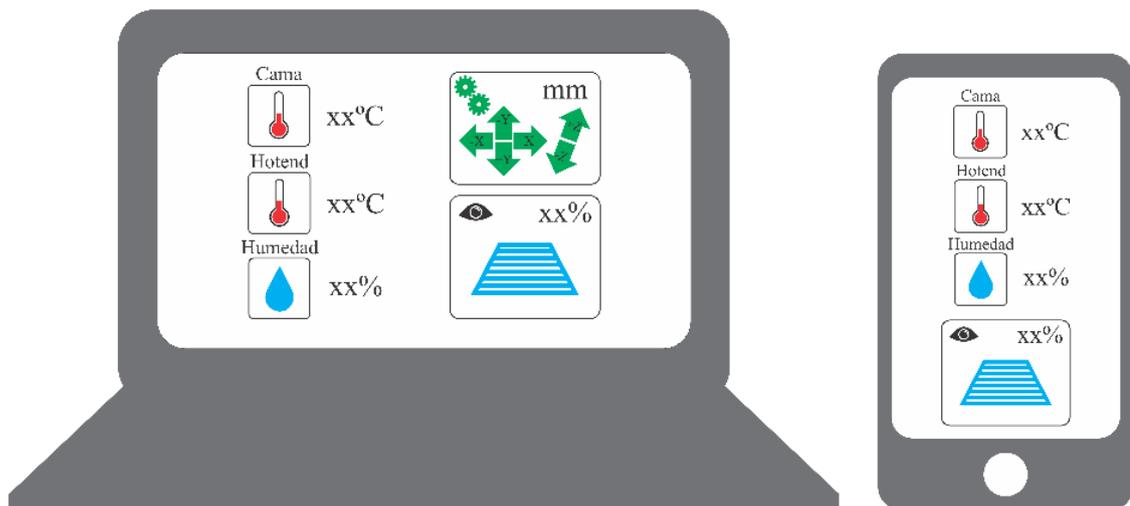
granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

### 4.1.3. Procesamiento y visualización

Este paso de la primera fase está enfocado en el desarrollo e implementación del nodo encargado de la interacción entre el humano y las máquinas, para visualizar los datos de cada una. Conforme al protocolo de comunicación establecido en el paso anterior, este nodo debe solicitar o suscribirse a los datos de todos los nodos de adquisición. Para ello, es importante destacar que algunos datos deben ser visualizados en tiempo real, como las temperaturas, humedades, posiciones, entre otros. Sin embargo, otros datos solo son relevantes cuando cambian de estado, tales como el estado de la impresora, el final de filamento, entre otros.

Se requiere de un panel de control o *Dashboard* que permita visualizar y analizar los datos mediante de forma gráficas, accesible desde diferentes tipos de dispositivos, para lo cual puede ser programada o implementada como una API (Ortiz, 2021). El *Dashboard* debe ofrecer dos tipos de visualizaciones. Por un lado, una visualización general de la granja de impresoras y, por otro lado, la visualización de cada impresora con los detalles de cada dato obtenido.

**Figura 15.** Wireframe del Dashboard.

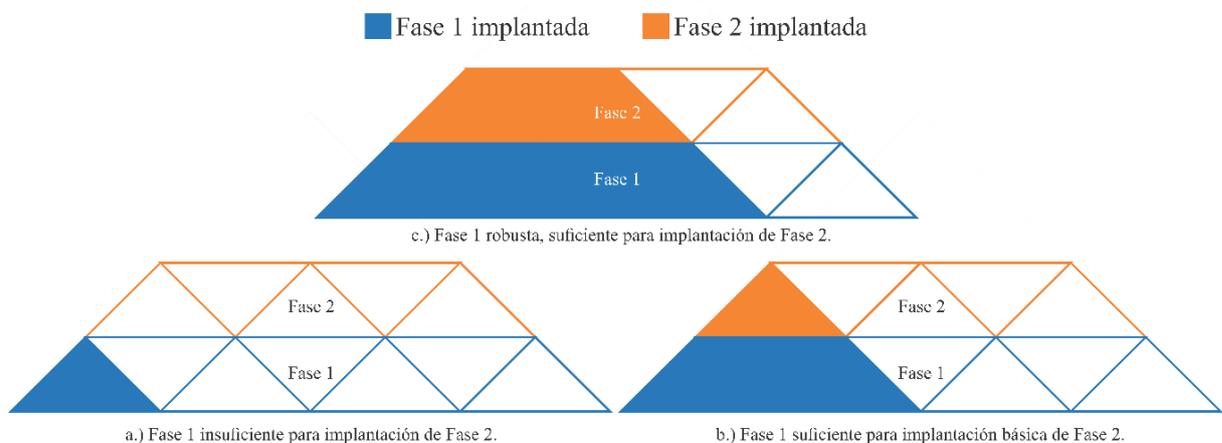


*Nota: Esta figura muestra una representación de las herramientas de visualización del Dashboard.*

## 4.2. FASE 2

Al ser una metodología secuencial, la implementación de la fase dos, solo es posible sobre los parámetros establecidos en la fase uno, sin embargo, al contar con propiedades modulares, no es necesario hacer una implementación al ciento por ciento de la fase uno, pero entre más robusta y mejor implantada, ofrece mayor soporte para la implementación de la fase 2.

**Figura 16.** Implantación de Fase 2.

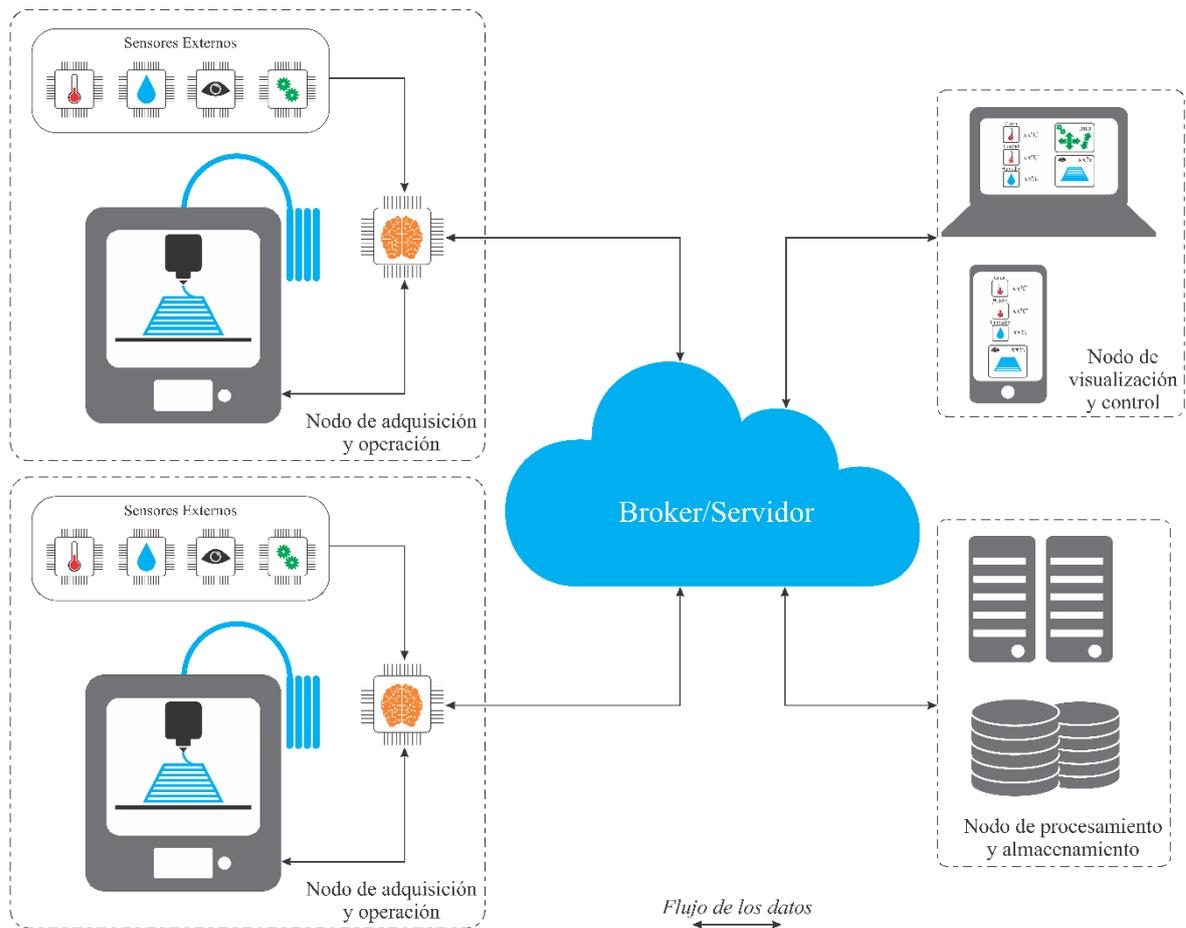


*Nota: Esta figura muestra las posibilidades para la implementación de la fase 2.*

Esta fase, hace uso del sistema implementado en la fase anterior, soportada en la comunicación bidireccional, permitiendo el control de las impresoras 3D de forma remota, por lo cual el *Dashboard* pasa de ser un nodo exclusivamente para la visualización de la información, a ser un nodo que también transmite o publica información según el protocolo de comunicación establecido.

La gran mayoría de las impresoras en la actualidad cuentan con pantallas, para la visualización de los datos durante el proceso de fabricación y perillas o botones físicos o táctiles, para el control y manipulación de la máquina. El apartado de la visualización se resuelve en la fase uno, sin embargo, para la manipulación y control de cada impresora, es necesario intervenir el *firmware* de cada una, para obtener las instrucciones a ejecutar en cada máquina, desde el *Dashboard*, a través del nodo de adquisición haciendo uso de la comunicación serial establecida entre la placa base y el nodo de adquisición.

**Figura 17. Arquitectura Fase 2**



*Nota: Esta figura muestra arquitectura a implementar en la segunda fase con doble dirección en el flujo de los datos (desde el nodo de adquisición y operación al de visualización y control).*

Con una implantación total de la fase dos se debe lograr:

- Enviar el G-Code desde el *Dashboard*.
- Iniciar, pausar, cancelar y reanudar un proceso de fabricación de forma remota.
- Controlar los valores de temperatura de la cama y el *Hotend* desde el *Dashboard*.
- Controlar los valores de flujo de impresión de forma remota.
- Controlar las velocidades de impresión desde el *Dashboard*.
- Realizar movimientos de cada eje o articulación de la impresora.
- Extruir material de forma remota.
- Regular la velocidad de los ventiladores desde el *Dashboard*.

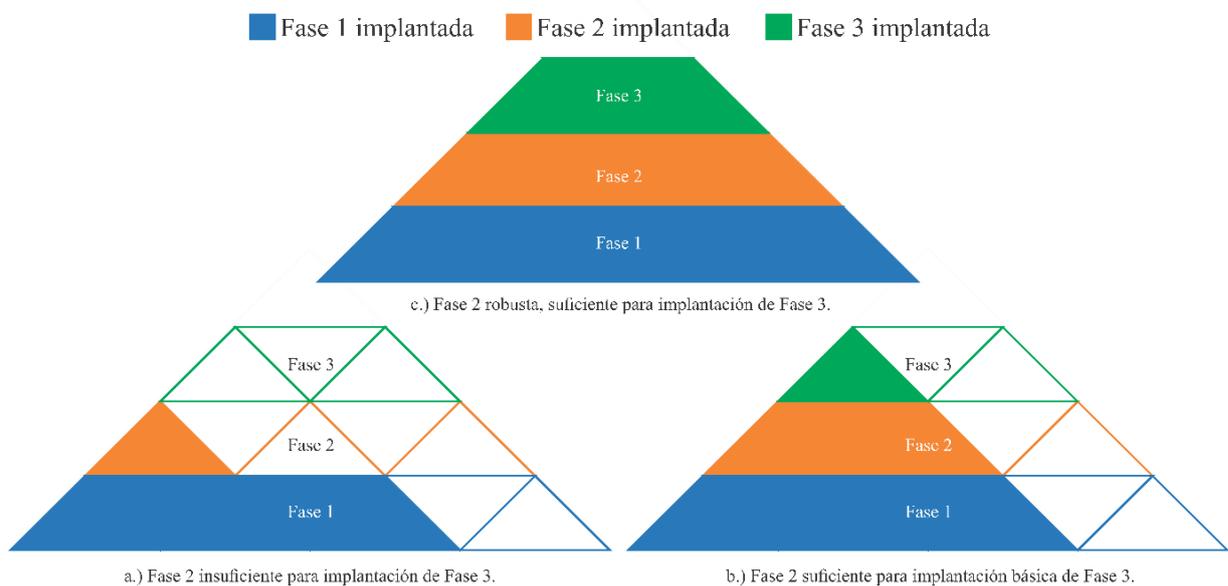
Metodología para la transformación de  
granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

- Iniciar un proceso de calibración de forma remota, si la impresora cuenta con el sistema.

### 4.3. FASE 3

En este punto de la metodología, el procesamiento de la información obtenida se convierte en algo vital. La primera fase, está enfocada en la visualización, tal y como funciona la pantalla de cada impresora, por ende, no es necesario realizar un procesamiento avanzado de la misma, es el operario el encargado de analizarla, donde la ventaja se encuentra en concentración de la información de varias impresoras en un dispositivo para su visualización. La tercera fase se enfoca en la implementación de un sistema capaz de tomar decisiones automáticas (**inteligencia artificial**) conforme a la información obtenida en la primera fase e intervenir en el proceso de fabricación haciendo uso del sistema desarrollado en la segunda fase, por ende, es necesario contar con un sistema robusto como base.

**Figura 18.** Implementación Fase 3.



*Nota: Esta figura muestra las posibilidades para la implementación de la fase 3.*

El procesamiento de la información en esta fase tiene dos propósitos generales. En primer lugar, tomar decisiones enfocadas específicamente a cada proceso de fabricación, es decir,

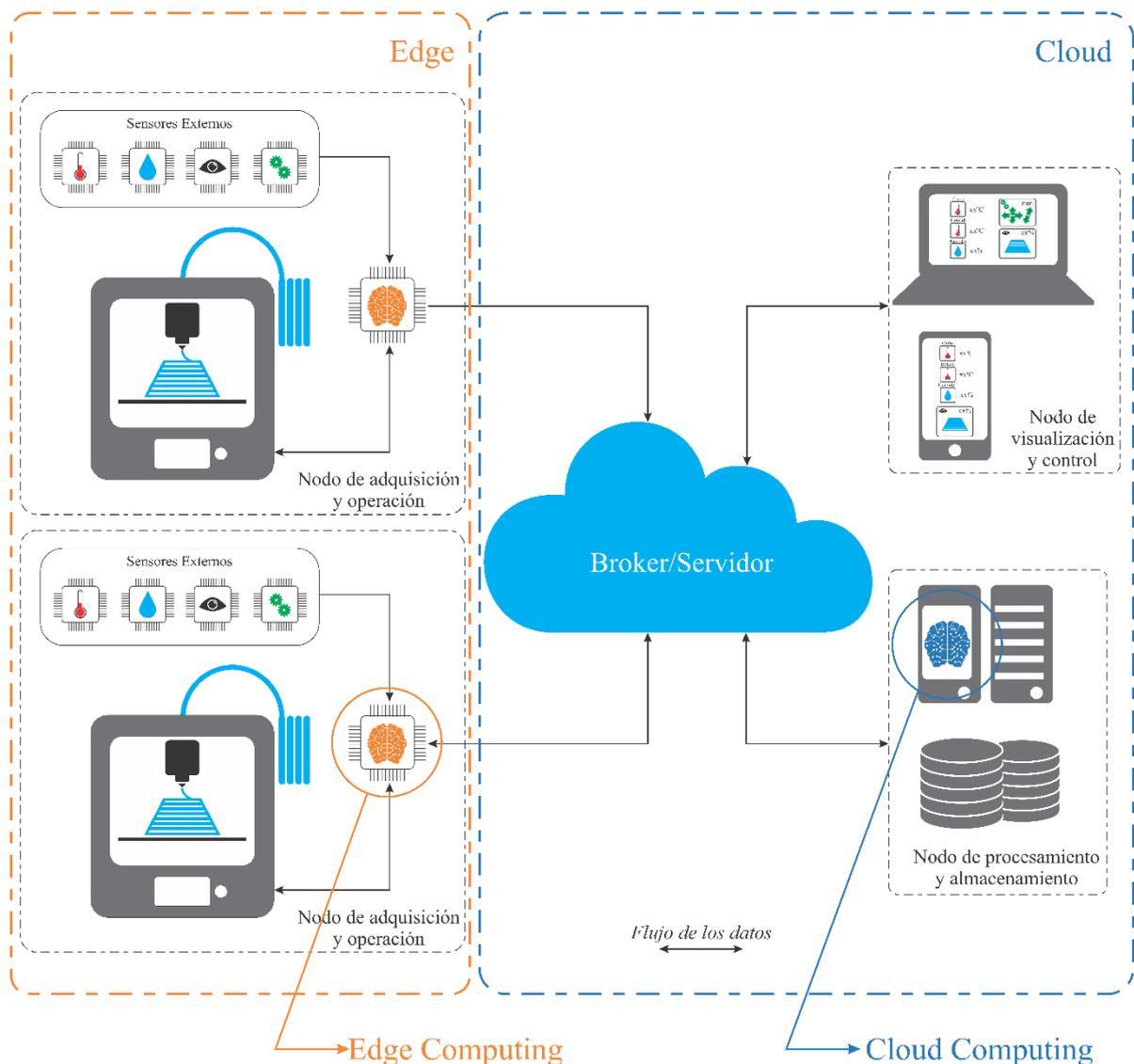
analizar si el desempeño de una impresora es adecuado y la fabricación se está ejecutando de la manera esperada. Por otro lado, tomar decisiones sobre toda la granja, analizando la participación de cada impresora en el desempeño general del proceso de fabricación. Los enfoques descritos anteriormente, marcan el lugar del sistema implementado, encargado de desarrollar el procesamiento.

El procesamiento de la información general de la granja de impresoras 3D, requiere una mayor capacidad de cómputo, sobre todo a medida que aumentan máquinas en el sistema de paralelización, ya que recibe más datos de cada una de ellas, por esta razón, el procesamiento se debe realizar de forma centralizada, haciendo uso del poder de cómputo en la nube (**Cloud Computing**), lo cual supone un incremento de la latencia, pero esto no afecta el proceso de fabricación, ya que el enfoque está direccionado a la gestión de la granja, sin embargo, es posible implementar funciones enfocadas en el proceso de fabricación, gestionadas de forma centralizada, si el procesamiento de la información supera las capacidades de cómputo de los dispositivos en el borde de la red, siempre y cuando el aumento de latencia no afecte directamente el resultado de la fabricación.

El procesamiento de la información general de la granja de impresoras 3D, requiere una mayor capacidad de cómputo, sobre todo a medida que aumentan máquinas en el sistema de paralelización, ya que recibe más datos de cada una de ellas, por esta razón, el procesamiento se debe realizar de forma centralizada, haciendo uso del poder de cómputo en la nube (**Cloud Computing**), lo cual supone un incremento de la latencia, pero esto no afecta el proceso de fabricación, ya que el enfoque está direccionado a la gestión de la granja.

En su mayoría, las respuestas del sistema, ante eventos o anomalías de un proceso de fabricación, deben ser inmediatas o en tiempo real, por esta razón, el procesamiento se debe implementar en el borde de la red (**Edge Computing**) utilizando el poder de cómputo del microcontrolador o microprocesador de los dispositivos integrados en el nodo de adquisición, asegurando una baja latencia. Sin embargo, es posible implementar funciones enfocadas en el proceso de fabricación, gestionadas de forma centralizada, si el procesamiento de la información supera las capacidades de cómputo de los dispositivos en el borde de la red, siempre y cuando el aumento de latencia no afecte directamente el resultado de la fabricación.

**Figura 19.** Diagrama del procesamiento.



*Nota: Esta figura representa el Edge y el Cloud en la implementación, y el lugar de procesamiento respectivo.*

#### 4.4. FASE 4

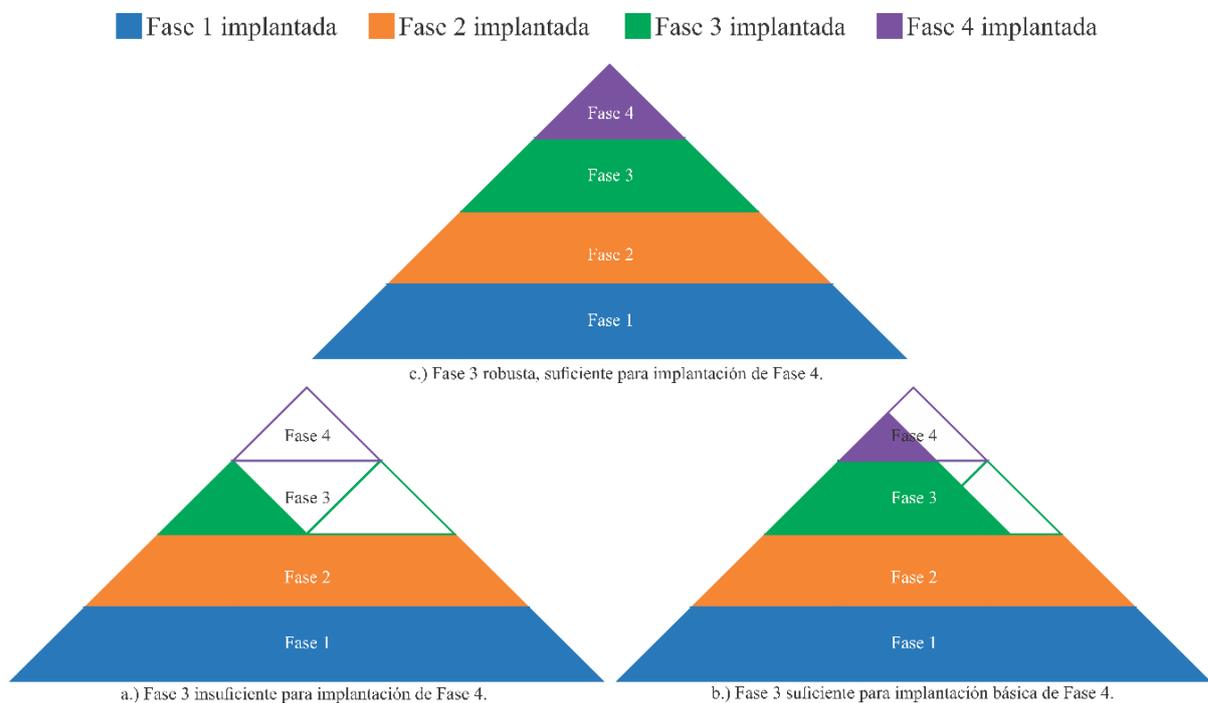
En las fases anteriores, se implementa un sistema que ayuda a la gestión y control de una granja de impresoras, pero esta aún necesita una gran intervención humana. Por ejemplo, limpiar la base de impresión y, sobre todo, retirar las piezas terminadas o fallidas, para continuar con el proceso de fabricación. Por esta razón, se generan tiempos muertos en la producción, sobre todo cuando los operarios no se encuentran físicamente o deben ejecutar

Metodología para la transformación de  
granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

estas actividades en varias impresoras a la vez. Esta fase se enfoca en la implementación de **sistemas ciberfísicos**, que ayuden al desarrollo de estas actividades y otorguen mayor autonomía al proceso de producción, basando su funcionamiento en la estructura desarrollada en las fases anteriores.

En este apartado, se describen algunas alternativas existentes en el mercado, que cumplen con el objetivo de esta fase. Sin embargo, la implementación de cada una depende de las necesidades y requerimientos de la granja de impresión 3D.

**Figura 20.** Implementación fase 4.



*Nota: Esta figura muestra las posibilidades para la implementación de la fase 4.*

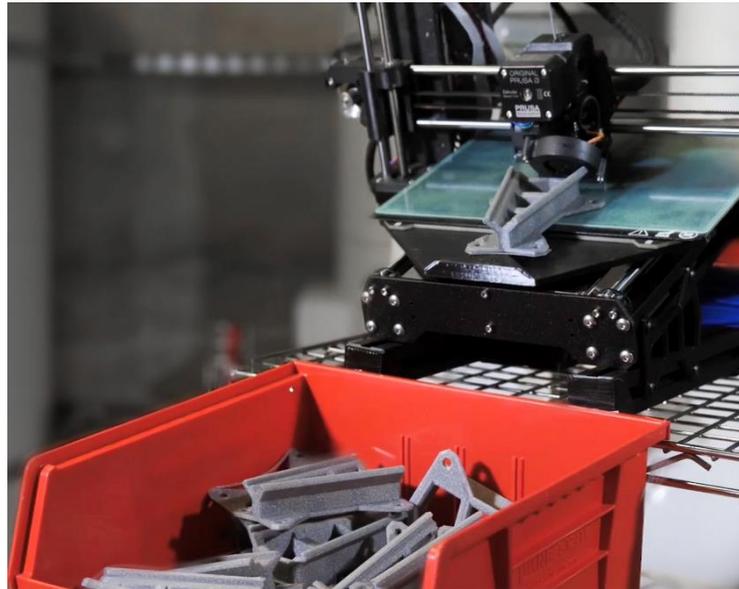
#### 4.4.1. Adaptación de impresora 3D

Esta primera opción no requiere la implementación de sistemas adicionales, siendo la opción más sencilla. Consiste en ubicar cada impresora 3D inclinada sobre una base adaptada, de tal manera que, al finalizar la fabricación, es el cabezal de la impresora el encargado de empujar la pieza. El sistema utiliza el propio movimiento de la impresora, fuera de la base de impresión, la cual, por efecto de gravedad cae en un contenedor, actualmente la empresa canadiense **3DQue**, ofrece el servicio para adaptar esta solución a varias impresoras 3D, a nivel de *hardware* y *software* (3DQue, 2021).

Metodología para la transformación de

granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

**Figura 21.** Adaptación de la impresora.



*Nota: Esta figura muestra la adaptación desarrollada por 3DQue. Reproducida de 3DQue, 2021*

Para que el cabezal pueda retirar la pieza de la base de impresión, es indispensable que la cama se halla enfriado como se muestra en la figura 22, en la cual, la empresa **3D** que ejemplifica la fuerza requerida para despegar una pieza cuando la cama está caliente y fría. Sin embargo, la adherencia de la pieza depende de muchos factores, por lo cual se recomienda realizar un estudio previo a la implementación según los materiales utilizados en la granja de impresoras.

**Figura 22.** Test de adherencia de las piezas.



*Nota: Esta figura muestra una comparativa de la fuerza requerida para despegar una pieza de la cama de impresión caliente y fría. Adaptada de 3DQue, 2022  
(<https://www.youtube.com/watch?v=N65Is1ZMIIg>).*

Otro aspecto a tener en cuenta en esta solución es que durante todo el proceso de fabricación la impresora se encuentra inclinada, lo cual no es recomendable, sobre todo en piezas de gran altura. Además, el laminador asume que la impresora, se ubica en una superficie horizontal, lo cual puede afectar la interpretación del mismo en la generación de soportes. Por estas razones se recomienda contemplar estos factores en la implementación y realizar un estudio exhaustivo sobre la incidencia de los mismos en la calidad de las piezas. Por otro lado, se propone complementar esta solución, adaptando un sistema adicional que permita desarrollar el proceso de fabricación de forma horizontal, conforme a los parámetros recomendados por los fabricantes de las impresoras, e inclinarlas una vez terminen con el proceso de fabricación para retirar las piezas. En la figura 23, se muestra una granja de impresoras 3D, que implementa este sistema.

**Figura 23.** Granja de impresoras 3D adaptadas.



*Nota: Esta figura muestra una granja de impresoras 3D, adaptadas con la solución de 3DQue.  
Adaptada de 3DQue, 2022 ([https://www.youtube.com/watch?v=BHzjnt\\_FFf0](https://www.youtube.com/watch?v=BHzjnt_FFf0)).*

#### **4.4.2. Sistema cartesiano**

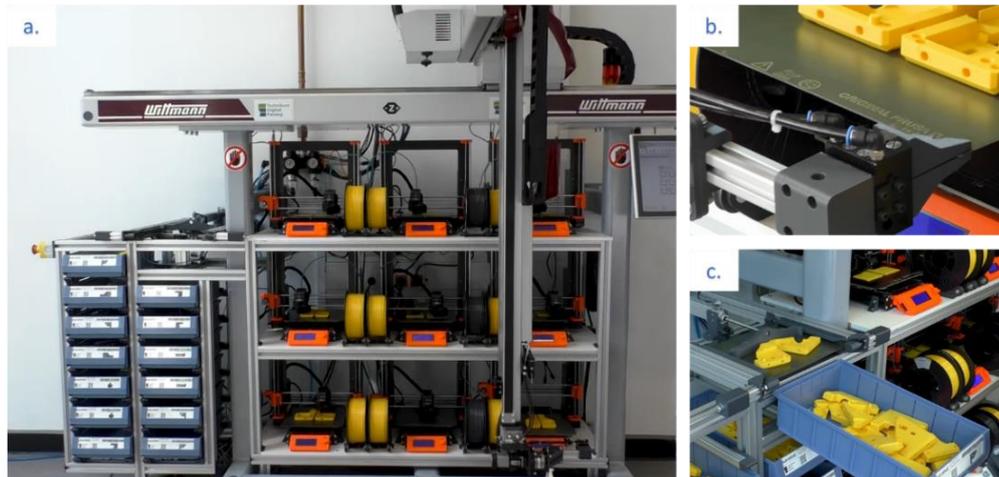
El sistema cartesiano consiste en el movimiento de un efector final en 3 ejes, de esta manera cada impresora de la granja se ubica en una repisa, de esta manera el efector final se mueve en el eje X y en el eje Z para ubicar cada máquina. Por último, se mueve horizontalmente sobre el eje Y para retirar la base de impresión cuando el proceso ha finalizado. En la figura

Metodología para la transformación de

granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

24 se muestra el desarrollo del sistema cartesiano, realizado en la Universidad de Ciencias Aplicadas Technikum Wien, dentro de un contexto de industria 4.0 con fines académicos, llamado “Fábrica digital” (Markl & Lackner, 2019).

**Figura 24.** *Fabrica digital de la Universidad de Ciencias Aplicadas Technikum.*

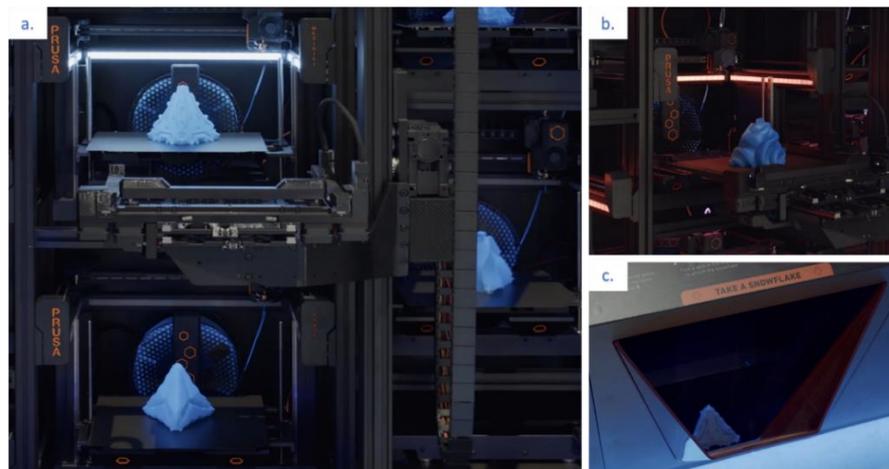


*Nota: Esta figura muestra el funcionamiento del sistema encargado de retirar las piezas terminadas en la “fábrica digital”. Adaptada de la Universidad de Ciencias Aplicadas Technikum (<https://www.youtube.com/watch?v=EK57AHT1Xqk>).*

En la figura a, se visualiza como el robot ubica el efector final en la impresora que finalizo el proceso, en la figura b, retira la base de impresión y la transporta a un sistema adicional que se encarga de despegar las piezas y depositarlas en un contenedor, (véase figura c).

De forma similar, funciona el sistema desarrollado por Prusa, denominado Sistema de Granja Autónoma, en el cual, la finalidad es retirar la base de impresión como se muestra en la figura 24. Cabe señalar que ambos sistemas manejan un estándar de impresoras. Por lo cual el efector final se acopla específicamente al tamaño de la base de impresión, limitando su aplicación a contextos específicos. De esta manera, es indispensable en el desarrollo de sistemas similares, que el efector final sea adaptativo.

**Figura 25.** Sistema Prusa AFS.



*Nota: Esta figura muestra el funcionamiento del sistema Prusa AFS. Adaptada de (<https://www.youtube.com/watch?v=uLMRAC2zJJA>).*

#### 4.4.3. Brazo robótico

Los brazos robóticos son ampliamente utilizados en la industria para ejecutar con mucha precisión acciones repetitivas y disminuir la intervención humana en determinados procesos. Es de esta manera que la empresa **Voodoo manufacturing**, desarrollo el proyecto **Skywalker**, en el cual se implementa un brazo robótico **UR10** de **Universal Robots**, encargado de retirar las bases de impresión de máquinas ubicadas en estanterías dentro de su espacio de trabajo, ubicando sobre una cinta transportadora cada base y ubicando una nueva en la máquina para reanudar el proceso, lo cual le permite funcionar 24/7 y maximizar la eficiencia del proceso de fabricación (Molitch-Hou, 2017).

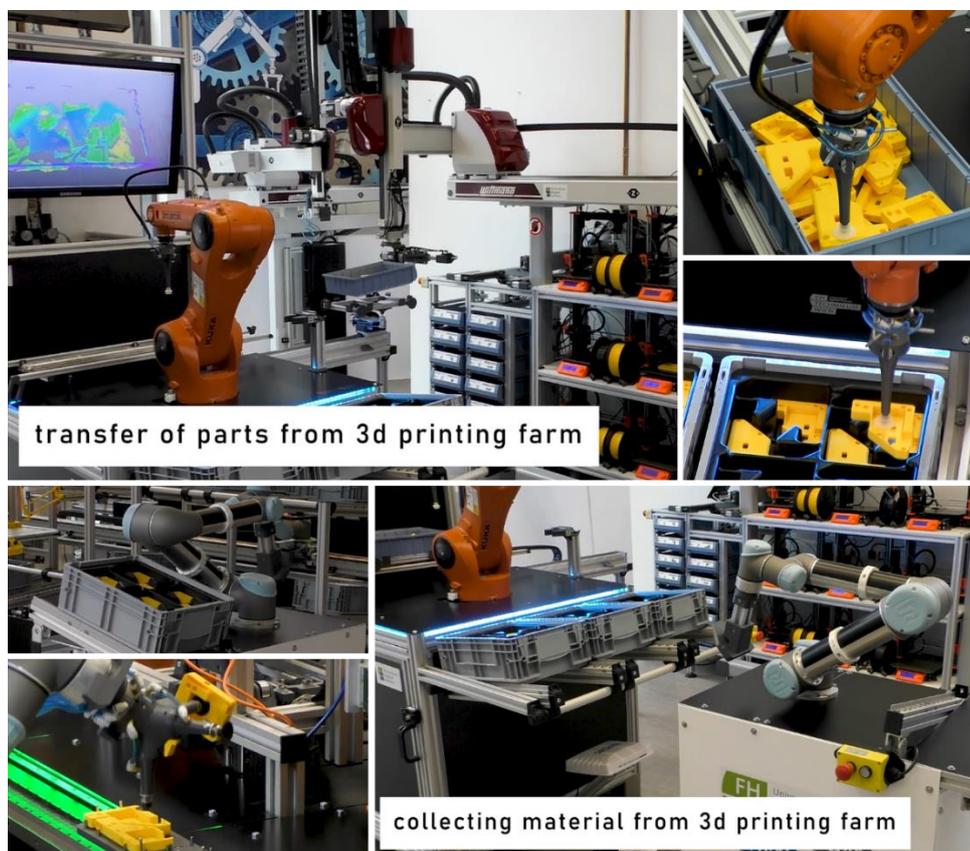
**Figura 26.** Proyecto Skywalker.



*Nota: Esta figura muestra el funcionamiento del proyecto Skywalker. Adaptada de Molitch-Hou, 2017.*

La ventaja que ofrece la implementación de un brazo robótico, es la adaptabilidad y versatilidad, para desarrollar diversas funciones, por lo cual una implementación de este tipo debe explorar diversas aplicaciones, para sacar el máximo provecho. La “Fabrica digital” de la Universidad de Ciencias Aplicadas Technikum Wien, vista anteriormente, implementa además brazos robóticos y otros sistemas ciberfísicos en procesos adicionales, como la clasificación, distribución y empaquetado de las piezas fabricadas (Markl & Lackner, 2019). Sin embargo, no hace parte del objeto de estudio en este proyecto, pero permite visualizar la complejidad que se puede alcanzar en el proceso de producción.

**Figura 27.** *Fabrica digital, implementación de brazos robóticos.*

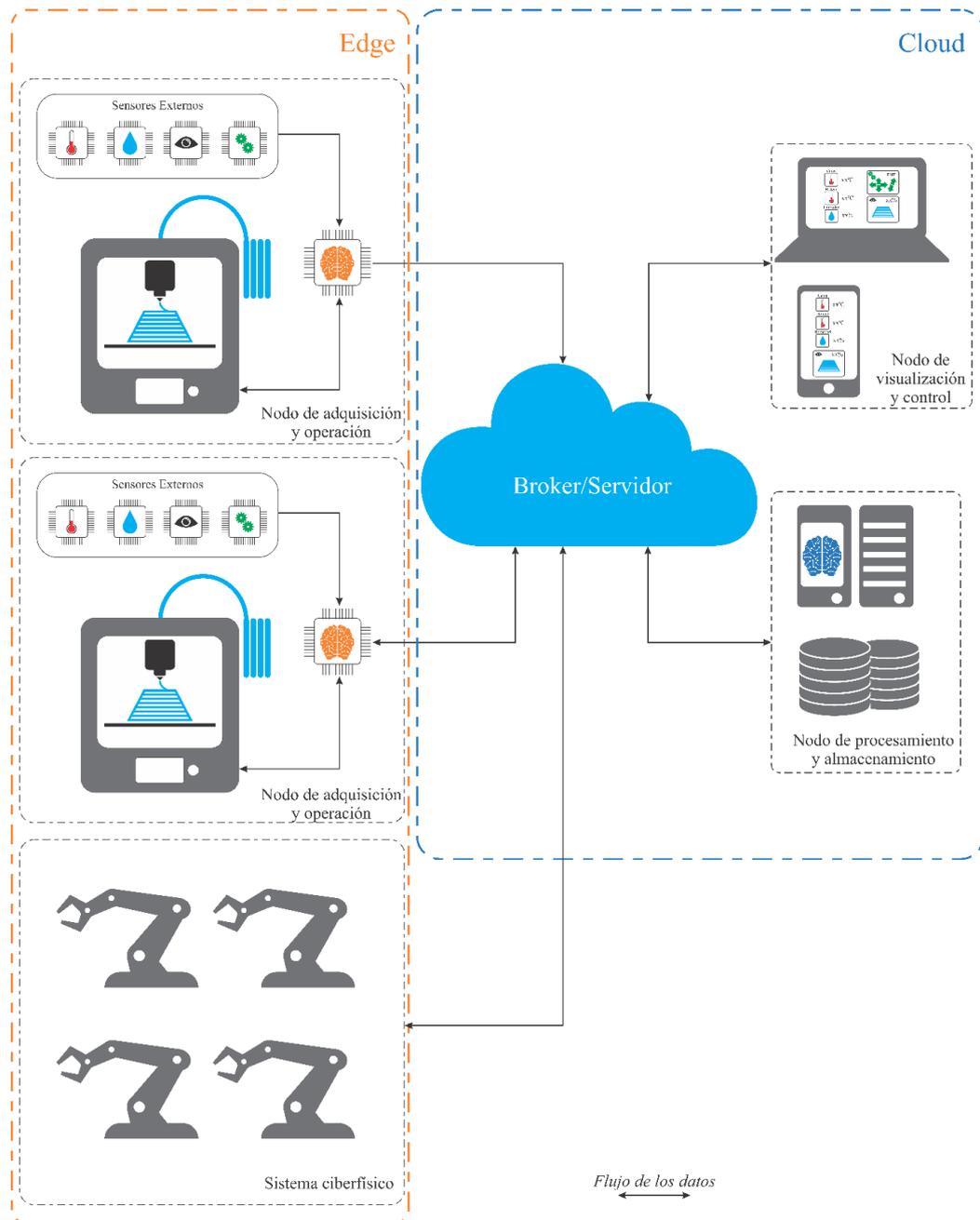


*Nota: Esta figura muestra el funcionamiento la “fábrica digital”. Adaptada de la Universidad de Ciencias Aplicadas Technikum  
(<https://www.youtube.com/channel/UCXVvk0lgui7bSh3m4hakdBvg/videos>).*

Cada fase de la metodología, requiere una inversión que se correlaciona con el impacto de la misma en el proceso productivo. Además, a medida que se avanza en la ejecución, aumenta el grado de complejidad. Sin embargo, al ser una metodología modular, permite una Metodología para la transformación de

planificación de los tiempos y recursos, de esta manera el objetivo es alcanzar las cuatro fases y no una implementación parcial, ya que, cada una otorga beneficios, pero el mayor provecho se alcanza en la última fase, en la figura 28 se observa el esquema de implementación total de esta metodología.

**Figura 28.** Esquema de implementación de la cuarta fase.



*Nota: Esta figura muestra arquitectura a implementar en la cuarta fase con la integración de los sistemas ciberfísicos.*

## 5. Conclusiones y trabajos futuros

Tal como se describió en la **introducción** de este documento, la problemática de las granjas de impresión 3D, radica en la gestión del proceso de producción. Por este motivo, y como fue mencionado, el objetivo general fue, desarrollar una metodología para la transformación de granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0, recolectando información de tecnologías existentes en la industria 4.0 aplicables, que disminuya la intervención humana y facilite su gestión. De tal manera, a juicio personal, esta metodología marca un camino a seguir para las granjas de impresión 3D que deseen realizar una transformación digital en el marco de la industria 4.0, con una implementación adaptativa y organizada, demostrando el cumplimiento del objetivo general.

Con base a la metodología desarrollada en este trabajo de investigación, se concluye, que una granja 4.0 de impresión 3D, es aquella que ha implementado satisfactoriamente las cuatro fases descritas, adaptando diversas tecnologías según las necesidades particulares.

Para alcanzar este objetivo se realizó un exhaustivo análisis de las necesidades de las granjas 3.0 de impresión 3D, para la transformación a 4.0 en el apartado de **contextualización del estado del arte**, conforme a lo estipulado en el primer objetivo específico. Continuando en el apartado **desarrollo específico de la contribución**, con la determinación de las tecnologías existentes que permiten llevar a cabo dicha transformación conforme a la definición de la metodología, dando cumplimiento al segundo y tercer objetivo específico.

### 5.1.1. “Líneas de trabajo futuras”

Al ser un proyecto de investigación, este trabajo busca ser una guía para el desarrollo futuro de proyectos de transformación digital en granjas de impresión 3D, basados en la metodología desarrollada, de igual manera, relacionada con la motivación para realizar este TFM, se pretende realizar una implementación de esta metodología en un trabajo investigativo futuro, de la mano con estudio doctoral.

Teniendo en cuenta la complejidad relacionada con la implementación, es posible que los desarrollos futuros no se enfoquen en la implementación de la totalidad de las fases, por último, realizamos el planteamiento de algunos proyectos que se pueden derivar de este trabajo.

- Integración de un sistema para la visualización de variables del proceso de fabricación en una granja de impresoras 3D.
- Desarrollo de un sistema de control a distancia para una granja de impresoras 3D.

Metodología para la transformación de  
granjas 3.0 de impresión 3D a 4.0

- Control dinámico de la posición del efector final en una impresora 3D.
- Mantenimiento predictivo de una granja de impresoras 3D.
- Desarrollo de un sistema de control del proceso de fabricación en una granja de impresión 3D.
- Desarrollo de un sistema de gestión de una granja de impresoras 3D.
- Implementación de un sistema ciberfísico para el control de una granja de impresoras 3D.
- Desarrollo de un sistema de visión artificial para la detección de errores en el proceso de impresión 3D.
- **Implementación de la metodología para la transformación de una granja 3.0 de impresión 3D a 4.0.**

## 6. Referencias bibliográficas

- 3D Technology Ltd. (2022). *3D Technology Ltd.* Obtenido de <https://3dtechnology.ie/3d-sprint/>
- 3DNeworld. (2018). *3DNeworld.* Obtenido de <https://3dneworld.com/cura-connect-una-nueva-solucion-de-administracion-de-impresoras-3d/>
- 3DQue. (2021). *What Is Quinly?* Obtenido de <https://www.3dque.com/quinly>
- 3DWork. (24 de Octubre de 2020). *Añadiendo sensor de filamento en electrónicas SKR (MINI E3, v1.3, v1.4 y v1.4 Turbo).* Obtenido de <https://3dwork.io/sensor-de-filamento/>
- Aidala, S., Eichenberger, Z., Chan, N., Wilkinson, K., & Okwudire, C. (2022). MTouch: an automatic fault detection system for desktop FFF 3D. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120:8211–8224.
- Barbara IoT. (29 de Abril de 2021). *Protocolos de comunicación en IoT que deberías conocer.* Obtenido de [https://barbaraiot.com/blog/protocolos-iot-que-deberias-conocer/#:~:text=%E2%80%93En%20la%20comunicaci%C3%B3n%20de%20dispositivos,MQTT%20\(MQ%20Telemetry%20Transport\)](https://barbaraiot.com/blog/protocolos-iot-que-deberias-conocer/#:~:text=%E2%80%93En%20la%20comunicaci%C3%B3n%20de%20dispositivos,MQTT%20(MQ%20Telemetry%20Transport))
- bizintek Ingeniería y Diseño de Productos. (18 de julio de 2019). *bizintek Ingeniería y Diseño de Productos.* Obtenido de <https://bizintek.es/sistemas-ciberfisicos-y-robotica-colaborativa-las-claves-para-una-industria-digital-y-segura/>
- Cao, K., Liu, Y., Meng, G., & Sun, Q. (2020). An Overview on Edge Computing Research. *IEEE access*, 8, 85714-85728.
- Capel, C. (21 de Diciembre de 2016). *El tiempo en el cura no es el mismo que muestra en la pantalla de mi Ultimaker.* Obtenido de <https://community.ultimaker.com/topic/16365-el-tiempo-en-el-cura-no-es-el-mismo-que-muestra-en-la-pantalla-de-mi-ultimaker/>
- ccyclone. (15 de septiembre de 2015). *Foro ¿Firmware Marlin en Makerbot Replicator?* Obtenido de <https://www.hubs.com/talk/t/marlin-firmware-on-makerbot-replicator/2606>
- Choudhari, C. M., & Patil, V. D. (2013, september). Product development and its comparative analysis by SLA, SLS and FDM rapid prototyping processes. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (págs. Vol. 149, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.
- Ciurana, J. d., Serenó, L., & È. V. (2013). Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing . *Procedia Cirp*, 5, 152-157.

- Coetzee, L., Oosthuizen, D., & Mkhize, B. (Mayo de 2018). An Analysis of CoAP as Transport in an. In *2018 IST-Africa Week Conference (IST-Africa)* (pág. 1). IEEE.
- Contreras, L. (23 de Julio de 2018). *3dnatives*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/porque-la-impresion-3d-230720182/#!>
- Contreras, L. (23 de Octubre de 2020). *3D natives el sitio web de la impresion 3D*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/>
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554.
- Douglas, K. (4 de Agosto de 2021). *3D Printer Thermistor: All You Need to Know*. Obtenido de <https://all3dp.com/2/3d-printer-thermistor/>
- elecfreaks. (12 de Junio de 2014). *El registro de la impresora 3D 2: pérdidas de pasos*. Obtenido de <https://www.elecfreaks.com/blog/post/the-3d-printer-record-2.html>
- Ferrer Calatayud, D. (2015). Adquisición de datos IMU. (*Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Valencia*).
- filament2print. (23 de Agosto de 2017). *Consejos para la impresión 3D: Durante la impresión*. Obtenido de [https://filament2print.com/es/blog/27\\_consejos-durante-impresion-3D.html#:~:text=Por%20esto%2C%20la%20impresora%203D,directamente%20en%20la%20impresora%203D.](https://filament2print.com/es/blog/27_consejos-durante-impresion-3D.html#:~:text=Por%20esto%2C%20la%20impresora%203D,directamente%20en%20la%20impresora%203D.)
- filament2print. (29 de Enero de 2020). *The importance of the layer fan*. Obtenido de [https://filament2print.com/gb/blog/76\\_importance-layer-fan.html](https://filament2print.com/gb/blog/76_importance-layer-fan.html)
- Formlabs. (2020). *Formlabs*. Obtenido de <https://support.formlabs.com/s/article/What-is-Dashboard?language=es>
- Foro Ultimaker Comunidad de Expertos en Impresion 3D. (19 de octubre de 2019). *Foro Ultimaker Comunidad de Expertos en Impresion 3D*. Obtenido de <https://community.ultimaker.com/topic/26013-ultimaker-3-gcode-commands-list/>
- García, V. P. (2016). *Estudio del comportamiento térmico del disipador de calor de un extrusor de impresora 3D*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- GRABCAD PRINT. (2022 ). *GRABCAD PRINT*. Obtenido de <https://grabcad.com/es/print>
- Gushchin, I. A., Martynovich, I. V., & Torubarov, I. S. (March 2019). Automatic print job scheduling and management over multiple 3D printers. *International Conference on Industrial Engineering* (págs. 477-487). Cham: Springer.

- Hozdić, E. (2015). Smart factory for industry 4.0: A review. 7(1), 28-35.
- HTA3D. (25 de Enero de 2022). *La importancia de los ventiladores en la impresión 3D - Tipos según su función, flujo de aire, tamaño y movimiento*. Obtenido de <https://www.hta3d.com/es/blog/la-importancia-de-los-ventiladores-en-la-impresion-3d-tipos-segun-su-funcion-flujo-de-aire-tamano-y-movimiento>
- Impresoras3D.com. (1 de Octubre de 2021). *Impresoras3D.com EVERYTHING TO CREATE*. Obtenido de <https://www.impresoras3d.com/prusa-revoluciona-la-expo-de-dubai-con-su-nueva-granja-de-impresion-3d/#:~:text=El%20nuevo%20proyecto%20de%20Prusa,sistemas%20de%20recolecci%C3%B3n%20y%20entrega>.
- Juan José Camargo, J. F. (2015). Conociendo Big Data. *Revista Facultad de Ingeniería*.
- Kaupila, I. (7 de Mayo de 2021). *Robotic Arm 3D Printing – Platforms & Software*. Obtenido de <https://all3dp.com/1/robotic-arm-3d-printing-platforms-software/>
- Lepoivre, A., Boyard, N., Levy, A., & Sobotka, V. (2020). Heat transfer and adhesion study for the FFF additive manufacturing process. *Procedia manufacturing*, 47, 948-955.
- Mabkhot, M. M., Al-Ahmari, A. M., Salah, B., & Alkhalefah, H. (2018). Requirements of the smart factory system: A survey and perspective. *Machines*, 6(2), 23.
- Marchante, A. (26 de Agosto de 2020). *3D Natives*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/octoprint-aplicacion-control-impresora-210820202/>
- Marchante, A. (25 de Mayo de 2022). *Este algoritmo reduce la vibración de tu impresora 3D FDM sin afectar a la velocidad*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/algoritmo-vibracion-impresion-3d-fdm-250520222/#!>
- Markl, E., & Lackner, M. (2019). Industrial Engineering Management – THE key skill for the . *The International Journal of Engineering and Science*, 8(3), 08-22.
- Mejia, E. (19 de AGOSTO de 2021). *IDEA 1.61*. Obtenido de <https://idea161.org/2021/08/19/firmware-de-la-impresora-3d-que-elegir-y-como-cambiarlo/>
- Mishra, B., & Kertesz, A. (2020). The Use of MQTT in M2M and IoT. *IEEE Access*, 8, 201071-201086.
- Molitch-Hou, M. (8 de Agosto de 2017). *Voodoo Automates 3D Printing to Take on Injection Molding*. Obtenido de <https://www.engineering.com/story/voodoo-automates-3d-printing-to-take-on-injection-molding>

- MoviTHERM. (29 de Septiembre de 2017). *3D Printing and the Advantages of Thermal Monitoring*. Obtenido de <https://movitherm.com/knowledgebase/3d-printing-and-the-advantages-of-thermal-monitoring/>
- Murphy, M. J. (2015). *Springer Link*. Obtenido de [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18305-3\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18305-3_1)
- Naik, N. (Octubre de 2017). Choice of Effective Messaging Protocols for IoT. *In 2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE)* (págs. 1-7). IEEE.
- O'Connell, J. (28 de Julio de 2020). *Interruptor de final de carrera de impresora 3D vs final de carrera óptico*. Obtenido de <https://all3dp.com/2/3d-printer-endstop-switch-optical-endstop/>
- O'Connell, J. (24 de Diciembre de 2021). *The Best 3D Printer Auto-Bed Leveling Sensors of 2022*. Obtenido de <https://all3dp.com/2/best-3d-printer-auto-bed-leveling/>
- Octoprint. (2013). *Octoprint*. Obtenido de Octoprint.org: <https://octoprint.org/>
- Ortiz, D. (20 de Octubre de 2021). *¿Qué es un dashboard y para qué se usa?* Obtenido de <https://www.cyberclick.es/numerical-blog/que-es-un-dashboard>
- Posadas, S. U. (13 de Marzo de 2015). *Motores paso a paso en impresión 3D (III): Calibración de corriente*. Obtenido de <http://www.dima3d.com/motores-paso-a-paso-en-impresion-3d-iii-calibracion-de-corriente/>
- Prusa Research by Josef Prusa. (2022). *Prusa Research by Josef Prusa*. Obtenido de <https://afs.prusa3d.com/es/info/sobre-la-exposicion>
- Qian, L., Luo, Z., Du, Y., & Guo, L. (Diciembre de 2009). Cloud Computing: An Overview. *IEEE international conference on cloud computing* (págs. 626-631). Springer, Berlin: Heidelberg.
- Radaviciute, M. (2022). *3D Printing Farm Set-Up: Printers and Software*.
- RepRap.org. (16 de Mayo de 2015). *Endstop*. Obtenido de <https://reprap.org/wiki/Endstop>
- Richter, T., Watschke, H., Schumacher, F., & Vietor, T. (2018). Exploitation of potentials of additive manufacturing in ideation workshops. *In DS 89: Proceedings of The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC 2018)* (págs. 354-361). Bath, UK: University of Bath.
- Rodríguez, J. A. (2001). *Sistemas de prototipado rápido*. Universidad de Vigo, 3.

- Salama, M., Elkaseer, A., Saied, M., Ali, H., & Scholz, S. (2018, Septiembre). Industrial Internet of Things Solution for Real-Time Monitoring of the Additive Manufacturing Process. *International Conference on Information Systems Architecture and Technology* (págs. 355-365). Springer, Cham.
- Servitec3D. (15 de Febrero de 2021). *Servitec3D*. Obtenido de <https://servitec3d.com/blog/extrusor-impresora-3d/>
- Silvestre, J. S. (2017). *Internet de las cosas*. Republica Checa: Techpedia.
- Tecnologías información. (2018). *Tecnologías información*. Obtenido de <https://www.tecnologias-informacion.com/distribuidas.html>
- TintasyTonerCompatibles.es. (10 de septiembre de 2021). *TintasyTonerCompatibles.es*. Obtenido de [https://www.tintasytonercompatibles.es/blog/partes-de-la-impresora-3d/#\\_Las\\_partes\\_del\\_Sistema\\_de\\_Extrusion\\_de\\_una\\_impresora\\_3D](https://www.tintasytonercompatibles.es/blog/partes-de-la-impresora-3d/#_Las_partes_del_Sistema_de_Extrusion_de_una_impresora_3D)
- Tridi. (10 de Noviembre de 2020). *Estos son los Mayores Enemigos de la Impresión 3D*. Obtenido de <https://www.tridimx.com/blog/estos-son-los-mayores-enemigos-de-la-impresion-3d/>
- Ultimaker. (24 de Agosto de 2021). *Printing with Ultimaker materials on the Material Station*.
- Ultimaker. (2022). *Ultimaker Cura*. Obtenido de <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>
- Universidad Internacional de Valencia. (Mayo de 2019). *Universidad Internacional de Valencia*. Obtenido de <https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/fabricacion-aditiva-que-es-proceso-y-usos>
- Wang, Z., An, J., Nie, J., Luo, J., Shao, J., Jiang, T., . . . Wang, Z. L. (2020). A Self-Powered Angle Sensor at Nanoradian-Resolution . *Advanced Materials*, 32(32), 2001466.
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *International scholarly research notices*, Vol. 2012.
- Zahera, M. (2012). La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y el desarrollo de productos.
- Z-T, E. (2016). Impresion 3D la digitalizacion de la fabricacion. *Revista de Negocios del IEEM*.