



# *Manufactura en la nube móvil con sistemas ciber físicos aplicado en impresión 3D*

## **Derechos de autor**

David Alejandro Silva Ramírez

Todos los derechos reservados

*Laboratorio de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Inteligencia Artificial  
(LIDTIA)*

Prohibida su reproducción total o parcial,  
sin consentimiento expreso de LIDTIA

México MMXIX





# Universidad Autónoma de Zacatecas

## Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica

Laboratorio de Innovación y Desarrollo Tecnológico  
En Inteligencia Artificial (LIDTIA)

### *Manufactura en la nube móvil con sistemas ciber físicos aplicado en impresión 3D*



Que en cumplimiento parcial de los requisitos para obtener el grado de  
MAESTRO EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Presenta

**David Alejandro Silva Ramírez**

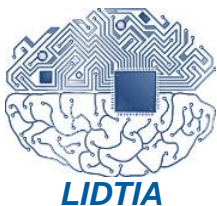
Directores de tesis

Dr. José Manuel Ortiz Rodríguez (UAZ - México)

Dra. Ma. Del Rosario Martínez Blanco (UAZ - México)

Dr. Luis Octavio Solís Sánchez (UAZ - México)

Zacatecas, Zac., México - Marzo de 2019





**Dra. Samantha Deciré Bernal Ayala.**  
**Departamento de Servicios Escolares.**  
**Presente.**

El suscrito **Dr. José Manuel Ortiz Rodríguez** docente de la Maestría en Ingeniería y Tecnología Aplicada, dependiente de la Universidad Autónoma de Zacatecas:

**DICTAMINA**

Que después de haber revisado la Tesis titulada **“Manufactura en la nube móvil con sistemas ciber-físicos aplicado en impresión 3D”** Presentada por el **C. David Alejandro Silva Ramírez**, egresado de este programa educativo con matrícula **27801598**, cumple con todos los requisitos que el reglamento de titulación de los posgrados exige para este tipo de trabajos, por lo que el mencionado egresado puede pasar a reproducirlo para presentar su Examen Profesional.

Se extiende la presente a solicitud del interesado, para los fines legales que a el mismo convenga, en la ciudad de Zacatecas, Zac. A los 27 días del mes de marzo del año dos mil diecinueve.

Asesor de Tesis  
**Dr. José Manuel Ortiz Rodríguez**



MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
Y TECNOLOGÍA APLICADA





*Manufactura en la nube móvil con sistemas ciber físicos  
aplicado en impresión 3D*

**Aprobada por el jurado:**

---

Dr. José Manuel Ortiz Rodríguez

---

Dra. Ma. Del Rosario Martínez Blanco

---

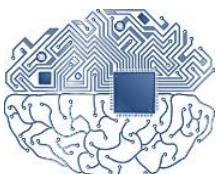
Dr. Luis Octavio Solís Sánchez

---

Dr. Héctor Alonso Guerrero Osuna

---

Dr. Héctor René Vega Carrillo



**LIDTIA**

## Dedicatoria

---

*Toda meta concluida comienza con un sueño, el sueño de salir adelante y superarse cada vez más conforme la vida avanza. Si algo se aprende en el camino es que nunca estamos solos y el apoyo y ayuda de otras personas nos empuja a salir adelante. Y es justamente por esto, que este documento, que es la representación de una meta más cumplida, está dedicada a todas aquellas personas en quienes siempre pude confiar y que gracias a su apoyo pude salir adelante: amigos, profesores, familiares, asesores, incluso a quienes dejaron este mundo terrenal, pero especialmente a mis padres quienes a pesar de ya han hecho suficiente por mí, jamás dejan de alentarme a que siga buscando sueños y que siga cumpliendo metas y se sienten orgullosos de ayudarme como sea para que pueda ver esos sueños cumplidos y esas metas alcanzadas, porque cada meta cumplida en mi vida es una meta que ellos toman como suya y me satisface saber que también lo hago por ellos. Porque a pesar de las dificultades nunca me han dejado a mi suerte, porque a pesar del cansancio siempre tienen tiempo para convivir conmigo, porque a pesar de los errores de hijo jamás me han reprochado nada, dedico desde lo más profundo de mi alma esta nueva meta alcanzada a mis padres, que por mucho que pasen los años y la vida se acorte, para ellos siempre seré su pequeño hijo.*

## Agradecimientos

---

“La raíz de todo bien reposa en la tierra de la gratitud” – Dalai Lama.

Por toda la ayuda brindada a lo largo de este camino, agradezco de todo corazón a mis padres por su incondicional apoyo y la atención que siempre me brindaron para que pudiera iniciar, avanzar y concluir esta nueva etapa de mi vida.

Agradezco también a mis profesores y asesores, pues debido a su apoyo, empeño y enseñanzas hoy puedo afirmar que mi visión del mundo ha cambiado y mi conocimiento ha incrementado.

Doy gracias a mis familiares que me brindaron apoyo y siempre estuvieron animándome a lo largo de todo este tiempo haciendo que me esforzara más cada día.

A mis amigos y compañeros con quienes siempre sabía que podía contar para resolver dudas y superar dificultades, les agradezco su esfuerzo y apoyo.

En general, agradezco a todas las personas que siempre me animaron a seguir adelante y querían verme triunfar, pero también a aquellas personas que decían que perdía mi tiempo y que no esperaban que lo lograra, pues eso me daba ánimos para superarme a mi mismo.

Y, por ultimo pero no menos importante, agradezco a Dios pues me permitió despertar cada día para lograr agregar una página más al libro de éxitos de mi vida y con ello saber que he caminado por el sendero correcto.

## Resumen

---

Desde su nacimiento en la Edad de Piedra, la industria ha sufrido cambios y ha evolucionado para brindar mejores y más eficientes métodos de fabricación, hasta llegar a la revolución industrial actual, la llamada Industria 4.0. Este nuevo fenómeno industrial trae consigo el uso de nuevas tecnologías cuyas características y objetivos buscan una cosa en común: la implementación de sistemas inteligentes. Entre estos sistemas se encuentra la fabricación digital, la cual tiene como objetivo la creación de objetos digitales en objetos físicos y viceversa, utilizando tecnologías de información y comunicación como pilares principales. Entre las tecnologías que entran en la categoría de la fabricación digital se encuentra la impresión 3D, éste es un método de fabricación aditiva que permite realizar objetos tridimensionales a partir de diseños digitales por medio de la adición de capas de material fundido. Esta tecnología, a pesar de ser relativamente nueva, se ha convertido en uno de los métodos de fabricación más utilizados hoy en día, debido a las ventajas que tiene en comparación con los métodos de fabricación sustractivos. Aun así, tiene algunos puntos débiles, entre los cuales se encuentra la necesidad de supervisar el proceso de impresión 3D de manera presencial, es decir, el usuario debe estar físicamente presente frente a la máquina supervisando el proceso de trabajo para actuar inmediatamente en caso de ocurrir algún inconveniente. Esto es especialmente difícil de realizar si las piezas por fabricar tienen una prolongación de tiempo de conclusión demasiado larga. Actualmente, existen dos métodos de impresión 3D tradicionales, en los cuales el problema anterior está presente. El primer método, es a través de la carga del archivo por imprimir a una memoria microSD, la cual se conecta directamente a la impresora 3D para poder realizar la pieza. El segundo, requiere de una computadora que tenga instalado un software de impresión 3D misma que se debe conectar directamente a la impresora



3D a través de un cable USB, siendo el principal inconveniente que la computadora no debe suspenderse, hibernarse o apagarse durante el proceso de impresión, pues en caso de que ocurra alguna de esas situaciones, el proceso será interrumpido. Cabe destacar que al igual que la supervisión, el control de las máquinas requiere que el usuario esté presente para poder manipular la impresora 3D o detener el proceso si alguna falla llegase a ocurrir. Es en base a estos detalles, que el objetivo de este trabajo es habilitar un sistema de manufactura en la nube móvil con sistemas ciber físicos aplicado en impresión 3D, con la finalidad de crear un ambiente de supervisión y control remotos. Para lograr lo anterior, se requirió el uso de ciertos elementos de software y hardware, tales como la plataforma de cómputo en la nube, una tarjeta electrónica que sirve como un sistema ciber físico, una cámara web que permite tener imagen en tiempo real del proceso y algunos sensores que actúan como fuentes de apoyo para incrementar la supervisión y el control de ciertos aspectos que afectan el proceso correcto de la impresión 3D, teniendo control sobre iluminación, flujo de filamento e incluso tener conocimiento de la humedad y temperatura que hay en el ambiente. Todo lo anterior conforma el sistema de impresión remoto que puede ser manipulado a través de dispositivos móviles, tales como un teléfono inteligente, una tablet o una computadora portátil. Los resultados obtenidos no solo muestran que el sistema es eficiente para ser utilizado, sino que además se destacan ciertas ventajas que tiene si se compara con los métodos de impresión 3D tradicionales, pues incluso el sistema está configurado para que, al concluir el proceso de fabricación, se notifique al usuario. El sistema incluso es mejor en términos de ahorro, tanto energético como económico.

Palabras clave: Impresión 3D, computación en la nube, dispositivos móviles.

## Abstract

---

Since its birth in the Stone Age, the industry has undergone changes and has evolved to provide better and more efficient manufacturing methods, until reaching the current industrial revolution, called Industry 4.0. This new industrial phenomenon brings with it the use of new technologies whose characteristics and objectives seek one thing in common: the implementation of intelligent systems. Among these systems is digital manufacturing, which aims to create digital objects in physical objects and vice versa, using information and communication technologies as main pillars. Among the technologies that fall into the category of digital manufacturing is 3D printing, this is an additive manufacturing method that allows to realize three-dimensional objects from digital designs by means of the addition of layers of molten material. This technology, despite being relatively new, has become one of the most used manufacturing methods nowadays, due to the advantages it has in comparison with the subtractive manufacturing methods. Even so, it has some weak points, among which is the need to monitor the 3D printing process in person, that is, the user must be physically present in front of the machine supervising the work process to act immediately in case of Some inconvenience occurs. This is especially difficult to do if the parts to be manufactured have a too long completion time extension. Currently, there are two traditional 3D printing methods, in which the previous problem is present. The first method is through the loading of the file to be printed to a microSD memory, which is connected directly to the 3D printer to make the piece. The second, requires a computer that has installed a 3D printing software that must be connected directly to the 3D printer through a USB cable, the main drawback being that the computer should not be suspended, hibernated or turned off during the process of impression, because in case any of these situations occurs, the process will be interrupted. It should be noted that like monitoring, the control of the machines requires that the user is present to be able to manipulate the 3D printer or stop the process should any failure occur. It is based on these details, that the objective of this work is to enable a manufacturing system in the mobile cloud

with cyber physical systems applied in 3D printing, with the purpose of creating an environment of remote supervision and control. To achieve the above, the use of certain software and hardware elements was required, such as the cloud computing platform, an electronic card that serves as a physical cyber system, a webcam that allows to have real-time image of the process and some sensors that act as sources of support to increase the supervision and control of certain aspects that affect the correct process of 3D printing, having control over lighting, filament flow and even having knowledge of the humidity and temperature that exists in the ambient. All of the above forms the remote printing system that can be manipulated through mobile devices, such as a smartphone, a tablet or a laptop. The results obtained not only show that the system is efficient to be used, but also highlights certain advantages it has compared to traditional 3D printing methods, because even the system is configured so that, when the manufacturing process is completed, the user is notified. The system is even better in terms of savings, both energy and economic.

Keywords: 3D print, cloud computing, mobile devices

# Índice general

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>DEDICATORIA.....</b>                                       | <b>6</b>  |
| <b>AGRADECIMIENTOS.....</b>                                   | <b>7</b>  |
| <b>RESUMEN.....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                      | <b>1</b>  |
| JUSTIFICACIÓN.....  | 6         |
| DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....                                  | 7         |
| META CIENTÍFICA.....  | 8         |
| OBJETIVO GENERAL.....   | 8         |
| <i>Objetivos particulares.....</i>                            | <i>8</i>  |
| <b>REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>                            | <b>10</b> |
| 2.1. EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA.....                           | 10        |
| 2.1.1. <i>La industria antes de la maquinaria.....</i>        | <i>11</i> |
| 2.1.1.1. La industria lítica.....                             | 11        |
| 2.1.1.2. La industria metalúrgica.....                        | 12        |
| 2.1.2. <i>Revoluciones industriales.....</i>                  | <i>14</i> |
| 2.1.2.1. Primera revolución industrial.....                   | 14        |
| 2.1.2.2. Segunda revolución industrial.....                   | 15        |
| 2.1.2.3. Tercera revolución industrial.....                   | 16        |
| 2.1.2.4. La cuarta revolución industrial o Industria 4.0..... | 17        |
| 2.2. TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0.....                     | 18        |
| 2.2.1. <i>Simulación.....</i>                                 | <i>19</i> |
| 2.2.1.1. Software CAD.....                                    | 19        |
| 2.2.1.2. Software CAM.....                                    | 20        |
| 2.2.2. <i>Internet de las cosas.....</i>                      | <i>21</i> |
| 2.2.3. <i>Computación en la nube.....</i>                     | <i>23</i> |
| 2.2.3.1. Fabricación en la nube.....                          | 24        |
| 2.2.3.2. Computación en la nube móvil.....                    | 25        |
| 2.2.4. <i>Manufactura aditiva.....</i>                        | <i>27</i> |
| 2.3. IMPRESIÓN 3D FDM.....                                    | 29        |
| 2.3.1. <i>Historia de la impresión 3D.....</i>                | <i>29</i> |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.3.2. Modo de operación de impresión 3D FDM .....                                    | 31        |
| 2.3.3. Materiales para impresión 3D .....   | 32        |
| 2.3.4. Aplicaciones de la impresión 3D .....  | 33        |
| 2.3.5. Diferencias de la impresión 3D con procesos de manufactura convencionales..... | 35        |
| 2.4. IMPRESORAS 3D FDM .....  | 37        |
| 2.4.1. Componentes de una impresora 3D FDM.....                                       | 37        |
| 2.4.1.1. Elementos sin clasificar .....   | 38        |
| 2.4.1.2. Elementos electrónicos.....  | 41        |
| 2.4.1.3. Elementos mecánicos .....  | 45        |
| 2.4.1.4. Elementos del extrusor .....   | 47        |
| 2.5. DISPOSITIVOS MÓVILES .....   | 51        |
| 2.5.1. Red móvil .....  | 53        |
| 2.6. SISTEMAS CIBER FÍSICOS.....  | 54        |
| 2.7. SISTEMA EN CHIP.....   | 57        |
| <b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>   | <b>59</b> |
| 3.1. MATERIALES.....  | 61        |
| 3.1.1. Hardware .....   | 62        |
| 3.1.1.1. Impresora 3D .....   | 63        |
| 3.1.1.2. Cámara protectora.....   | 64        |
| 3.1.1.3. Sistema ciber físico .....   | 66        |
| 3.1.1.4. Memoria MicroSD.....   | 67        |
| 3.1.1.5. Fuente de voltaje .....  | 68        |
| 3.1.1.6. Cámara web .....   | 68        |
| 3.1.1.7. Módulo de relevadores.....   | 69        |
| 3.1.1.8. Sensor de temperatura de humedad .....                                       | 71        |
| 3.1.1.9. Sensor para filamento.....   | 71        |
| 3.1.1.10. Pantalla LCD .....  | 72        |
| 3.1.1.11. Conectores .....  | 72        |
| 3.1.1.12. Protoboard.....   | 73        |
| 3.1.1.13. Tira LED .....  | 73        |
| 3.1.1.14. Potenciómetros.....   | 74        |
| 3.1.2. Software.....  | 74        |
| 3.1.2.1. Software para formateo de memoria .....                                      | 75        |
| 3.1.2.2. Software para grabado de imagen en memoria .....                             | 75        |
| 3.1.2.3. Software de cliente SSH .....  | 75        |
| 3.1.2.4. Softwares para diseño digital.....   | 76        |
| 3.1.2.5. Software para obtención de G-code .....                                      | 77        |
| 3.1.2.6. Software de plataforma de manufactura en nube.....                           | 78        |
| 3.1.3. Dispositivos móviles .....   | 79        |
| 3.2. METODOLOGÍA.....   | 81        |
| 3.2.1. Preparación del sistema.....   | 82        |
| 3.2.1.1. Instalación de software.....   | 82        |
| 3.2.1.2. Personalización de interfaz .....  | 83        |
| 3.2.2. Configuración de renderizado interno .....                                     | 83        |
| 3.2.2.1. Configuración de perfil.....   | 83        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.2.2.2. Exportación de perfil.....  | 83         |
| 3.2.3. Configuración y colocación de sensores.....   | 84         |
| 3.2.3.1. Módulo de relevadores.....  | 84         |
| 3.2.3.2. Sensor DHT11.....   | 84         |
| 3.2.3.3. Final de carrera .....  | 84         |
| 3.2.4. Notificación de conclusión de impresión.....  | 85         |
| 3.2.4.1. Creación de cuenta Twilio.....  | 85         |
| 3.2.4.2. Complemento de plataforma de manufactura en la nube .....                           | 85         |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>86</b>  |
| 4.1. RESULTADOS DE CONTROL Y SUPERVISIÓN DE IMPRESIÓN 3D POR MEDIO DE DISPOSITIVO MÓVIL..... | 86         |
| 4.1.1. Control de impresora por dispositivo móvil .....                                      | 86         |
| 4.1.2. Piezas obtenidas .....  | 87         |
| 4.1.3. Ahorro energético y económico .....   | 91         |
| 4.1.4. Efectividad del sistema .....   | 94         |
| 4.1.5. Funcionamiento de los sensores adicionales .....                                      | 97         |
| 4.1.5.1. Apagado y encendido de LED.....   | 98         |
| 4.1.5.2. Apagado de cama o extrusor .....  | 99         |
| 4.1.5.3. Sensor DHT11.....   | 100        |
| 4.1.5.4. Interruptor de final de carrera .....   | 101        |
| 4.1.6. Notificación de finalización de impresión .....                                       | 102        |
| 4.2. PRODUCTOS GENERADOS .....   | 104        |
| 4.2.1. Artículos con índices de impacto.....   | 104        |
| 4.2.1.1. Año 2018.....   | 104        |
| 4.2.2. Participación en congresos .....  | 105        |
| 4.2.2.1. Año 2018.....   | 105        |
| 4.2.3. Registros de derechos de autor .....  | 106        |
| 4.3. DISCUSIÓN .....   | 106        |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>   | <b>111</b> |
| 5.1. PROSPECTIVAS .....  | 116        |
| <b>APOYOS .....</b>  | <b>118</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>   | <b>119</b> |
| <b>CURRÍCULUM VITAE .....</b>  | <b>125</b> |

# Índice de figuras

---

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1.1. TECNOLOGÍAS QUE CONFORMAN LA FABRICACIÓN DIGITAL.....   | 2  |
| FIGURA 1.2. MÉTODO DE IMPRESIÓN 3D A TRAVÉS DE MEMORIA MICROSD.....   | 6  |
| FIGURA 1.3. MÉTODO DE IMPRESIÓN 3D POR MEDIO DE COMPUTADORA.....  | 7  |
| FIGURA 2.1. EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA CON SUS FECHAS DE INICIO MÁS ANTIGUAS CONOCIDAS.....                                      | 11 |
| FIGURA 2.2. ETAPAS DE LA INDUSTRIA LÍTICA.....  | 12 |
| FIGURA 2.3. ETAPAS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA.....   | 13 |
| FIGURA 2.4. INICIOS Y FUENTES DE ENERGÍA DE LAS DIFERENTES REVOLUCIONES INDUSTRIALES.....                                       | 14 |
| FIGURA 2.5. ELEMENTOS CLAVE DE LA PRIMERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL.....  | 15 |
| FIGURA 2.6. ELEMENTOS CLAVE DE LA SEGUNDA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL.....  | 16 |
| FIGURA 2.7. ELEMENTOS CLAVE DE LA TERCERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL.....  | 16 |
| FIGURA 2.8. TECNOLOGÍAS QUE INTEGRAN LA NUEVA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL.....  | 17 |
| FIGURA 2.9. COMUNICACIÓN ENTRE OBJETOS FÍSICOS, DIGITALES Y RECURSOS HUMANOS ADMINISTRADOS POR EL INTERNET DE LAS<br>COSAS..... | 21 |
| FIGURA 2.10. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE COMPUTACIÓN EN LA NUBE.....   | 23 |
| FIGURA 2.11. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE SERVICIO DE MANUFACTURA EN LA NUBE.....   | 25 |
| FIGURA 2.12. COMPONENTES PRINCIPALES DEL MOBILE CLOUD COMPUTING.....  | 26 |
| FIGURA 2.13. MUESTRA DE CREACIÓN DE CAPAS EN UN SOFTWARE CAD.....   | 27 |
| FIGURA 2.14. HISTORIA DE LA IMPRESIÓN 3D.....   | 30 |
| FIGURA 2.15. PASOS DE OPERACIÓN PARA UNA IMPRESIÓN 3D.....  | 31 |
| FIGURA 2.16. CLASIFICACIÓN DE ALGUNOS MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D.....   | 33 |
| FIGURA 2.17. ALGUNAS ÁREAS DE APLICACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D.....  | 34 |
| FIGURA 2.18. ALGUNAS VENTAJAS DE LA IMPRESIÓN 3D EN COMPARACIÓN CON LOS MÉTODOS TRADICIONALES DE FABRICACIÓN.....               | 36 |
| FIGURA 2.19. ESQUEMA DE PARTES GENERALES Y MÁS COMUNES DE UNA IMPRESORA 3D FDM.....   | 38 |
| FIGURA 2.20. ESTRUCTURA DE LA IMPRESORA 3D.....   | 39 |
| FIGURA 2.21. FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....  | 40 |
| FIGURA 2.22. EJEMPLO DE MOTOR DE IMPRESORAS 3D.....   | 40 |
| FIGURA 2.23. EJEMPLO DE COLOCACIÓN DE MOTORES EN LOS EJES DE LA MÁQUINA.....  | 41 |
| FIGURA 2.24. PARTE SUPERIOR DE LA CAMA DE IMPRESIÓN HECHA DE ALUMINIO.....  | 42 |
| FIGURA 2.25. TORNILLOS DE SUJECIÓN DE CAMA DE IMPRESIÓN, A) VISTA SUPERIOR, B) VISTA DE TODOS LOS ELEMENTOS.....                | 42 |
| FIGURA 2.26. EJEMPLO DE UNA TARJETA ELECTRÓNICA DE IMPRESORA 3D.....  | 43 |
| FIGURA 2.27. FINALES DE CARRERA, A) PARA EL EXTRUSOR, B) PARA LA CAMA DE IMPRESIÓN.....   | 44 |
| FIGURA 2.28. PANTALLA LCD CON BOTONES DE CONTROL.....   | 44 |
| FIGURA 2.29. POLEAS; A) EN EL EJE X, B) EN EL EJE Y.....  | 45 |
| FIGURA 2.30. CORREAS; A) EN EJE X, B) EN EL EJE Y.....  | 45 |
| FIGURA 2.31. VARILLAS LISAS UBICADAS EN LOS EJES DISTINTOS EJES DE LA IMPRESORA.....  | 46 |
| FIGURA 2.32. VARILLAS ROSCADAS UBICADAS SOLO EN EL EJE Z.....   | 46 |
| FIGURA 2.33. ACOPLADORES PARA VARILLAS ROSCADAS DE EJE Z.....   | 47 |
| FIGURA 2.34. EXTRUSOR.....  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 2.35. UBICACIÓN DEL ENGRANE Y TORNILLO DE TRACCIÓN .....                                 | 48 |
| FIGURA 2.36. VENTILADORES DEL EXTRUSOR.....   | 49 |
| FIGURA 2.37. EXTRUSOR DIRECTO.....  | 50 |
| FIGURA 2.38. DIFERENCIAS EN EL USO DE DISPOSITIVOS MÓVILES Y EQUIPOS DE CÓMPUTO.....            | 52 |
| FIGURA 2.39. TECNOLOGÍAS DE RED MÓVIL.....  | 53 |
| FIGURA 2.40. EJEMPLO GENERAL DE UN SISTEMA CIBER FÍSICO.....                                    | 55 |
| FIGURA 2.41. ESTRUCTURA DE MÉTODOS DE TRABAJO TRADICIONALES.....                                | 56 |
| FIGURA 2.42. ESTRUCTURA DE MÉTODOS DE TRABAJO IMPLEMENTANDO CPS.....                            | 57 |
| FIGURA 3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS DE IMPRESIÓN 3D A) TRADICIONALES, B) PROPUESTO ..... | 60 |
| FIGURA 3.2. PROCESO EN EL CUAL SE LLEVARÁ UN ARCHIVO DIGITAL A UNA PIEZA REAL TERMINADA .....   | 61 |
| FIGURA 3.3. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D PROPUESTO.....                                | 62 |
| FIGURA 3.4. ELEMENTOS DE HARDWARE CONECTADOS ENTRE SÍ.....                                      | 63 |
| FIGURA 3.5. IMPRESORA 3D UTILIZADA EN EL PROYECTO .....   | 64 |
| FIGURA 3.6. CÁMARA DE IMPRESIÓN VACÍA, A) SIN PUERTAS, B) CON PUERTAS.....                      | 64 |
| FIGURA 3.7. PUERTAS DESMONTABLES DE CÁMARA DE IMPRESIÓN .....                                   | 65 |
| FIGURA 3.8. IMPRESORA DENTRO DE CÁMARA DE IMPRESIÓN.....  | 65 |
| FIGURA 3.9. VISTA SUPERIOR DE TARJETA ELECTRÓNICA ELEGIDA .....                                 | 67 |
| FIGURA 3.10. MEMORIA MICROSD DE 16 GB.....  | 68 |
| FIGURA 3.11. FUENTE DE PODER PARA RASPBERRY PI .....  | 68 |
| FIGURA 3.12. CÁMARA WEB UTILIZADA EN EL PROYECTO .....  | 69 |
| FIGURA 3.13. MÓDULO DE RELEVADORES.....   | 70 |
| FIGURA 3.14. SENSOR DHT11.....  | 71 |
| FIGURA 3.15. INTERRUPTOR DE FINAL DE CARRERA CON PULSADOR.....                                  | 71 |
| FIGURA 3.16. PANTALLA LCD PARA MOSTRAR DATOS DE SENSOR DHT11 .....                              | 72 |
| FIGURA 3.17. CONECTORES PARA CONEXIÓN ENTRE SENSORES Y RASPBERRY .....                          | 72 |
| FIGURA 3.18. PROTOBOARD .....   | 73 |
| FIGURA 3.19. TIRA LED UTILIZADA PARA ILUMINACIÓN .....  | 73 |
| FIGURA 3.20. POTENCIÓMETRO DE CONTROL DE CONTRASTE O BRILLO.....                                | 74 |
| FIGURA 3.21. SOFTWARES UTILIZADOS Y SU CLASIFICACIÓN .....                                      | 75 |
| FIGURA 3.22. EJEMPLO DE PANTALLA DE DISEÑO EN SOLIDWORKS .....                                  | 76 |
| FIGURA 3.23. EJEMPLO DE PANTALLA DE REPETIER HOST.....  | 77 |
| FIGURA 3.24. VISTA DE INTERFAZ PRINCIPAL DE OCTOPRINT .....                                     | 79 |
| FIGURA 3.25. TELÉFONO INTELIGENTE .....   | 80 |
| FIGURA 3.26. TABLET .....   | 80 |
| FIGURA 3.27. LAPTOP.....  | 81 |
| FIGURA 3.28. PASOS GENERALES POR SEGUIR PARA REALIZAR EL PROYECTO .....                         | 82 |
| FIGURA 4.1. DISPOSITIVOS MÓVILES ACCEDIENDO A OCTOPRINT .....                                   | 86 |
| FIGURA 4.2. PARTES DE CARCASA.....  | 88 |
| FIGURA 4.3. PIEZAS DE AJEDREZ.....  | 89 |
| FIGURA 4.4. TRIPIE PARA CÁMARA WEB.....   | 89 |
| FIGURA 4.5. TOPE DE ROLLO DE FILAMENTO.....   | 90 |
| FIGURA 4.6. SOPORTE DE FINAL DE CARRERA .....   | 90 |
| FIGURA 4.7. SOPORTE PARA FILAMENTO.....   | 91 |
| FIGURA 4.8. GRAFICA DE COMPARACIÓN DE GASTO ENERGÉTICO.....                                     | 93 |
| FIGURA 4.9 GRÁFICA DE TIEMPOS DE PRUEBAS DE MOVIMIENTO DE MOTORES .....                         | 95 |
| FIGURA 4.10. GRAFICA DE TIEMPOS DE PRUEBA DE ENCENDIDO Y APAGADO DE LED .....                   | 96 |
| FIGURA 4.11. GRAFICA DE TIEMPOS DE PRUEBA DE RETRASO DE CÁMARA WEB .....                        | 97 |
| FIGURA 4.12. PRUEBA DE ENCENDIDO DE LEDS, ARRIBA: LED ENCENDIDO; ABAJO: LED APAGADO .....       | 98 |
| FIGURA 4.13. LED APAGADOS Y ENCENDIDOS .....  | 99 |



|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 4.14. LECTURA DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL SENSOR MOSTRADO EN PUTTY.....              | 100 |
| FIGURA 4.15. PANTALLA LCD MOSTRANDO LOS DATOS DE SENSOR DHT11 .....                          | 101 |
| FIGURA 4.16. SENSOR PARA FILAMENTO PAUSANDO LA IMPRESIÓN AL DETECTAR FALTA DE MATERIAL ..... | 102 |
| FIGURA 4.17. EJEMPLO DE MENSAJE RECIBIDO.....  | 103 |

# Índice de tablas

---

|  |    |
|--|----|
| TABLA 3.1. COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE TARJETAS ELECTRÓNICAS [65]–[71].....      | 66 |
| TABLA 3.2. COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE SOFTWARES DE IMPRESIÓN 3D [89]–[91] ..... | 78 |
| TABLA 4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS PIEZAS IMPRESAS .....                                | 88 |
| TABLA 4.2. COMPARACIÓN DE GASTO ENERGÉTICO.....  | 93 |
| TABLA 4.3. TIEMPOS DE MOVIMIENTO DE MOTORES .....                                      | 95 |
| TABLA 4.4. TIEMPOS DE ENCENDIDO Y APAGADO DE LED.....                                  | 95 |
| TABLA 4.5. TIEMPOS DE CÁMARA WEB.....  | 96 |

# Introducción

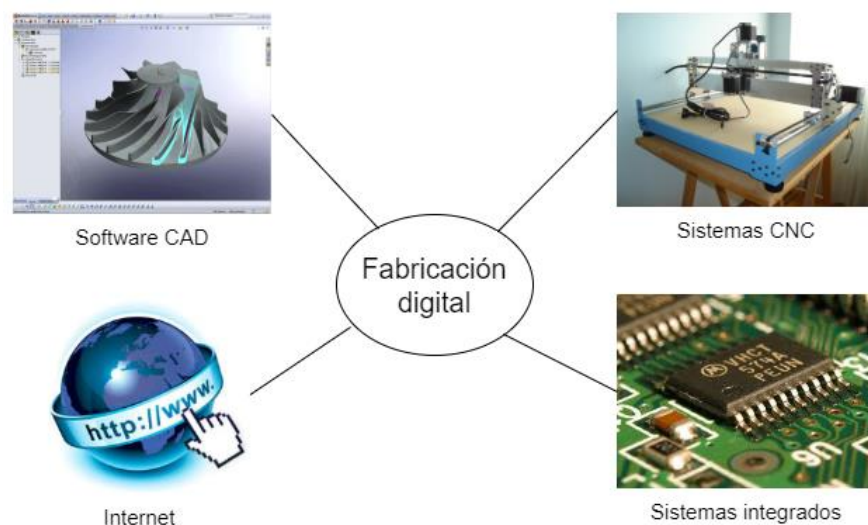
---

A lo largo de los años, el hombre ha tenido la necesidad de perfeccionar los métodos de fabricación que le permiten producir herramientas y utensilios de uso cotidiano, lo cual ha traído el nacimiento, mejora y evolución de la industria [1], [2], cuyas etapas han traído consigo innovación de diferentes tipos [3]–[5].

El nacimiento de la industria se remonta a la Edad de Piedra, etapa que se conoce como industria lítica, época donde las herramientas eran manuales y su método de producción también lo era, utilizando piedras para la fabricación de herramientas y como las mismas herramientas [1], [2]. El siguiente paso en la industria se dio en la conocida como Edad de los Metales o la industria metalúrgica, etapa en la que se cambió la piedra por distintos tipos de metales para la fabricación de herramientas, utensilios de mejor uso y resistencia e incluso armas de combate, todo de manera manual [6], [7]. Hasta este punto, toda la industria se realizaba manualmente sin el uso de maquinaria para la fabricación de los objetos, circunstancias que cambiaron a partir de las revoluciones industriales.

A diferencia de la industria lítica o la metalúrgica, la industria surgida en las revoluciones industriales se llevaba a cabo con el uso de maquinaria [4], [5]. Cada una de las revoluciones industriales significó un cambio en la manera de producir objetos, desde la materia prima utilizada, pasando por la fuente de energía y los objetivos particulares de producción [4], [5]. Cada etapa contribuyó al avance en los métodos de fabricación, los cuales se convertían cada vez más en métodos de fabricación

automatizados, pieza clave de la tercera revolución industrial [4], [8]. Pero, un nuevo fenómeno industrial nació en el año 2010, fenómeno conocido como la cuarta revolución industrial o Industria 4.0, revolución industrial que sigue vigente al día de hoy [9], [10]. Esta nueva tendencia industrial está conformada por varias tecnologías, que tienen sus características y objetivos propios, todo buscando la era de la operación inteligente o comunicación automatizada entre elementos industriales [11]–[13]. El objetivo principal de la Industria 4.0 es la fabricación digital, la cual utiliza la digitalización de archivos, el uso de redes y tecnologías de manufactura para la creación de un nuevo método de fabricación que se apega a la tendencia de la nueva revolución industrial, ya que se diseña, planifica y se realizan operaciones de fabricación, todo a través de modelos digitales [14]–[16]. La figura 1.1 muestra los elementos que conforman la fabricación digital según lo escrito por Jorquera [17]:



*Figura 1.1. Tecnologías que conforman la fabricación digital*

Algunas de las tecnologías que conforman a la Industria 4.0 son la simulación, el internet de las cosas, la computación en la nube y la manufactura aditiva, áreas que son especialmente importantes para el desarrollo de este proyecto en particular.

La simulación se refiere al uso de softwares para realizar modelos de objetos que se desean fabricar, modelos que se estudian antes de fabricarlos físicamente [16].

Ejemplos de estos sistemas son el software CAD (Computer Aided Design por sus siglas en inglés o Diseño asistido por computadora en español) o el software CAM (Computer Aided Manufacturing por sus siglas en inglés o Manufactura asistida por computadora en español) [18], [19]. El primero, se basa en el diseño digital de objetos y estudio de algunas propiedades de los diseños creados [18], mientras que el segundo se encarga de crear simulaciones de manufactura para la creación de objetos reales, primeramente diseñados en un software CAD [18], [19].

El internet de las cosas, conocido como Internet of Things en inglés (IoT), es una tecnología derivada del internet cuya arquitectura permite que elementos de software y elementos de hardware realicen el intercambio de datos e información entre sí [3], [15], [20], [21]. El objetivo de esta tecnología es el control remoto de objetos a través del envío de señales de red, ya sea controladas por recurso humano o por otros elementos [20], [22].

La computación en la nube o cloud computing se refiere al uso de un entorno informático para acceder y almacenar datos o utilizarlo como un servicio de red, ya sea de manera local o remota [23], [24]. Una de las características más llamativas de esta tecnología es que puede utilizarse como software de servicio, es decir, que un usuario pueda utilizar aplicaciones alojadas en servidores que son administrados por terceros [25]. Esta tecnología tiene algunas derivaciones, como la manufactura en la nube o cloud manufacturing que se centra en los sistemas de manufactura y se utiliza para formar líneas de producción temporales y reconfigurables [25] y también está la computación en la nube móvil o el mobile cloud computing que se centra en apoyar el uso de los dispositivos móviles, brindando una extensión de recursos, batería y capacidad de ejecución de aplicaciones a estos últimos [26]–[28].

La última tecnología descrita es la manufactura aditiva. La manufactura aditiva es un tipo de manufactura avanzada que fabrica los objetos a través de la adición de material, más concretamente a través de la adición de capas de material [29], [30]. Existen varios procesos de manufactura aditiva, como la fotopolimerización de tinta, el goteo

de material, la fusión de lecho de polvo, la laminación de hojas, la deposición de energía dirigida y la extrusión de material [31], [32]. En este trabajo de tesis, por interés de estudio, se describe la extrusión de material de manera más amplia a continuación.

El proceso de extrusión de material es conocido más comúnmente como la impresión 3D. Al ser un proceso de manufactura aditiva, los objetos que se pueden fabricar son tridimensionales y su método de fabricación es a través de la fundición y extrusión de un plástico [31]–[35]. El nombre de impresión 3D se adoptó en el año 2010 [31], [32]. Para llevar a cabo el proceso de impresión 3D se requieren 4 pasos principales: la creación del archivo digital (diseño digital de la pieza), procesamiento digital del archivo (renderización de la pieza), la carga del archivo a la impresora (fabricación de la pieza) y el acabado final de las piezas (estética de las piezas) [31], [32], [36]. Existen varios materiales para la fabricación de piezas a través de la impresión 3D que van desde los más comunes que son los plásticos, hasta algunos que aún están en fase de experimentación como los biomateriales [31], [37]. El material por utilizar depende de las características de la piezas, su uso final y sobre todo la selección del usuario [37], pues los usos de la impresión 3D abarcan un gran número de áreas, tales como la educación, industria automotriz, industria alimentaria, medicina, entre otros [34]. Por último, la impresión 3D tiene una serie de ventajas en comparación con los procesos de manufactura tradicionales, tales como reducción de costo y tiempo de producción, fabricación personalizada y compleja, etc., esto tiene como efecto que su uso vaya creciendo cada vez más [31],[34],[38], [39].

Ahora bien, si se habla de impresión 3D se debe también hablar de las máquinas que la hacen posible, las impresoras 3D. Existe un gran número de distribuidores y fabricantes de impresoras 3D, pero por lo general, existen cuatro modelos para su clasificación, los cuales son *Box Bots*, *RepStraps*, *Upstarts* y *Rep Rap* [37], siendo este último el modelo de interés particular de este proyecto. Las impresoras 3D de modelo *Rep Rap* se caracterizan por ser máquinas de código abierto y bajo costo con un rendimiento medio-alto, siendo controladas a través de una computadora para realizar el proceso de fabricación, proceso que utiliza una boquilla como la fuente de

deposición del material [36]. Sus componentes varían un poco en tamaño, número y forma según la marca, pero para que sea funcional requiere contar con algunos elementos esenciales, una fuente de poder, algunos elementos electrónicos como una tarjeta madre, elementos mecánicos como correas, motores y principalmente un extrusor, elemento esencial para la deposición del material y por tanto, la fabricación de la pieza final [37], [39], [40].

En la actualidad, los dispositivos móviles se han convertido en elementos indispensables para la vida diaria debido a la capacidad que tienen para ejecutar aplicaciones de varios tipos y usos [41]–[43]. Es gracias a este tipo de característica que los dispositivos móviles han comenzado a utilizarse para casi cualquier cosa, desplazando a las computadoras que solo se utilizan para la ejecución de tareas laborales y profesionales que requieren capacidades de recurso mayores [44]. Otra de las situaciones que hace que los dispositivos móviles sean más utilizados actualmente se debe a la implementación de las redes de telefonía móvil (3G o 4G), el Wi-Fi y el Bluetooth, lo que permite no solo tener comunicación y entretenimiento, sino que además se pueden enviar y recibir archivos de audio o video e incluso documentos [44].

Los dispositivos móviles sirven como apoyo para los sistemas ciber físicos o Cyber Physical System en inglés (CPS) que son sistemas constituidos por elementos de software y hardware que tienen la capacidad de comunicarse entre sí a través del uso de tecnologías como el internet de las cosas o el cloud computing, otorgando un intercambio de datos e información entre los elementos [16], [45]–[47]. El objetivo principal de los CPS es la implementación de los sistemas inteligentes [47], los cuales integrados en los sistemas tradicionales de fabricación ayudan a mejorar la eficiencia de la producción y la calidad de los productos se ve aumentada [45].

Como elemento de los sistemas ciber físicos, están los sistemas en chip o SoC (por sus siglas en inglés System on Chip) son elementos que integran los componentes de una computadora y software en un circuito integrado [48]–[50]. Estos sistemas se

utilizan en diferentes áreas debido a su reducido tamaño y bajo consumo de energía, esto añadiendo que tienen un alto rendimiento y funcionalidad [50], [51].

## Justificación

Actualmente, una de las tecnologías que más representan a la industria 4.0 es la manufactura aditiva, más concretamente la impresión 3D [52]. Pero, a pesar de ser una tecnología con grandes tendencias de uso, no está libre de fallas, deficiencias o áreas de oportunidad [53]. La impresión 3D tradicional se puede realizar por dos métodos posibles: a través de una memoria microSD o por medio de la conexión de una computadora conectada para el proceso [31], [53].

En el primer método, que se muestra en la figura 1.2, el archivo por imprimir se guarda en una tarjeta de memoria microSD, la cual se inserta en una entrada de este tipo de tarjeta que tiene la impresora 3D. El archivo se carga en la impresora 3D y comienza el proceso de impresión. Todo el control se ejerce sobre los botones que tiene la impresora 3D [31].

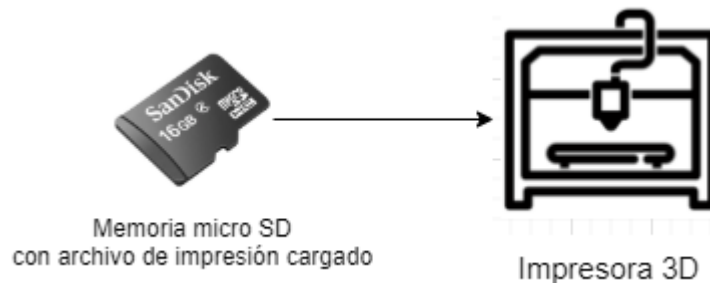


Figura 1.2. Método de impresión 3D a través de memoria microSD

Como se ilustra en la figura 1.3, el segundo método de impresión tradicional requiere la instalación de un software de impresión 3D en una computadora, misma que se conecta por medio de un cable USB a la impresora 3D. Cabe señalar que este método requiere que la computadora no entre en suspensión, hibernación o se apague, ya que esto detendría inmediatamente el proceso de impresión, por lo tanto, impresiones muy



prolongadas requieren que el equipo de cómputo se utilice exclusivamente para la impresora 3D [53].



*Figura 1. 3. Método de impresión 3D por medio de computadora*

Cualquiera de los métodos vistos anteriormente comparten la siguiente característica: la supervisión del proceso de impresión y el control de la impresora 3D deben ser presenciales [31], [53]. Por lo tanto, se requiere una solución a estos problemas relacionada con dispositivos conectados a internet que permitan el control o supervisión remotos de la máquina [53]. Es debido a esta área de oportunidad que se busca habilitar e implementar un sistema de control y supervisión de impresoras 3D que se realicen de manera remota, eliminando además la dependencia de una computadora conectada a la máquina, sustituyéndola por una tarjeta electrónica que además permite la conexión de más de una impresora 3D y que cuenta con conexión a internet permitiendo que el proceso pueda ser monitoreado por algún dispositivo móvil a través de una plataforma de cómputo en la nube embebida en la tarjeta electrónica. El sistema propuesto además contribuye al ahorro económico y energético del usuario.

## **Definición del problema**

Como se ha mencionado, los métodos de impresión 3D tradicionales requieren que el usuario esté presente para el control y la supervisión del proceso de impresión 3D. Además de esto, uno de los métodos requiere que una computadora esté conectada

a la impresora 3D durante todo el proceso de impresión lo cual provoca daños a mediano y largo plazo al equipo, pues la computadora debe permanecer encendida para evitar la interrupción del proceso y, por lo tanto, debe estar conectada, sobre todo si el proceso se prolonga demasiado, sin mencionar que, si se tienen más de dos impresoras 3D, cada una debe contar con su equipo de cómputo. Las características mencionadas antes, provocan que el proceso de impresión 3D sea un tanto complejo debido a la demanda de recursos técnicos (equipo de cómputo), humanos (necesidad de presencia en el proceso) y de tiempo que esto implica.

## **Meta científica**

La meta del presente trabajo de tesis se centra en estudiar, analizar, diseñar e implementar tecnología de manufactura en la nube móvil con sistemas ciber físicos con aplicación en sistemas de impresión 3D.

## **Objetivo general**

Diseñar e implementar en un sistema ciber físico, tecnología de manufactura en la nube móvil para control y monitoreo de impresión 3D.

Para alcanzar el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos particulares:

### ***Objetivos particulares***

- Estudiar y analizar el estado del arte de manufactura aditiva centrando la atención en la impresión 3D.
- Integrar componentes en el ámbito de la Industria 4.0, que permita implementar la tecnología de manufactura en la nube móvil con aplicación en la impresión 3D.
- Comparar hardware y software para el control y monitoreo de impresión 3D con sistemas ciber físicos.
- Instalar y configurar el software seleccionado en el sistema ciber físico elegido.

- Diseñar, implementar, instalar y configurar tecnología para el control y monitoreo de la impresora 3D a través de la tecnología de manufactura en la nube móvil.
- Estudiar y comparar el consumo energético y económico de un sistema de impresión 3D tradicional comparado con la tecnología de manufactura en la nube móvil.
- Validar el sistema a través de la impresión de distintos objetos, con el fin de analizar el desempeño del sistema desarrollado.

# Revisión de literatura

---

## 2.1. Evolución de la industria

Desde el inicio de los tiempos, el ser humano ha utilizado la industria como el medio para la creación de herramientas, utensilios, adornos, etc. [1], [2]. La industria ha ido evolucionando con el pasar del tiempo, pero aun así todo tiene un inicio y la industria no fue la excepción [1], [2].

Cada una de las etapas de la industria trajo consigo un nuevo tipo de innovación, mejorando notablemente el desarrollo económico en cada una de las etapas, sobre todo en las revoluciones industriales [3]–[5]. Se habla de innovación cuando ocurren combinaciones de dos o más de las siguientes características: desarrollo de un nuevo producto, introducción de nuevo método de producción, uso de nuevas materias primas, nuevos mercados o nueva organización de procesos económicos [3], por lo que, como se describe más adelante, cada una de las etapas de la industria contó con una innovación.

La figura 2.1 muestra las diferentes etapas de la industria, así como su tiempo de inicio más antiguo conocido, pues no todas las civilizaciones ni regiones comenzaron a explotar los recursos al mismo tiempo [2], [5], [6], [54].

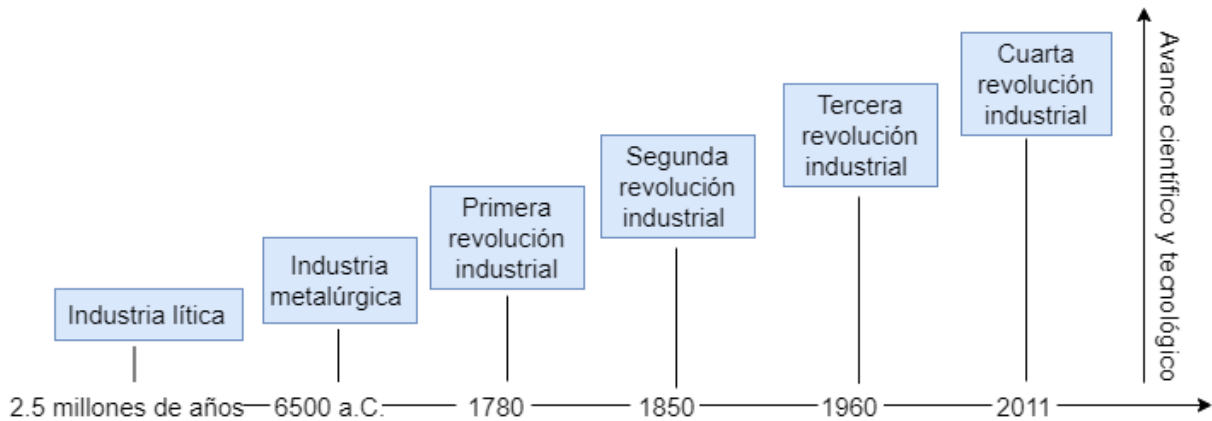


Figura 2.1. Evolución de la industria con sus fechas de inicio más antiguas conocidas

La evolución de la industria se puede separar en dos grupos, siendo el primero la época donde las máquinas no se utilizaban como medio de producción [2], [6], [7], [54] y la segunda aquella etapa donde las máquinas pasaron a ser indispensables para la creación de herramientas, utensilios, productos, etc. [4], [5].

### 2.1.1. La industria antes de la maquinaria

Antes de que las máquinas se hicieran el medio de producción por excelencia, la industria se hacía únicamente con las manos y herramientas manuales [1], [2]. Existen dos grandes periodos de la industria previos a la utilización de máquinas para producción, siendo la primera la Edad de Piedra [1], [2] y la Edad de los Metales [6], [7].

#### 2.1.1.1. La industria lítica

El primer tipo de industria conocida es aquella surgida en la prehistoria, más concretamente en la llamada Edad de Piedra, a la cual se le conoció como industria lítica [1], [54]. Este tipo de industria consiste en la creación de utensilios y herramientas a partir de distintos tipos de piedra, de entre las cuales destaca el sílex, convirtiéndose en el material más utilizado durante esta época [1], [54]. El método de fabricación o creación de dichos elementos se realizaba a partir de la técnica conocida como

percusión, que es el tallado de un elemento contra otro de tal manera que se vayan arrancando lascas para generar las formas, filos o puntas deseadas [1], [54].

Como se observa en la figura 2.2, la industria lítica se dividió en varias sub etapas (el inicio de estas varía según las regiones, las más antiguas que se conocen se observan en la figura 2.2), las cuales contaron con características únicas en el método de fabricación, tipos de piedra y utensilios utilizados para la creación de las herramientas, pero siempre buscando la facilidad y comodidad en los medios de fabricación de éstas [1], [55].



Figura 2.2. Etapas de la industria lítica

Otro aspecto importante en las etapas de la industria lítica fue la mejora en el acabado y el número de utensilios que podían fabricarse conforme las técnicas de fabricación avanzaban, dado que en la Industria de los Guijarros las herramientas eran toscas y con poco acabado, mientras que en la industria microlítica las técnicas de fabricación permitieron la creación de puntas y filos mucho más definidos, hasta pasar a la laminar, cuya perfección permitió incluso realizar adornos [1], [2], [54].

### 2.1.1.2. La industria metalúrgica

La segunda fase de la industria llegó en la Edad de los Metales, conocida también como la industria metalúrgica [6], [7]. A diferencia de la industria lítica, en la cual a pesar de las mejoras, el material era siempre la piedra, el material de esta edad de la industria fueron metales de distintas características, los cuales fueron utilizados para

la creación de herramientas y utensilios de mayor resistencia y por primera vez para agricultura, ganadería e incluso armamento de ataque y defensa [6], [7].

En la figura 2.3 se muestran las tres etapas de la industria metalúrgica, las cuales, al igual que la industria lítica, tuvieron su inicio en diferentes fechas según la región. Aun así, todas comparten la característica del uso de un metal como principal fuente de fabricación [6], [7].

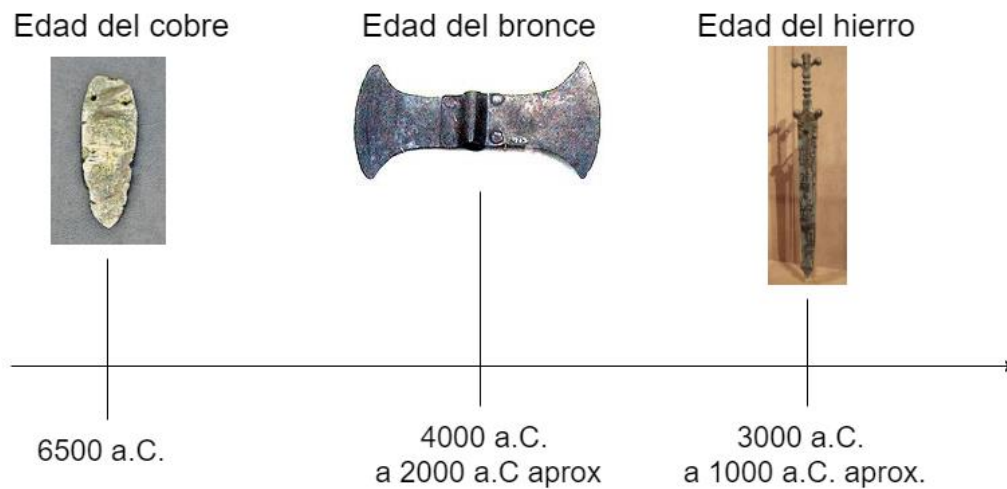


Figura 2.3. Etapas de la industria metalúrgica

Cada una de las etapas de la industria metalúrgica significó el avance en el uso de herramientas forjadas con materiales cada vez más resistentes, así mismo, debido a las características de los metales, es decir, que cada uno era más duro que el anterior, las técnicas metalúrgicas fueron evolucionando cada vez más trayendo también con esto el sedentarismo total del ser humano desde la Edad de Bronce permitiendo con esto un avance industrial realmente significativo en la Edad de Hierro, pues incluso varios adornos se hacían con dicho metal [6], [7].

## 2.1.2. Revoluciones industriales

La figura 2.4, muestra de manera resumida el avance tecnológico que cada una de las revoluciones industriales trajeron consigo, así como sus fechas de inicio aproximadas y su fuente de energía principal.

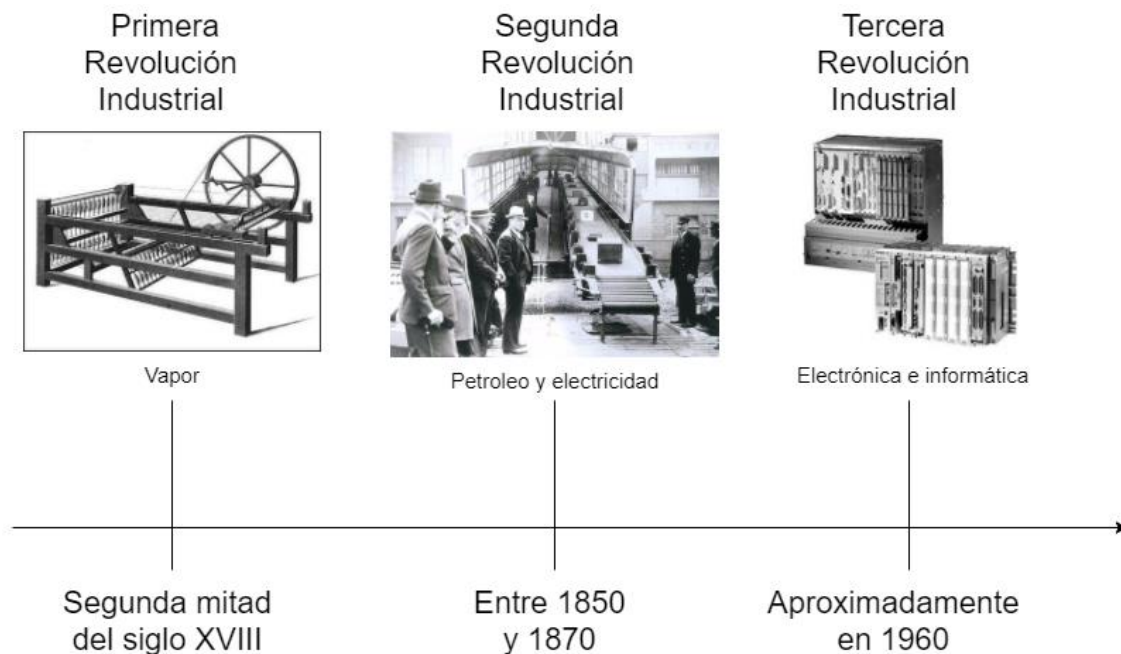


Figura 2.4. Inicios y fuentes de energía de las diferentes Revoluciones Industriales

### 2.1.2.1. Primera revolución industrial

La Primera Revolución Industrial tuvo su origen en Inglaterra en el año de 1780 [5], [8]. La principal materia prima que se utilizaba era el algodón. El tipo de industria que apareció en esta etapa fue la industria siderúrgica ya que el acero representaba la mecanización de trabajo, que era lo que se buscaba en ese en aquel tiempo. La principal fuente de energía de esta época fue el carbón, que al ser sometido a un proceso de combustión producía vapor lo que ayudó en el desarrollo de máquinas que utilizaban esta fuente de energía para convertirla en trabajo [3], [5]. Además de ello, se utilizó el mismo vapor para la implementación del ferrocarril y transportes marítimos. Esta Revolución Industrial se centró en la producción en masa. Terminó en 1830 [5].



Un resumen de las características más importantes de esta etapa se puede visualizar en la figura 2.5.



Figura 2.5. Elementos clave de la Primera Revolución Industrial

#### 2.1.2.2. Segunda revolución industrial

Esta segunda etapa de evolución industrial comenzó alrededor de 1870 principalmente en Estados Unidos [5], [8]. Los principales sectores de desarrollo industrial en esta época fueron el sector metalúrgico y el sector químico. A diferencia de la etapa anterior, el acero ya era completamente indispensable. Esto conllevó a la industria automotriz a ser la principal industria en la época. Las principales fuentes de energía de esta etapa son la electricidad y el petróleo [3], [5]. La parte que fue la principal fuente de revolución fue la automatización de procesos, más específicamente a través de líneas de montaje [5], [8]. La característica técnica de la Segunda Revolución Industrial es la separación de los ingenieros y los trabajadores [5].

De manera gráfica, la figura 2.6 muestra los elementos clave para el desarrollo de la Segunda Revolución industrial.



Figura 2.6. Elementos clave de la Segunda Revolución Industrial

### 2.1.2.3. Tercera revolución industrial

La penúltima etapa de la revolución industrial da inicio en 1970 en Japón [5], [8]. Esta revolución está basada en una evolución técnico-científica. En esta etapa evoluciona notablemente la microelectrónica, la informática, la robótica, las telecomunicaciones y la biotecnología [3], [5]. La computadora es el elemento clave en esta revolución industrial ya que esta máquina permite el trabajo remoto y programable de las máquinas a utilizar[5], [8].

La figura 2.7 muestra los elementos más característicos de la Tercera Revolución Industrial.



Figura 2.7. Elementos clave de la Tercera Revolución Industrial

#### 2.1.2.4. La cuarta revolución industrial o Industria 4.0

El concepto de Industry 4.0 surgió por primera vez en Alemania en la Feria Hannover en el 2011 [9], [10] pero fue hasta 2013 que fue publicado oficialmente en la Academia Nacional Alemana de Ciencia e Ingeniería [10].

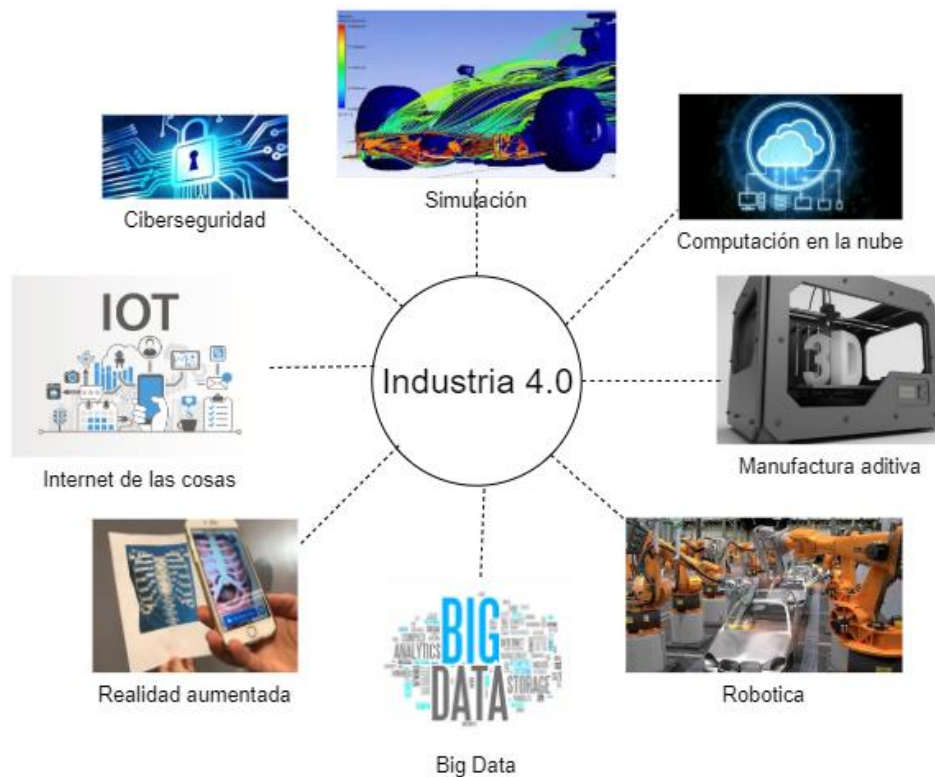


Figura 2.8. Tecnologías que integran la nueva Revolución Industrial

Como se muestra en la figura 2.8, la Industria 4.0 abarca un gran número de tecnologías de las cuales destacan Internet of Things (IoT) o Internet de las Cosas, Fabricación por la Nube y Manufactura Inteligente [11], [12] dando con ello la capacidad a las máquinas o los equipos a relacionar materiales, productos, producción, otras máquinas o equipos e incluso al recurso humano hacia un nuevo tipo de operación inteligente [11], [12] esto significa que los componentes industriales de las empresas tienen la capacidad de comunicarse entre sí [13].

Es a través de esta estrategia de producción digitalizada y autónoma que se busca que las operaciones sean controladas en respuesta a los cambios de la estrategias y los entornos dando como resultado la producción ansiada por la Industria 4.0 [12].

Esta ola actual de innovación a través de los cánones de la Industria 4.0 es la estrategia perfecta para asegurar la competitividad futura a través del diseño y la implementación de productos y servicios igualmente competitivos [56].

El objetivo principal de este nuevo desarrollo tecnológico es la implementación de la fabricación inteligente, teniendo la fabricación personalizada y digitalizada como principal atractivo, utilizando además, tecnologías de servicios digitales [16].

Dentro de las metas de la Industria 4.0, se considera llevar a las máquinas a convertirse en máquinas inteligentes automatizadas que sean capaces de realizar predicciones, conocimiento, comprobación y configuración para otras máquinas o para sí mismas [45].

Debido a que actualmente se está viviendo esta Revolución Industrial, el proyecto desarrollado en este documento está directamente ligado a algunas de las tecnologías que conforman este nuevo fenómeno industrial, tecnologías que serán descritas más profundamente en la sección siguiente.

## **2.2. Tecnologías de la Industria 4.0**

La Industria 4.0 se compone de una serie de tecnologías que tienen sus propio objetivos y características particulares [11], [12]. Algunas de estas tecnologías son de interés de estudio para el proyecto desarrollado, por lo cual las siguientes secciones se centrarán en la descripción de las tecnologías de interés, siendo la simulación, el internet de las cosas, la computación en la nube y la manufactura aditiva, dejando por

el momento de lado al Big Data, la Ciberseguridad, la Realidad aumentada y la robótica.

### 2.2.1. Simulación

Desde hace algunas décadas, los sistemas de simulación o de software han sido de gran importancia para la manufactura, ya que es a través de este tipo de sistemas que se pueden realizar modelos previos de los objetos antes de que éstos sean creados [16]. Dos ejemplos de software de simulación son el CAD y el CAM, los cuales se describen a continuación [18], [19].

#### 2.2.1.1. Software CAD

Puede definirse al CAD como el proceso de automatización de diseño a través de la combinación de técnicas informáticas, gráficas, programas de cálculo y documentación de los productos [17], [18].

El CAD se refiere al uso de diferentes herramientas computacionales que sirven para dar asistencia a una persona profesional o no en el ámbito de diseño digitalizado. Esta herramienta se puede utilizar también para la administración del ciclo de vida de los productos obtenidos, mediante el uso de simulaciones de diferentes tipos [17], [18].

Algunas de las ventajas de uso de un software CAD son las siguientes [18]: se pueden usar librerías de objetos comunes, se elimina la distinción entre un plano original y una copia, la calidad de los planos es bastante alta debido a la exactitud de las dimensiones de los objetos, es posible realizar modelos en 3D para poder visualizar de una mejor perspectiva los objetos que se están diseñando, reducción de tiempo al realizar operaciones repetitivas, facilidad de cambio de dimensiones por medio de la computadora, etc.

Dentro de los programas CAD se distinguen principalmente dos tipos, los programas de diseño de objetos reales y los programas para el diseño gráfico [18].

Los programas de diseño de objetos reales son softwares que trabajan por medio del dibujo vectorial por lo que la exactitud al momento de representar objetos con dimensiones y relaciones específicas es mayor [18].

Por otro lado, los programas para diseño gráfico se concentran más en la imagen de los objetos, como la resolución, las combinaciones de color, la impresión, etc. Estos softwares no requieren tener la exactitud de los programas de diseño de objetos reales, ya que se basan más en las características visuales de los objetos [18].

#### 2.2.1.2. *Software CAM*

El CAM se refiere principalmente al uso de un software de control numérico para la creación de instrucciones detalladas por medio del G-code o código G para poder enviar dichas instrucciones a las máquinas-herramientas CNC y controlar sus acciones y obtener productos de alta calidad [19] [18].

El uso de este tipo de programas engloba un gran número de operaciones y combinaciones con otros tipos de software, por lo que se puede definir más ampliamente a un proceso de CAM como el uso de herramientas computacionales para la definición de planes y simulaciones de manufactura para aplicar a los diseños realizados con un programa CAD los cuales se maquinarán a través de las máquinas-herramientas que utilizan el control numérico antes de que se lleven a cabo de forma práctica. Estos softwares pueden además simular los maquinados con distintos tipos de máquinas, herramientas y tipos de materiales [19].

La tecnología de simulación es de gran importancia para el proyecto de este documento, pues sin un diseño, la manufactura no es posible. La siguiente tecnología

por describir constituye uno de los elementos de gran peso para el desarrollo del proyecto.

### 2.2.2. Internet de las cosas

El internet de las cosas, conocido como Internet of things o IoT por sus siglas en ingles es un término introducido entre 1998 y 1999 por el británico Kevin Ashton, que también le llamo Internet of Everything (IoE) o Internet de todo [3], [20]. El término hace referencia a una arquitectura que está basada en el Internet por medio de la cual, como se muestra en la figura 2.9, se puede facilitar el intercambio de un sin número de información y datos entre software y hardware, mejorando con ello la comunicación entre objetos físicos y/o digitales y también entre personal [3], [20], [15], [21].

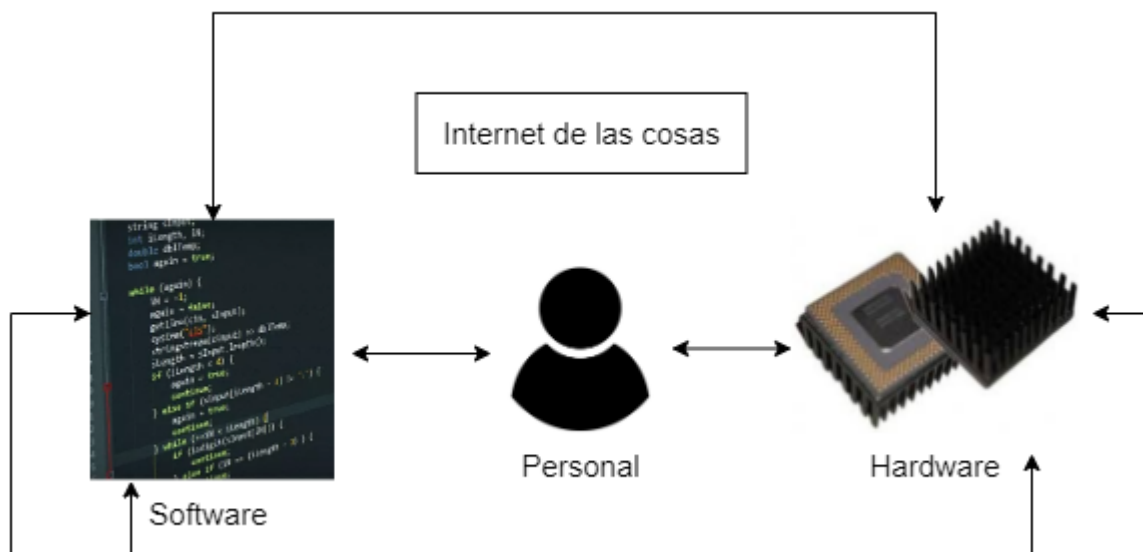


Figura 2.9. Comunicación entre objetos físicos, digitales y recursos humanos administrados por el Internet de las cosas

El IoT hace referencia a la conexión de dispositivos a través del internet que tienen la capacidad de recopilar e intercambiar información por medio de la integración de sensores [16], [3], [22]. Esta conexión e intercambio de información no se refiere únicamente a dispositivos móviles inteligentes como los smartphones o las tabletas,

sino que pueden conectarse todo tipo de aparatos electrodomésticos, electrónicos e incluso biomédicos [21], [22].

El objetivo del IoT es poder realizar control de objetos de manera remota, por lo que cualquier dispositivo que requiera el control por el IoT necesariamente debe tener la capacidad de conectarse a la web y enviar señales a través de sensores físicos por medio de softwares especializados para que el recurso humano se comunique con el elemento a controlar, o que los elementos se comuniquen entre sí remotamente a través de redes empresariales, industriales o de cualquier consumidor en general [20], [22].

Las principales ventajas del uso del IoT como sistema de automatización radican en la reducción de costos de operación, el aumento de la productividad y la expansión de mercado a través de nuevas tendencias o productos [22].

En términos económicos, los principales consumidores de esta nueva tecnología serían las industrias dado el nivel de automatización que esta nueva alternativa presenta. El ingreso se genera a través de los servicios que ofrece un sistema controlado por IoT, ya que éste requiere desarrollo de aplicaciones, hardware de control para dispositivos, la integración de los sistemas al software y a la web, espacio de almacenamiento de datos, seguridad y conectividad, mantenimiento y capacitaciones de uso [22].

El término de la seguridad es la mayor preocupación entre las empresas que requieren o que cuentan con un sistema IoT ya que sus datos y sus dispositivos pueden estar al alcance de ataques cibernéticos por lo que es de suma importancia trabajar en la seguridad de cualquier sistema que sea controlado a través del IoT [20], [22].

Esta tecnología es importante para el desarrollo del proyecto dado que la conexión a internet es un elemento fundamental para el correcto funcionamiento del sistema.



Relacionado al Internet de las cosas, se encuentra la siguiente tecnología de interés para este proyecto, que es la computación en la nube, la cual se describe a continuación.

### 2.2.3. Computación en la nube

El término cloud computing o computación en la nube, surgió por primera vez en 2006, de manos de EC2 de *Amazon* [57], y se describe como un entorno informático que permite el acceso y almacenamiento de datos y servicios en la red, a los cuales se puede acceder de forma local o remota [23], [24]. La figura 2.10 muestra gráficamente los dos grandes fuertes de esta tecnología.



Figura 2.10. Descripción gráfica de computación en la nube

Este tipo de servicios de red puede volverse muy rentable debido a su adaptación para ser utilizado por diferentes personas u organizaciones a través del uso de servidores remotos [24], [25].

Una de las características más llamativas del cloud computing es que permite utilizar el modelo de “Software como servicio”, que permite a las organizaciones utilizar una serie de aplicaciones que están constantemente administradas por terceros en lugar de software propio, haciendo que las operaciones de mantenimiento y actualización de software no les representen problemas, ya que de eso se ocupan los administradores del software remoto, además de que el almacenamiento no es en máquinas locales de las organizaciones, sino en una nube que es un espacio alquilado dentro de los servidores [25].

Esta tecnología tiene algunas variantes y derivaciones que vale la pena señalar, como la fabricación en la nube y el cómputo en la nube móvil, términos que se describen a continuación.

#### 2.2.3.1. *Fabricación en la nube*

La fabricación en la nube o Cloud Manufacturing es una derivación del cloud computing con la diferencia de que éste está centrado en los sistemas de manufactura [53]. De manera más específica, la manufactura en la nube puede definirse como un modelo de manufactura centrado en el cual el usuario puede formar pequeñas líneas de producción que son temporales y se pueden reconfigurar, mejorando con ello la eficiencia de producto, mientras al mismo tiempo los costos se ven reducidos [25]. Esta tecnología, además de permitir almacenar datos y acceder a ellos a través de la web, utiliza hardware especializado para distintas funciones [53].

La figura 2.11 muestra otro aspecto importante de esta tecnología que es la apertura que da a una fabricación como servicio, ya que, al tener la capacidad de virtualizar softwares de diseño o simulación y utilizar los propios servicios de manufactura, todo de forma remota, se puede tener un solo recurso de fabricación para varios usuarios, generando un servicio de fabricación a través de la nube que es administrado por terceros [25].

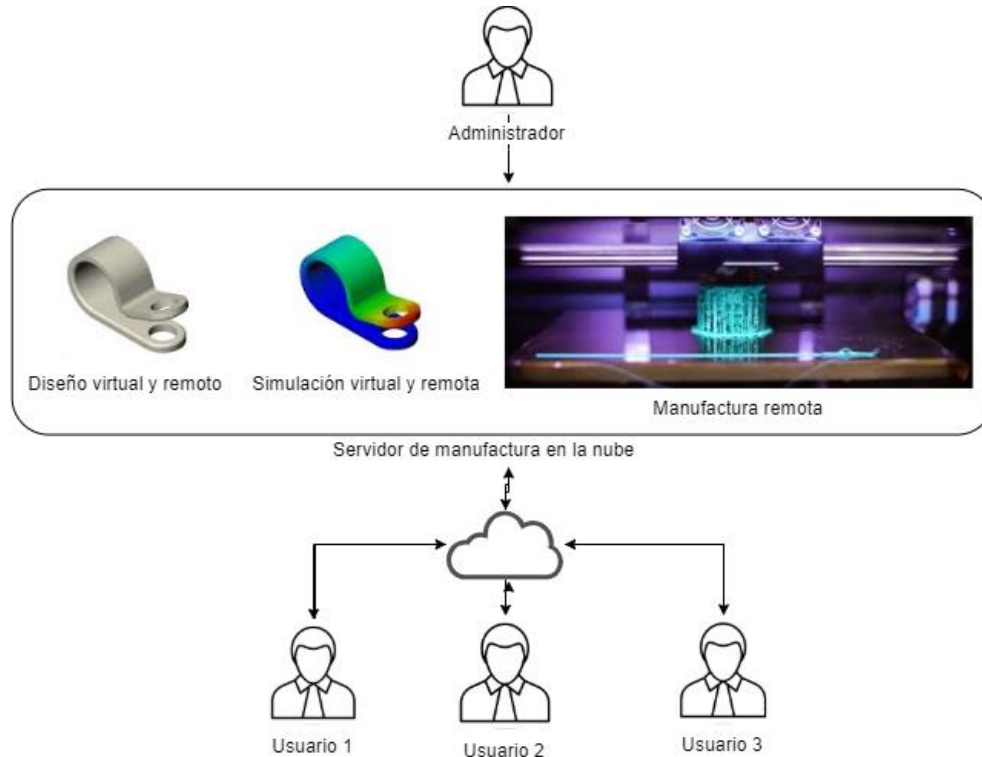


Figura 2.11. Sistema de distribución de servicio de manufactura en la nube

Como ventajas de esta tecnología se destaca la mayor distribución de la fabricación además de la capacidad de compartir recursos de fabricación a lo largo de esta misma [25].

### 2.2.3.2. Computación en la nube móvil

La computación en la nube móvil conocida como Mobile Cloud Computing (por sus siglas en inglés MCC) es una herramienta informática que sirve de apoyo para los servicios de nube que corresponden a los dispositivos móviles, esto a través de la combinación de la computación en la nube y los mismos dispositivos [26] [27]. El principal objetivo del MCC es extender los recursos de almacenamiento, energía y capacidad computacional de los dispositivos móviles, evitando con esto que las limitaciones perjudiquen el funcionamiento de dichos dispositivos debido a la carga de información, ya que las aplicaciones se ejecutan de forma remota a través de una nube [26]–[28].

Como se muestra en la figura 2.12, un modelo de MCC tiene tres principales elementos, el dispositivo móvil, la tecnología de comunicación y por supuesto, el servidor en la nube [26].



*Figura 2.12. Componentes principales del mobile cloud computing*

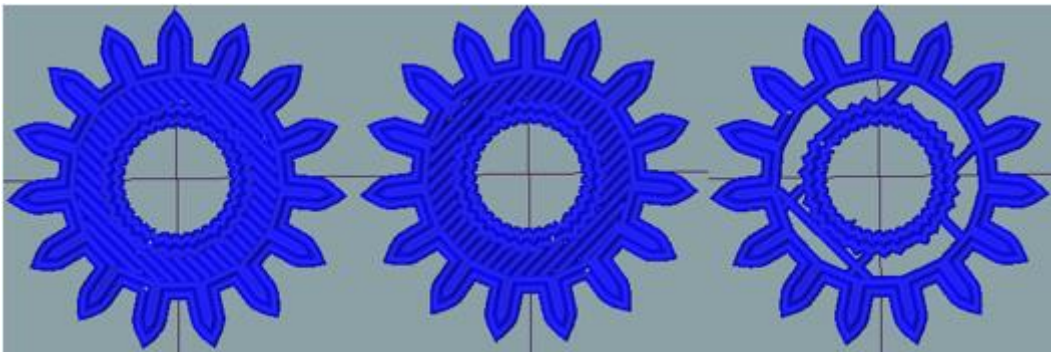
La tecnología de comunicación se refiere al método de conexión del dispositivo móvil, tal como puede ser el 4G o el Wi-Fi. Si este último está limitado debido a ciertas circunstancias, el dispositivo móvil hace uso de los servidores de la nube para realizar acciones computacionales con el menor recurso posible [26], [27].

Entre las ventajas de esta tecnología se encuentran la mayor duración de la batería de los dispositivos móviles, reducción en la carga de procesamiento de aplicaciones, capacidad de almacenar archivos en una nube en lugar de en el dispositivo e incluso seguridad de los archivos [28].

El cloud computing y las derivaciones descritas anteriormente son un elemento clave en el desarrollo del sistema de impresión 3D remoto, ya que, como se describe más adelante en el capítulo de Materiales y Métodos, se utiliza una plataforma nube como medio de impresión. La siguiente tecnología por describir es la manufactura aditiva, tecnología central del proyecto desarrollado.

#### 2.2.4. Manufactura aditiva

La fabricación aditiva, también llamada fabricación por capas, es un tipo de manufactura avanzada que ofrece la producción de objetos tridimensionales previamente creados en un modelo CAD y que realiza la pieza por medio de la adición de material, como puede ser la adición de capas, tal como se muestra en la figura 2.13 [29], [30]. De cierta manera, se puede decir que la manufactura aditiva representa a la Industria 4.0 como ninguna otra tecnología [52].



*Figura 2.13. Muestra de creación de capas en un software CAD*

Por lo regular, la fabricación aditiva tiende a reducir la generación de residuos en contraste con otros métodos de fabricación sustractivos [33].

Aun así, la fabricación aditiva también tiene algunas desventajas, entre las cuales destacan principalmente la precisión, la disponibilidad de materia prima específica para cada aplicación y las condiciones de acabado estético [33], [58].

La impresión 3D es un tipo de proceso de la manufactura aditiva (pues de vez en cuando se suelen confundir los términos, creyendo que son lo mismo), pero existen más procesos que permiten la creación de objetos tridimensionales a través de la adición de material [31]. Algunos de esos procesos son los que se mencionan a continuación.

- Fotopolimerización de tinta

El primero de los procesos de manufactura aditiva. Este proceso es conocido también como la estereolitografía (SLA) o procesamiento de luz digital (DLP) y consta del endurecimiento con luz de un fotopolímero (plástico) líquido que se encuentra en un contenedor [31], [32].

- Goteo de materiales

También conocido como Multi Jet Modeling (MJM) este proceso se asemeja a la impresora de chorro de tinta. El material es depositado en gotas y es endurecido a través de luz ultravioleta [31], [32].

- Fusión de lecho de polvo

A este proceso se le conoce por varios nombres, como Electron Beam Melting (EBM), Selective Laser Sintering (SLS) o Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Este proceso se realiza depositando una capa de polvo de material sobre una plataforma utilizando un láser para fusionar y endurecer el polvo [31], [32].

- Jetting Binder

Similar a la fusión por lecho de polvo, este proceso se diferencia de este último porque en lugar de láser, se utiliza agente líquido aglutinante donde también puede incluirse tinta para dar color a las piezas [31].

- Laminación de hojas

Conocido también como Fabricación de objetos laminados (LOM) o consolidación ultrasónica (UC) este procedimiento utiliza un láser o un cuchillo para cortar finas láminas de material previamente unidas con pegamento o soldadura ultrasónica, desechando el material innecesario para dar forma a la pieza deseada [31], [32].

- Deposición de energía dirigida

Generalmente utilizada para metales, este proceso crea las piezas a través de la fusión de material mediante energía térmica al momento de ser depositado [31].

- Extrusión de material

Este es el proceso mejor conocido como la impresión 3D, aunque también se le llama Modelado de deposición fundida (FDM). En este tipo de fabricación aditiva, un cable de plástico es introducido en un cabezal que funde el material para después realizar una extrusión del mismo sobre una plataforma de construcción [31].

Este último proceso de manufactura aditiva es el de interés para este proyecto, por lo cual se procede a describir de manera más amplia en la siguiente sección.

## **2.3. Impresión 3D FDM**

La impresión 3D hace referencia a un grupo de tecnologías de fabricación que utilizan distintos tipos de materiales para la creación de un objeto tridimensional a partir de la adición de capas superpuestas y un previo diseño digital [33]–[35], [40], [32].

Las siguientes secciones muestran temas relacionados a la impresión 3D, tales como la historia de ésta, los materiales que utiliza, las aplicaciones que tiene, el modo de operación y un poco sobre las diferencias que tiene en comparación con los métodos de manufactura tradicionales.

### **2.3.1. Historia de la impresión 3D**

La impresión 3D tiene sus orígenes desde 1984, cuando Charles Hull invento el proceso de la estereolitografía que consta de la adición de capas de material mediante fotopolimerización utilizando un láser ultravioleta [31], [32], [34]. Chuck Hull también

fue el desarrollador del formato digital STL (Estándar Triangle Language) que es el formato universal en los softwares de impresión 3D.

A mediados del año 1990, las universidades de Stanford y Carnegie Mellon desarrollaron nuevas técnicas de deposición de materiales, se reforzaba a través de nuevas técnicas de geometría de objetos, permitiendo la fabricación de moldes y plantillas que se generaban mucho más rápido que con los métodos tradicionales de fabricación [31], [32], [34].

Para el año 2000, la mejora de los procesos aditivos causó que éstos comenzaran a considerarse como una alternativa a la eliminación de material, cambiándolo por adición. Es en este periodo que el término de manufactura sustractiva comenzó a utilizarse para definir a los procesos de eliminación, por lo que en este punto se utiliza también el término manufactura aditiva para los procesos de adición [31], [32], [34].

No fue hasta el año 2010 que el término “impresión 3D” se adoptó como el nombre popular y significativo de esta tecnología [31], [32].

La figura 2.14 muestra de manera gráfica la evolución de la impresión 3D, mostrando los años en que cada acción ocurrió.

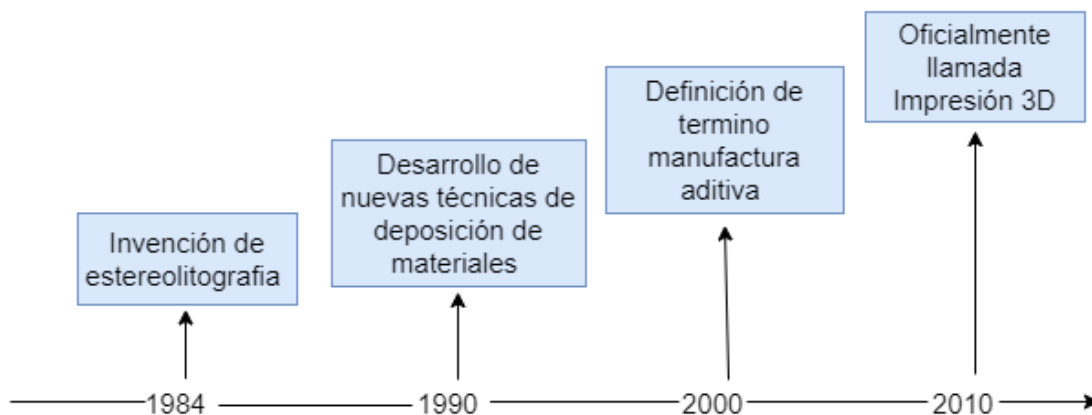


Figura 2.14. Historia de la impresión 3D



### 2.3.2. Modo de operación de impresión 3D FDM

Para realizar el proceso de la impresión 3D de deposición fundida, también conocida como extrusión de plástico [32], es necesario contar con un modelo 3D obtenido a través de documentos digitales el cual es el archivo STL [32]. Los pasos principales de la impresión 3D son los mostrados en la figura 2.15 [31], [36]:

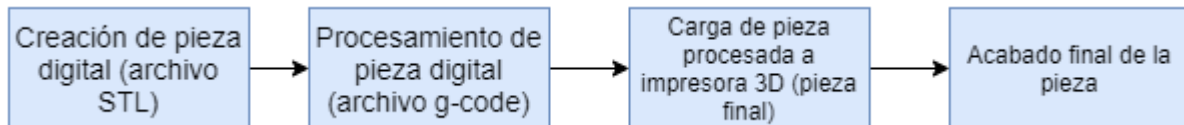


Figura 2.15. Pasos de operación para una impresión 3D

Para el primer paso, se utilizan distintos tipos de softwares según el nivel de conocimiento y complejidad de lo que se quiere realizar [31]. Se tiene, por ejemplo, *Sketch Up* para un nivel principiante y un *SolidWorks* para un proyecto más profesional [31]. Estos softwares permiten la creación del objeto desde cero, aunque también se puede utilizar un escáner 3D para digitalizar objetos físicos [31], [32].

El segundo paso se refiere a la preparación de los archivos digitales para ser impresos, esto es, la transformación de un archivo digital a un archivo que es leído por la impresora 3D, llamado G-code, el cual incluye, entre otras cosas datos como la creación de las capas, así como el número de éstas, soportes, rellenos, etc. Programas como *Slic3er* o *CuraEngine* se utilizan para este proceso [31], [36].

En el tercer paso se carga el archivo G-code a la impresora 3D, y la pieza esta lista para ser impresa. Las impresoras tienen un firmware que realiza las interpretaciones del G-code transformándolo en el objeto tridimensional deseado. Al final, se obtiene la pieza diseñada pero en físico [31], [36].

El último paso es más estético que necesario, a no ser que la pieza creada contenga soportes, ya que en este paso la pieza se pule, se pinta o se retoca de forma que quede lo más presentable posible [31].

De una manera general, esos son los pasos de operación de la impresión 3D.

### **2.3.3. Materiales para impresión 3D**

La impresión 3D utiliza distintos tipos de materiales para la creación de los objetos tridimensionales que van desde plásticos (lo más utilizado) hasta metales o incluso cerámicos [31], [37]. Otros materiales que no son tan comunes aún son la madera, papel, concreto o incluso productos comestibles [31].

Además de los materiales listados, existen otros que son la tendencia a utilizar, dichos materiales aún están en fase de estudio como silicona, grafito, biomateriales o materiales conductores de electricidad [31].

Algunos de los plásticos utilizados son el polilactida (PLA), el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), el elastómero termoplástico (TPE), o el Nylon [31], [37].

En la figura 2.16 se puede observar una pequeña clasificación de algunos de los materiales que se pueden utilizar para la impresión 3D.

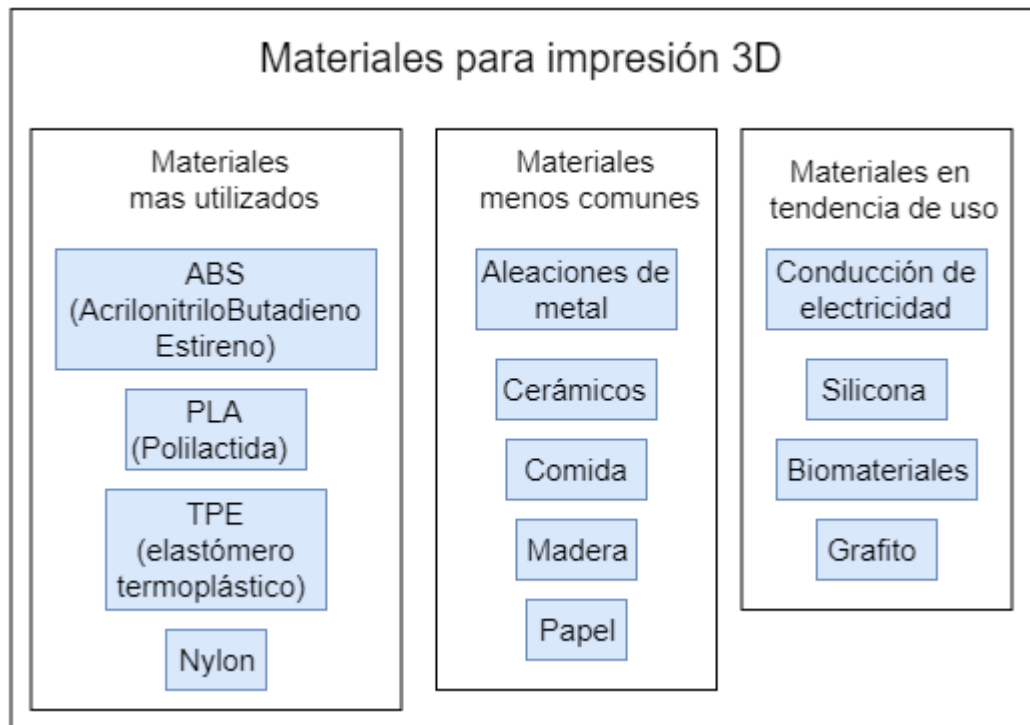


Figura 2.16. Clasificación de algunos materiales para impresión 3D

Los materiales son seleccionados según la pieza que se va a fabricar, ya que depende enormemente si es un prototipo de adaptación, piezas para reemplazar, si son para soportar cargas, etc. También depende del costo y cotización de la pieza, así como las elecciones dadas por el usuario final [37].

#### 2.3.4. Aplicaciones de la impresión 3D

En la figura 2.17 se pueden observar algunos de los grupos en los cuales la impresión 3D está tomando importancia:

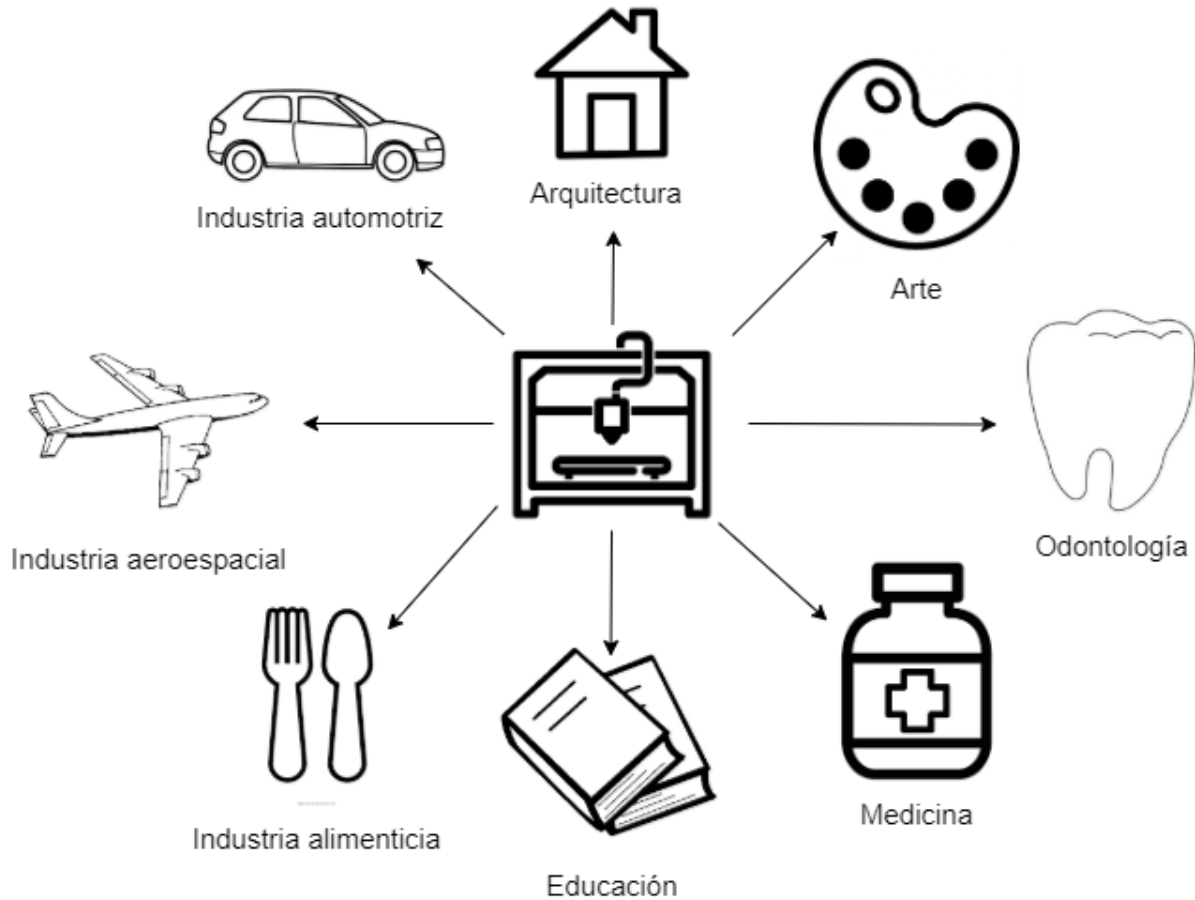


Figura 2.17. Algunas áreas de aplicación de la impresión 3D

En el área de arquitectura, la impresión 3D ha permitido mejorar el diseño de las maquetas haciéndolo más fácil y rápido además de la proyección de construcción de casas [34]. Dentro de la industria automotriz se pueden fabricar diferentes tipos de piezas para automóviles o incluso automóviles enteros [34]. Mientras que en el área de la industria aeroespacial la impresión 3D permite producir partes de las aeronaves o incluso aportar ayuda para la fabricación de las piezas de las estaciones espaciales [34]. En lo que respecta al ámbito alimenticio, existen impresoras que pueden imprimir ingredientes líquidos o en polvo [34]. Para la parte de educación, existen fabricantes de impresoras 3D que pretenden que en cada escuela haya por lo menos una impresora 3D con el afán de aumentar el crecimiento de la industria mediante la motivación en las instituciones académicas [34]. Quizá una de las áreas más beneficiadas por la impresión 3D es la medicina, ya que los usos que tiene la tecnología van desde la fabricación de órganos blandos hasta trasplantes óseos e

incluso implantes metálicos realizados con impresoras 3D [34]. Por último, en el área del arte, se ha utilizado la impresión 3D para la recreación de algunas piezas de arte para su exhibición en museos, además de utilizar la misma impresión 3D como un nuevo método para expresar arte [34].

### **2.3.5. Diferencias de la impresión 3D con procesos de manufactura convencionales**

Al ser una tecnología en constante mejora, la impresión 3D tiene una serie de ventajas sobre los métodos tradicionales de fabricación. Una de las más notorias es la adición de material en lugar de la eliminación [32]. Aun así, se pueden listar otras tantas, como:

- Aumento en la rapidez de fabricación y ahorro de capital de moldes, plantillas y accesorios [31].
- Al realizarse las piezas sobre pedidos y en el momento, se reduce la necesidad de almacenamiento de piezas [34].
- Las actividades de dirección y monitoreo son más importantes que las operaciones de producción [38].
- Se puede realizar la fabricación de piezas personalizadas para ser utilizadas en aplicaciones específicas según se requiera [39].
- El tiempo de producción es más corto [39].
- Las piezas que se pueden fabricar pueden tener geometrías que no pueden hacerse tan fácilmente con algún otro método de fabricación [39].
- Este tipo de tecnología no es exclusiva de grandes organizaciones, ya que también está diseñada para sectores no industriales [39].
- Reducción de costos de producción [34].
- Una de las características más importantes hoy en día, es una tecnología amigable con el medio ambiente [34].

La figura 2.18, se muestra de manera más grafica las ventajas de la impresión 3D:

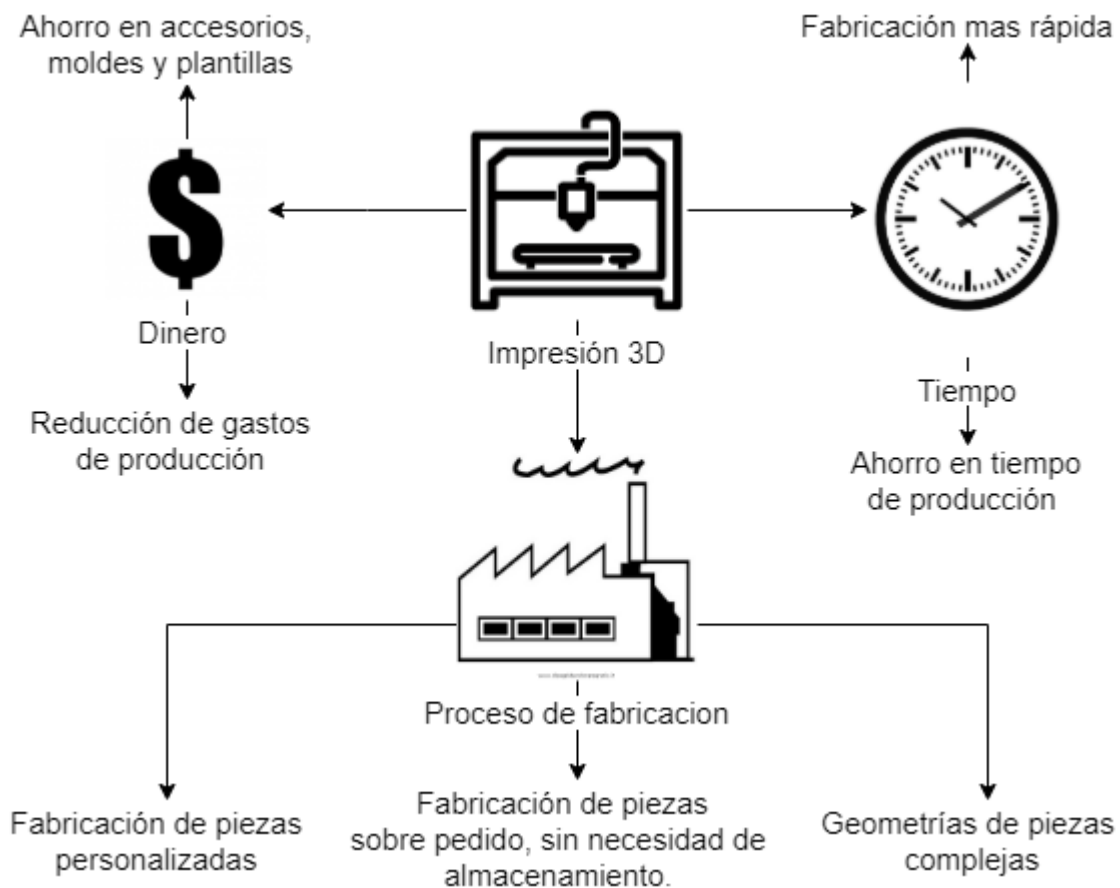


Figura 2. 18. Algunas ventajas de la impresión 3D en comparación con los métodos tradicionales de fabricación

Una vez estudiado el tema de la impresión 3D, se procede a estudiar las máquinas que hacen posible que esta tecnología se realice, que son las impresoras 3D, por lo que, en la siguiente sección se realiza una descripción de éstas, mostrando los temas más destacados. Siguiendo la misma línea, las impresoras 3D estudiadas son las de FDM.

## 2.4. Impresoras 3D FDM

Una impresora 3D se puede considerar un tipo de robot industrial [32], aunque de manera más concreta, es una máquina que tiene la capacidad de crear piezas tridimensionales a partir de un modelo realizado en una computadora, por decirlo de otra manera, puede crear archivos digitales en prototipos reales [40].

Estas máquinas suelen ser fabricadas y distribuidas por un gran número de empresas y en diferentes marcas, pero en general, existen cuatro modelos diferentes para clasificarlas, que son *Box Bots*, *RepStraps*, *Upstarts* y *RepRap* [37]. En particular, para el caso de este proyecto, se enfoca el estudio en las impresoras de modelos *RepRap*.

Las impresoras 3D *RepRap* se caracterizan por ser máquinas de código abierto y de bajo costo, pero con un rendimiento medio a alto [36]. Estas impresoras fueron diseñadas para recibir las ordenes de una computadora con algún software de impresión o de una memoria microSD, por lo que es necesario contar con alguno de estos elementos para la impresión de modelos [36]. Esta clase de impresoras 3D utilizan la deposición fundida (FDM) como medio principal de manufactura aditiva, caracterizándose por el uso de una boquilla como fuente de depósito del material [36]. Otra característica de estas impresoras es que requieren mantenimiento constante pues algunas de sus piezas están hechas de impresión 3D, lo que puede generar ciertas malas calibraciones y por lo tanto, la leve disminución de la calidad de las piezas finales [37].

### 2.4.1. Componentes de una impresora 3D FDM

Una impresora 3D tipo *RepRap* está conformada por distintos elementos según el modelo o marca pero por lo general los elementos principales son los mostrados en la figura 2.19 [40]. La forma, tamaños y distribución pueden variar, pero los elementos son esenciales para el correcto funcionamiento de la impresora [40].

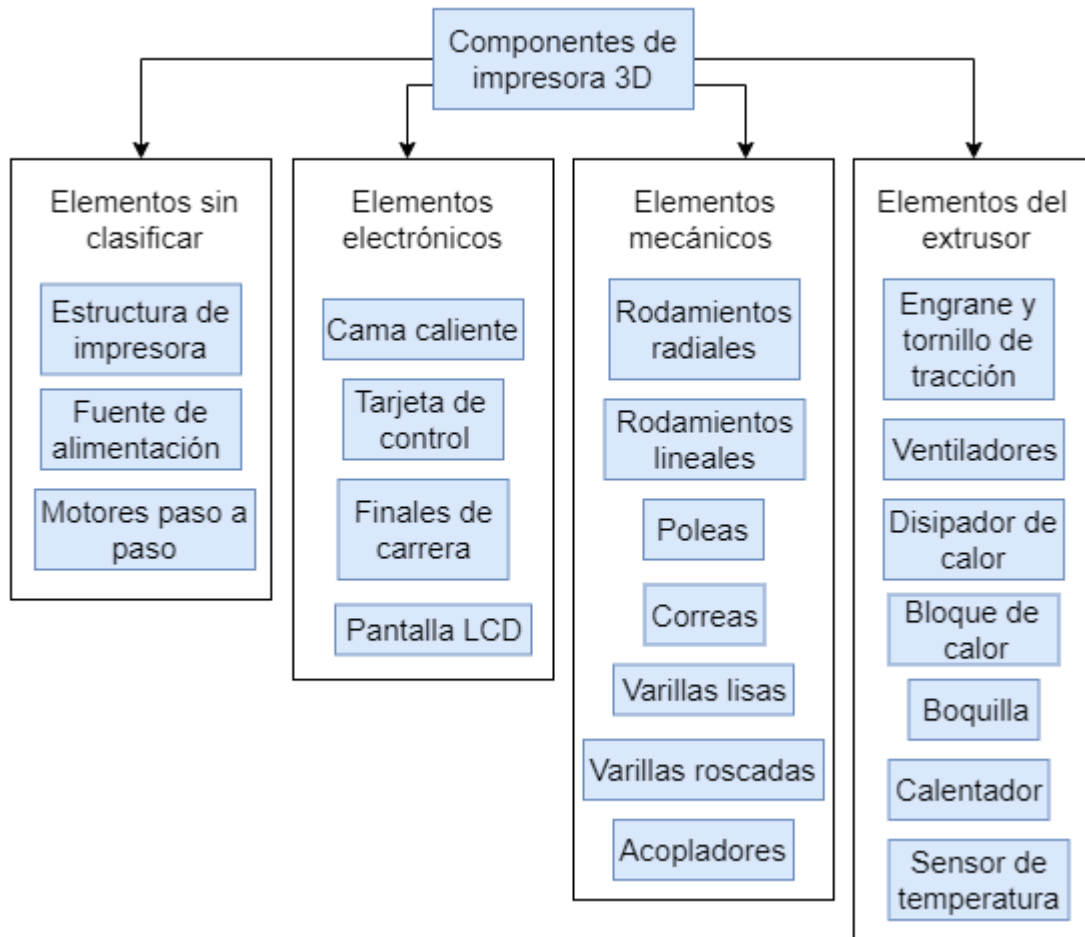


Figura 2.19 Esquema de partes generales y más comunes de una impresora 3D FDM

A continuación, se describen los elementos de manera más amplia, mostrando gráficamente los elementos que se van mencionando, utilizando como ejemplo la impresora 3D que ha sido utilizada para el desarrollo del proyecto.

#### 2.4.1.1. Elementos sin clasificar

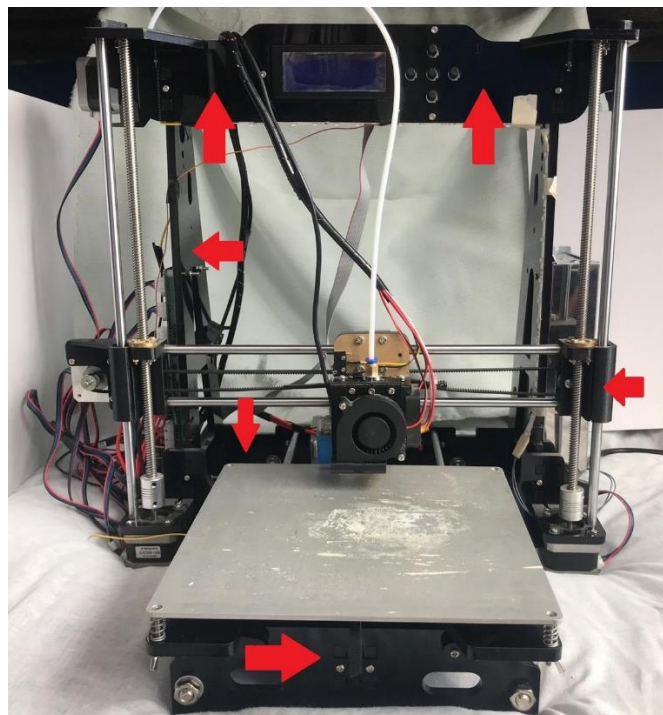
Los elementos sin clasificar se refieren a aquellos elementos que son esenciales para que la impresora 3D funcione, fuera de todos los demás elementos [40].

##### Estructura de impresora

La estructura es la parte más grande de la impresora y es la que le da soporte a toda la máquina y a los elementos que la componen. Existen versiones en diferentes tipos



de material [40]. Por lo general, la estructura principal soporta algunos motores, cama, pantalla, etc., pero algunos de los elementos requieren otras partes que no están unidas directamente a la estructura principal (como la estructura que soporta el extrusor), pero siguen siendo elementos estructurales [40]. La figura 2.20 muestra a través de las flechas la estructura de la impresora, que básicamente es el cuerpo y soporte de los demás elementos.



*Figura 2.20. Estructura de la impresora 3D*

### Fuente de alimentación

La fuente de alimentación administra energía a la impresora. Por lo regular operan con un voltaje de 12 voltios y a una corriente entre los 20 y 30 amperes [40]. Un ejemplo de una fuente de alimentación puede observarse en la figura 2.21.

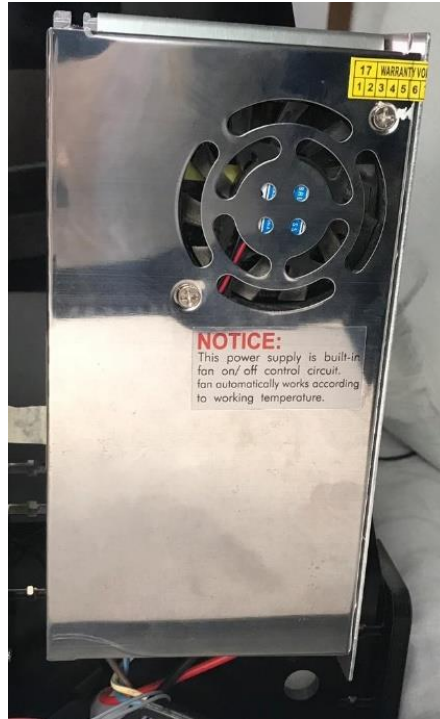


Figura 2.21. Fuente de alimentación

### Motores paso a paso

Las impresoras 3D contienen varios motores paso a paso para controlar diferentes acciones [37], [40]. Por lo regular, estos motores suelen ser motores NEMA 17, los cuales son controlados por controladores que están ubicados en la tarjeta electrónica de la impresora [37]. La figura 2.22 muestra uno de los motores.



Figura 2.22. Ejemplo de motor de impresoras 3D

La impresora cuenta con uno de estos motores para el extrusor, que se encarga de empujar el filamento y llevarlo a este último; dos motores controlan el movimiento en el eje Z para subir y bajar este eje; uno se encarga del control en X que es de izquierda a derecha y viceversa; por último, un motor más controla en movimiento en el eje Y, el cual se mueve hacia adelante y hacia atrás [37], [40]. La figura 2.23 muestra la colocación de dichos motores, exceptuando el del eje Y.

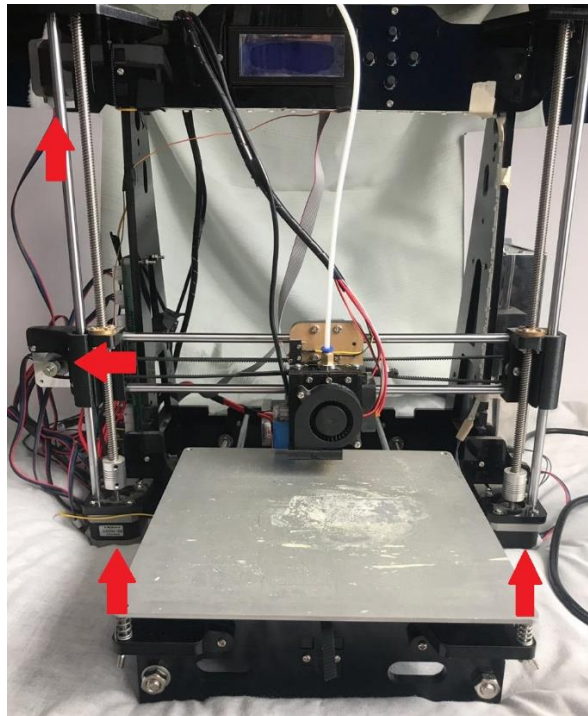


Figura 2.23. Ejemplo de colocación de motores en los ejes de la máquina

#### 2.4.1.2. Elementos electrónicos

De manera sencilla y general, los elementos electrónicos se encargan del control de ciertos parámetros de la impresora 3D, tales como movimiento de motores, calentamiento de elementos, etc. [40]. Los elementos se describen y se muestran a continuación:

## Cama de impresión

La cama de impresión se encarga de mantener las primeras capas de la pieza adheridas a través del calor que les transfiere. Tiene un termistor que calienta la cama. Por lo general está hecha de aluminio [37], [40]. En la figura 2.24 se muestra la cama por la parte superior:

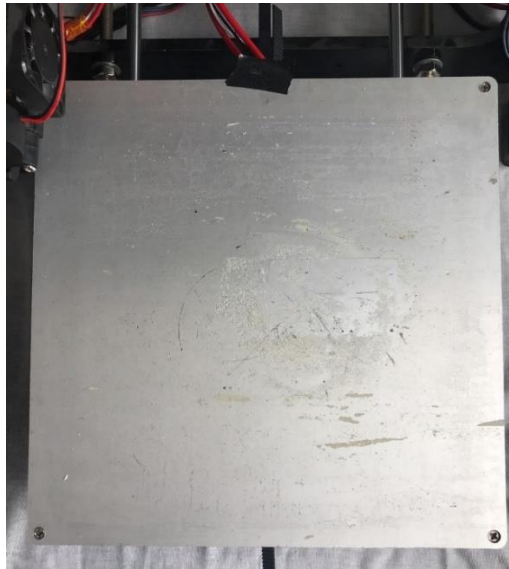


Figura 2.24. Parte superior de la cama de impresión hecha de aluminio

Como se muestra en la figura 2.25, la cama está fija al eje Y de la impresora a través de un conjunto de tornillos, un muelle y una mariposa, ésta además de mantenerla fija, sirve como medio de calibración [40].

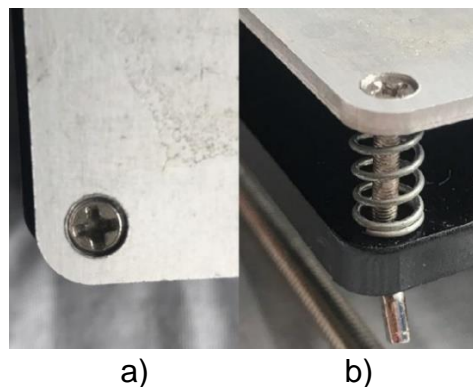


Figura 2.25. Tornillos de sujeción de cama de impresión, a) vista superior, b) vista de todos los elementos

## Tarjeta de control

La tarjeta electrónica se encarga del control de los procesos de la impresora 3D. Motores, finales de carrera, extrusor, la cama, la pantalla y las temperaturas son controladas por esta tarjeta [40]. Un ejemplo de una tarjeta electrónica se puede ver en la figura 2.26.



Figura 2.26. Ejemplo de una tarjeta electrónica de impresora 3D

## Finales de carrera

Estos dispositivos se colocan en los ejes de la impresora, por lo regular es uno para cada eje. Sirven para limitar el movimiento de los ejes, impidiendo que se muevan más de donde deben, además de servir para colocar los ejes de la impresora en estado de reposo, lo que se conoce como “home” u origen [40]. Se pueden ver los finales de carrera instalados en el eje Y y el eje X en la figura 2.27.



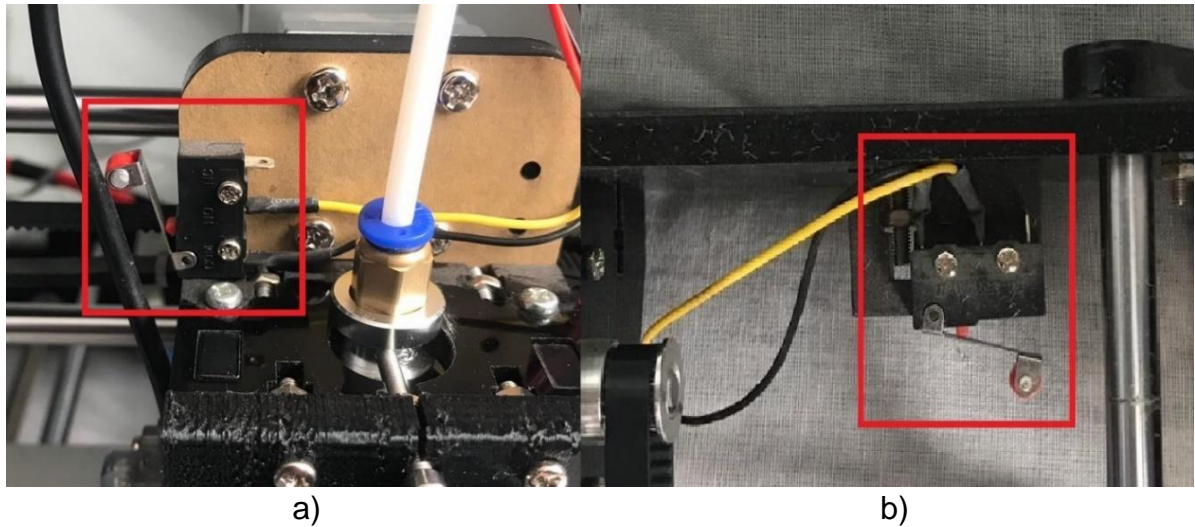
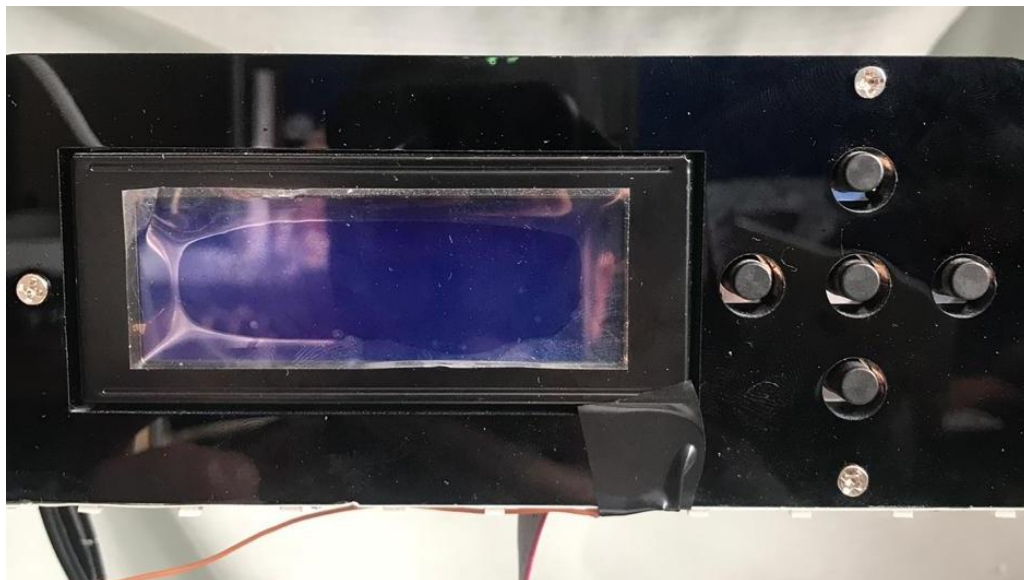


Figura 2.27. Finales de carrera, a) para el extrusor, b) para la cama de impresion

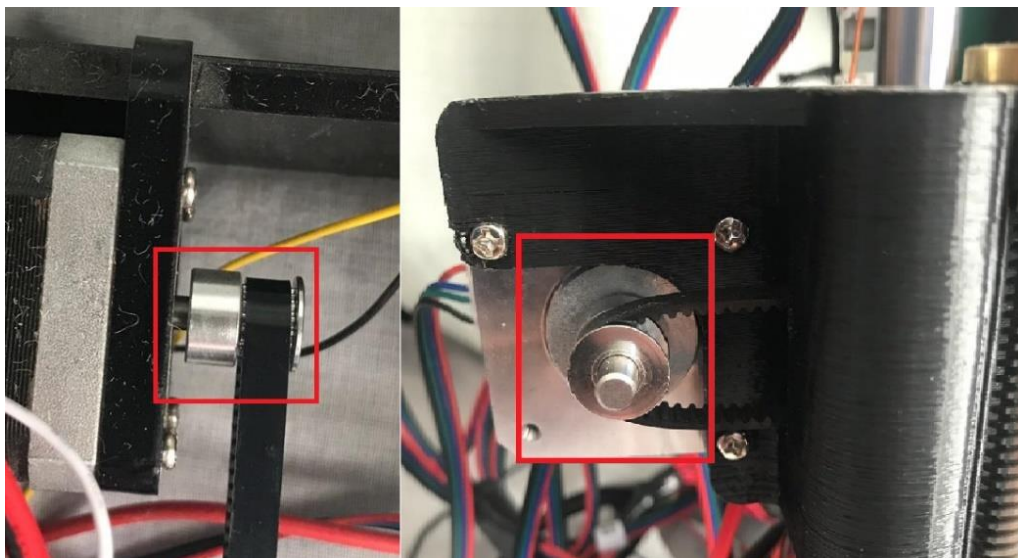
### Pantalla LCD

Esta pantalla se conecta directamente a la tarjeta de la impresora. Contiene un lector de memoria SD para permitir la impresión directa de archivos. Sirve para controlar y observar parámetros de la impresora [37], [40]. La figura 2.28 muestra una pantalla LCD con botones que sirven para controlar ciertos parámetros.



### 2.4.1.3. Elementos mecánicos

Estos elementos se encargan de apoyar en los desplazamientos de los ejes, sobre todo. Los elementos no están controlados por la tarjeta electrónica, pero ayudan a que el movimiento realizado por ésta sea más fácil de realizar [40]. Estos elementos son los rodamientos radiales, rodamientos lineales, poleas, correas, varillas (lisas y roscadas) y acopladores [40]. Algunos de estos elementos se muestran en las figuras 2.29 a la figura 2.33.



a) b)  
Figura 2.29. Poleas; a) en el eje X, b) en el eje Y



a) b)  
Figura 2.30. Correas; a) en eje X, b) en el eje Y

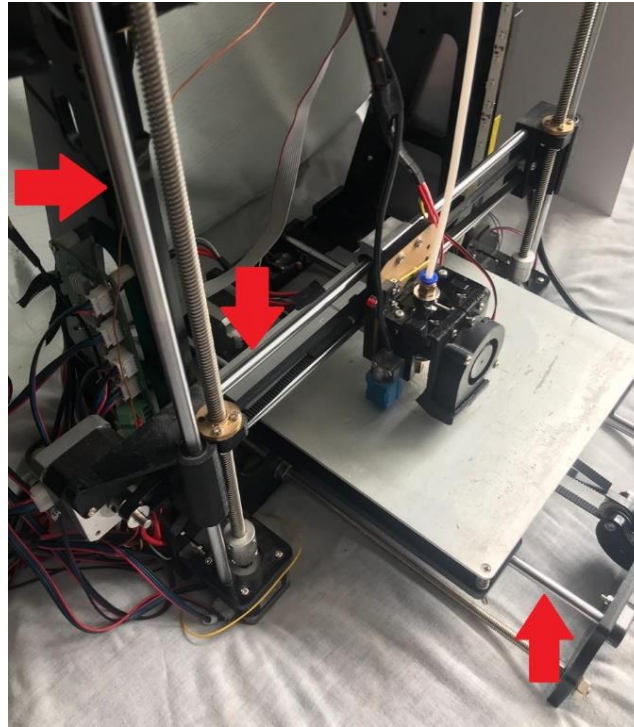


Figura 2.31. Varillas lisas ubicadas en los ejes distintos ejes de la impresora

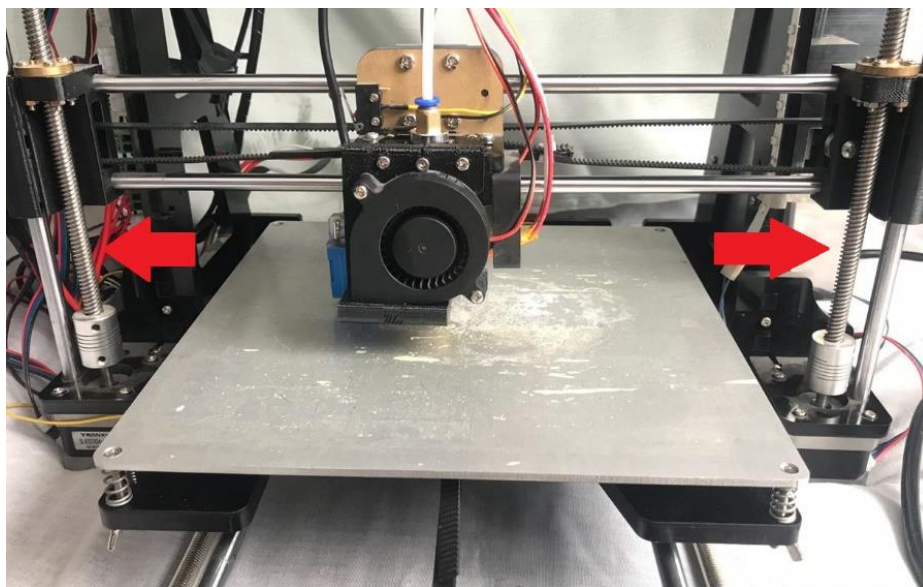


Figura 2.32. Varillas roscadas ubicadas solo en el eje Z



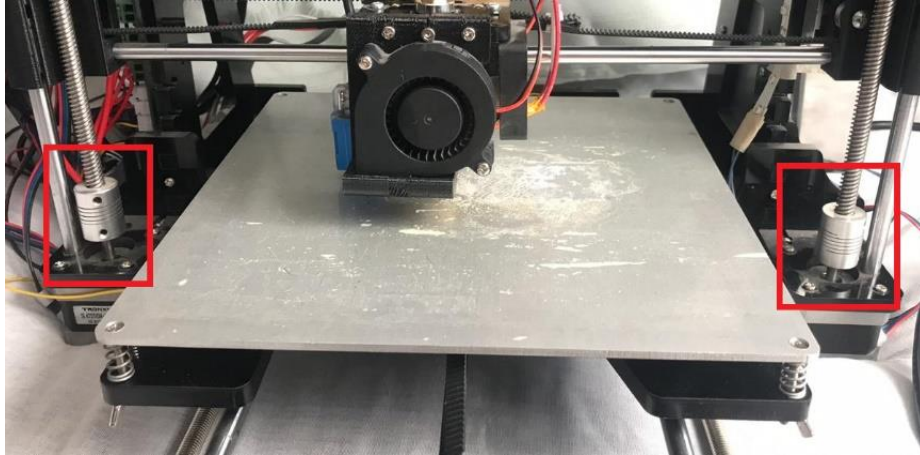


Figura 2.33. Acopladores para varillas roscadas de eje Z

#### 2.4.1.4. Elementos del extrusor

El extrusor es el elemento en el cual se realiza el calentamiento y extrusión del filamento [34], [39], [40]. La figura 2.34 muestra el extrusor completo, aun así, el extrusor se compone de diferentes elementos, los cuales se explican en las secciones siguientes.

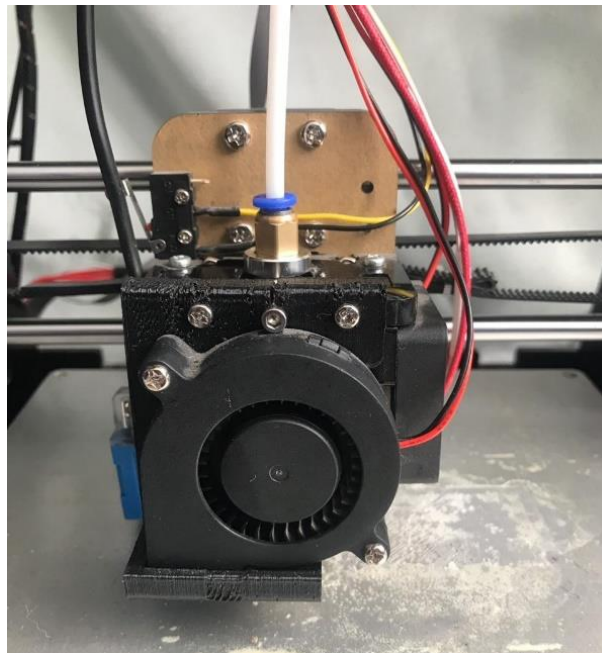


Figura 2.34. Extrusor

## Engrane y tornillo de tracción

Estas piezas se acoplan al motor NEMA que controla el empuje del filamento. Ambos en conjunto ayudan a traccionar el filamento para el desplazamiento de éste, pues lo presionan para detener o continuar con el movimiento según se requiera, controlados por el movimiento del motor [40]. A pesar de que no se pueden observar detenidamente, la figura 2.35 muestra la ubicación del engrane y tornillo de tracción, en la imagen se aprecia mejor el tornillo.

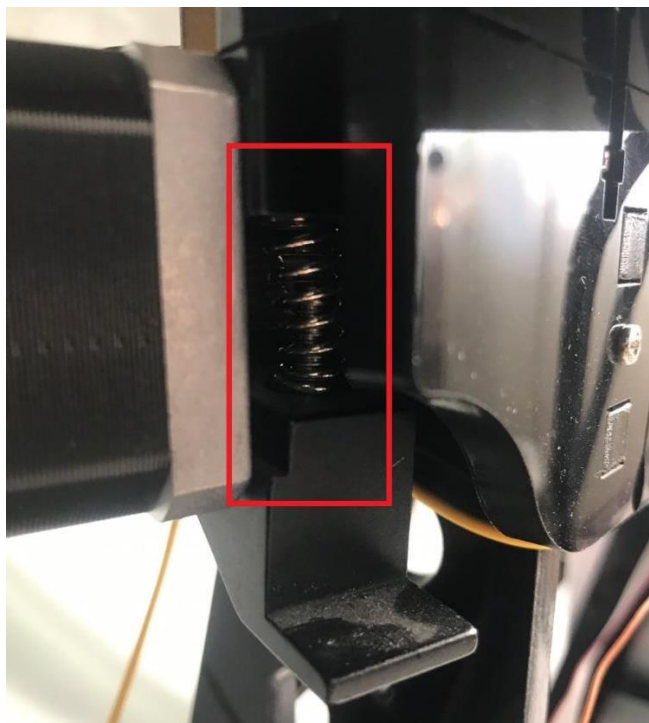
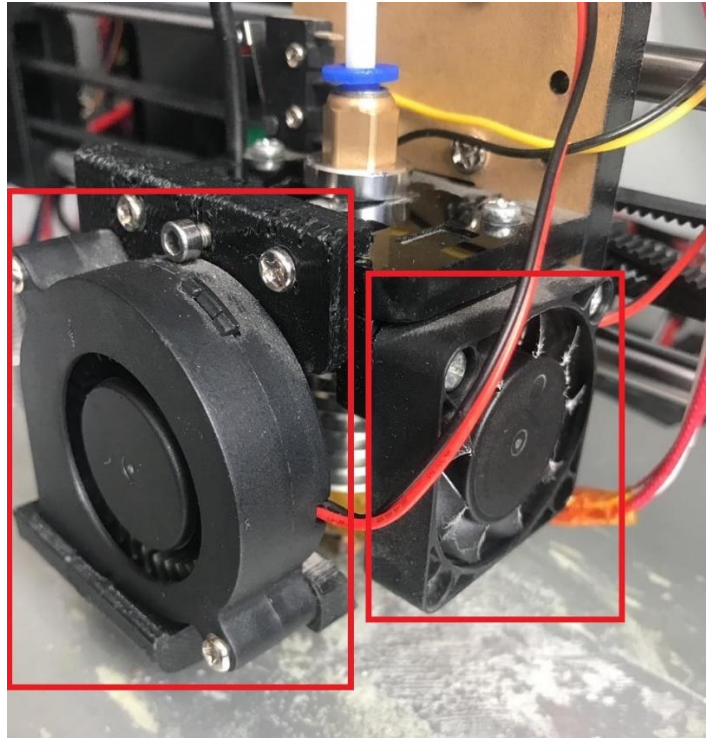


Figura 2.35. Ubicación del engrane y tornillo de tracción

## Ventiladores

Algunos extrusores contienen ventiladores que regulan la temperatura de los engranes, la guía del filamento e incluso este mismo cuando ha sido extruido. Dichos ventiladores son controlados directamente por la tarjeta de la impresora [40]. En la figura 2.36 se pueden observar los ventiladores, por lo regular suelen ser dos uno ubicado en el frente y otra en uno de los costados.



*Figura 2.36. Ventiladores del extrusor*

En esta parte se van a describir los elementos principales del extrusor, que prácticamente están conectados entre sí. Estos elementos son el disipador de calor, el bloque de calor y la boquilla.

Se puede decir que este es el verdadero extrusor, debido a que es el elemento que mantiene la temperatura y permite que el filamento sea calentado sin comprometer otros elementos de la máquina pues está diseñado para que la temperatura sea la ambiente en la parte superior [39]. En la figura 2.37 se muestran las partes mencionadas anteriormente y después se describen de manera individual:

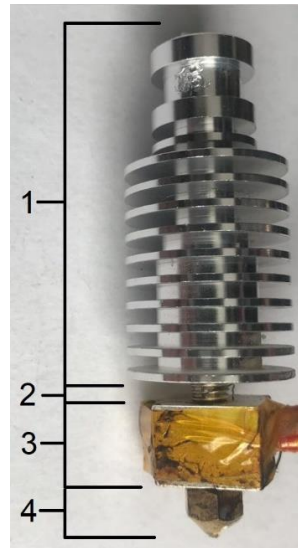


Figura 2.37. Extrusor directo

1. Disipador de calor: gracias a la forma que tiene, disipa el calor por medio de convección, siendo la parte más baja la de mayor temperatura, haciendo que su extremo superior quede a temperatura ambiente [39], [40].
2. Rotura de calor: una parte pequeña cuya tarea es evitar que el calor se transfiera en su totalidad al disipador, manteniendo la máxima temperatura junto al bloque de calor. A pesar de que disipa la mayor cantidad de calor, no es suficiente, por eso es necesario el disipador [39].
3. Bloque de calor: es el elemento más importante del extrusor. Tiene dos orificios en los que se inserta el calentador y un sensor de temperatura y se encarga de administrar el calor a la boquilla y al filamento para que éste se derrita y pueda iniciarse el proceso de impresión 3D [37], [39], [40].
4. Boquilla: es el elemento de salida del filamento. Es a través de ésta que el filamento se deposita en las respectivas capas. Se debe tener cuidado de que no esté tapada pues impide la salida del filamento, además, su temperatura debe mantenerse constante para que el filamento pueda ser extruido [37], [39], [40].

### Calentador

Se encarga de calentar el bloque de calor [39], [40]. También se ocupa de mantener las temperaturas constantes para evitar variaciones que afecten a las piezas que están siendo fabricadas. Funcionan gracias a la retroalimentación que reciben de la tarjeta de la impresora y el sensor de temperatura [39].

## Sensores de temperatura

Se encarga de medir la temperatura del bloque de calor y monitorearla para compararla con la establecida por el usuario y apagar, encender o mantener la temperatura administrada por el calentador [39], [40].

Hasta esta parte llega la descripción de la impresora 3D, elemento fundamental del sistema propuesto. La sección siguiente se encarga de describir otro de los elementos esenciales para el desarrollo del sistema, los dispositivos móviles.

## **2.5. Dispositivos móviles**

Desde la última década, los dispositivos móviles se han convertido en elementos indispensables para la vida diaria de los seres humanos [41]. En la actualidad, estos dispositivos se han convertido en una tendencia para descargar y utilizar todo tipo de aplicaciones y herramientas digitales [42], [43]. Es en base a estas aplicaciones que los dispositivos móviles se están convirtiendo en la mayor tendencia de comunicación de la vida cotidiana [26], principalmente los teléfonos inteligentes ya que admiten distintos tipos de protocolos de comunicación, entre ellas el Wi-Fi, que es lo que permite que se utilicen para aplicaciones más variadas [20].

El desarrollo de los dispositivos móviles se ha incrementado considerablemente gracias a los avances en nanotecnología y de la red de internet, ya que los dispositivos móviles se transforman en pequeñas computadoras con sistemas operativos que, a pesar de estar enfocados al entretenimiento y comunicación, permiten la ejecución de un sin fin de aplicaciones de todo tipo, permitiendo que la tendencia de uso sea cada vez mayor [44].

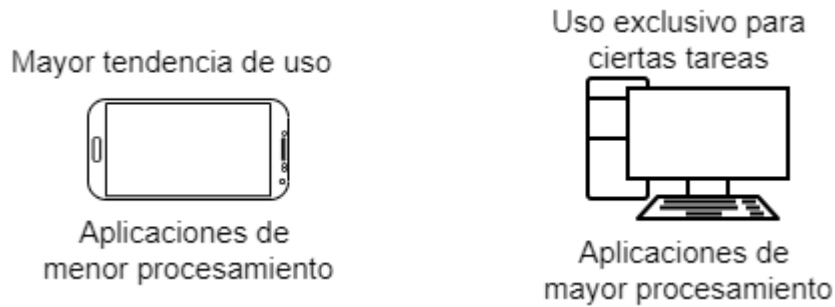


Figura 2.38. Diferencias en el uso de dispositivos móviles y equipos de cómputo

Es debido a esta popularización en el uso de dispositivos móviles que, como se puede observar en la figura 2.38, se comienzan a utilizar más que los equipos de cómputo (no tanto las computadoras portátiles) pues estos últimos se utilizan más para tareas que requieren mayor procesador y tareas más enfocadas en usos laborales o profesionales [44]. A pesar de esto, los dispositivos móviles están constantemente aumentando la potencia y sus capacidades para soportar aplicaciones cada vez más complejas, y dado que están siendo apoyados por el uso de redes móviles e incluso aplicaciones en la nube, pueden llegar a servir como apoyo para los equipos de cómputo [44].

Otra de las características que ayuda a la popularización del uso de los dispositivos móviles es la uniformidad de los sistemas operativos que éstos utilizan. Es gracias a esta uniformidad que es más sencillo para un usuario acostumbrarse al uso de diferentes teléfonos inteligentes o tablets, ya que el sistema operativo tiende a ser lo más parecido posible para facilitar su entendimiento [44].

Como características principales de los dispositivos móviles se pueden destacar la siguientes:

- Cada vez más tienden a ser de menor tamaño y peso, pero aumentan las capacidades para realizar diferentes tareas [44].
- Su flexibilidad de uso y la capacidad de instalar aplicaciones personalizadas para cada usuario, según lo que se requiera [20], [43], [44].

- Su manejo, ya que al sustituir teclas por una pantalla táctil e incluso la interacción de voz o de tacto, son más sencillo de manejar que una computadora [44].

### 2.5.1. Red móvil

En la actualidad, la demanda de redes inalámbricas de una mayor velocidad de transmisión, mayor ancho de banda y menor tiempo de respuesta se debe principalmente a la popularización de los dispositivos móviles [44]. Por lo regular, estos dispositivos cuentan con tres distintos medios de conexión inalámbrica (figura 2.39) [44].



Figura 2.39. Tecnologías de red móvil

La telefonía móvil, o el 3G y ahora en crecimiento el 4G, funciona a través del envío de ondas de radio de diferentes frecuencias que se distribuyen por medio de antenas de telefonía [44], [59]. El dispositivo actúa al mismo tiempo como emisor y receptor, conectándose a la antena más próxima y que le permita tener la mejor cobertura posible [44], [59]. Los archivos enviados se conectan a las distintas antenas hasta enviar la información al destinatario. La ventaja de esta conexión es la gran cobertura que tiene, proporcionando buenas conexiones a la red, pero, como contraparte está la adquisición del servicio, que puede representar un gran gasto si se envían archivos demasiado pesados [44].

El Wi-Fi por su parte, también se transmite por medio de ondas de radio, pero tiene menor cobertura que una red 3G o 4G, pero su gran ventaja radica en el uso del

internet como si de una computadora se tratase, pues puede conectarse a todos los servicios de la red permitiendo el envío de archivos y ejecución de aplicaciones que utilicen el internet sin gastos extra [44].

Por último, la conexión Bluetooth se limita únicamente al intercambio de datos entre dispositivos que se encuentren a distancias de algunos metros [44].

Es gracias a estos diferentes tipos de redes inalámbricas que los dispositivos móviles pueden hacer crecer más su uso, permitiendo no solo tener comunicación y entretenimiento, sino que pueden utilizarse para enviar y recibir documentos, archivos audiovisuales, en el caso del Bluetooth permite conectar accesorios como teclados y ratones inalámbricos, entre otros [44]. Estas capacidades otorgan aún más importancia a los dispositivos móviles permitiendo que estos se abran más paso en el uso global pues pueden actuar incluso como equipos de cómputo en menor escala [44], [60].

## **2.6. Sistemas ciber físicos**

Los sistemas ciber físicos o CPS por sus siglas en inglés (Cyber Physical Systems) son sistemas conformados por una serie de elementos de hardware (sensores, máquinas, entre otros) y softwares (controladores, servidores, etc.) que permiten realizar distintas acciones, cuyo control, monitoreo y coordinación se da a través de un núcleo principal de computación, haciendo intersecciones entre elementos de sistemas reales y sistemas virtuales [16], [45]–[47], formando una red como la que se observa en la figura 2.40, donde la comunicación puede ser a través de medios como el internet, intercambiando información entre los elementos.



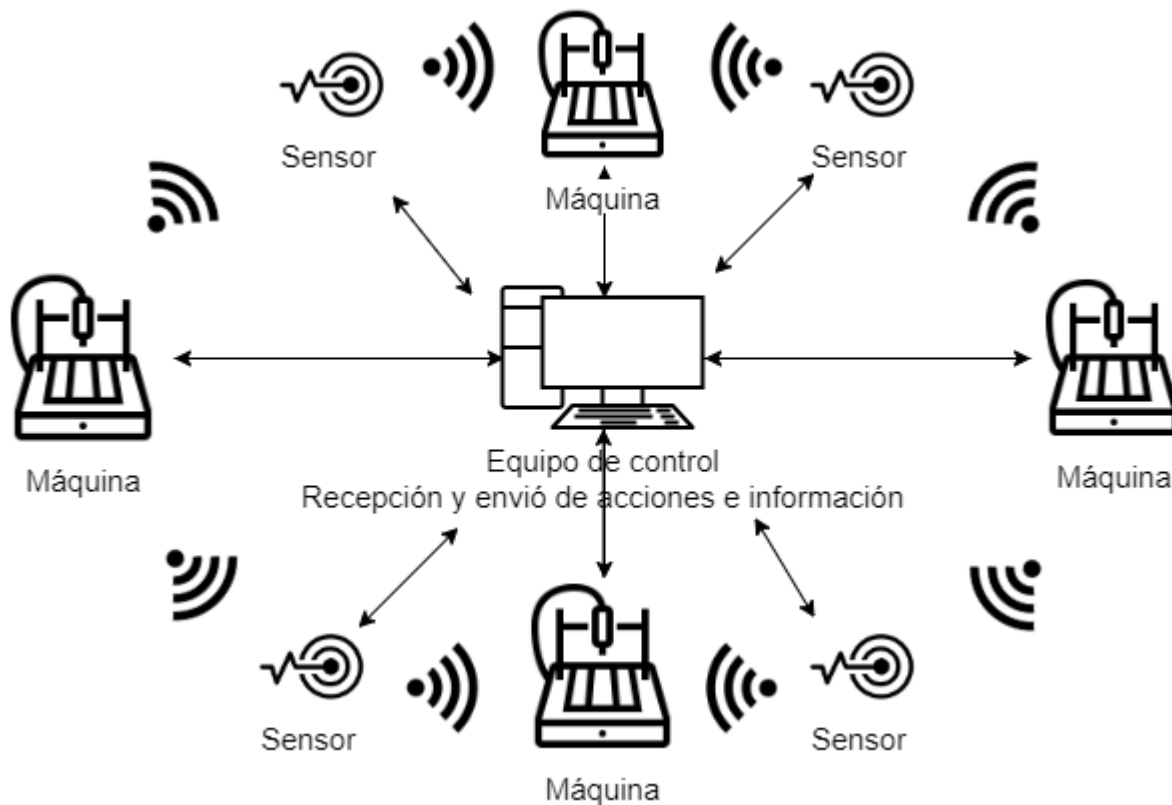


Figura 2.40. Ejemplo general de un sistema ciber físico

Estos elementos se caracterizan por tener una mayor capacidad de combinar y coordinar los sistemas de fabricación, ayudados por el IoT, los sistemas embebidos y el cloud computing [15], [16], [46], [47]. De manera general, la aplicación de los CPS es la base para el desarrollo de las áreas inteligentes, ya sea fabricación inteligente, edificios inteligentes, etc. [46], debido a que el objetivo principal de los CPS es crear sistemas inteligentes, los cuales puedan aplicarse en las áreas mencionadas [47].

Los CPS se diferencian de los sistemas embebidos o los sistemas automatizados de control de procesos debido a que sus elementos tienen la capacidad de percibir cambios, al mismo tiempo que aprenden de estos para adaptarse [46], [61].

Las características más significativas de los CPS son las siguientes [46], [62]:

- Censado móvil e integrado.
- Interacción y comunicación entre los elementos físicos y cibernéticos.
- Operabilidad por medio del uso del internet.
- Presencia de un ciberespacio en común entre los elementos, lo que permite el intercambio de información entre éstos.
- La menor interacción humana posible.

La integración de los CPS en los métodos de fabricación convencional ayudan a mejorar la eficiencia, la sostenibilidad, la economía y escalabilidad de los sistemas, todo esto aportando también a la mejora en la calidad de los productos, la reducción de costos y la productividad [45]. La estructura tradicional de los métodos de trabajo de una industria es jerárquica, es decir, existen niveles de los elementos que cumplen una función específica, donde cada elemento está conectado físicamente y debe enviar información al nivel siguiente, y este al siguiente, así sucesivamente, tal como muestra la figura 2.41:

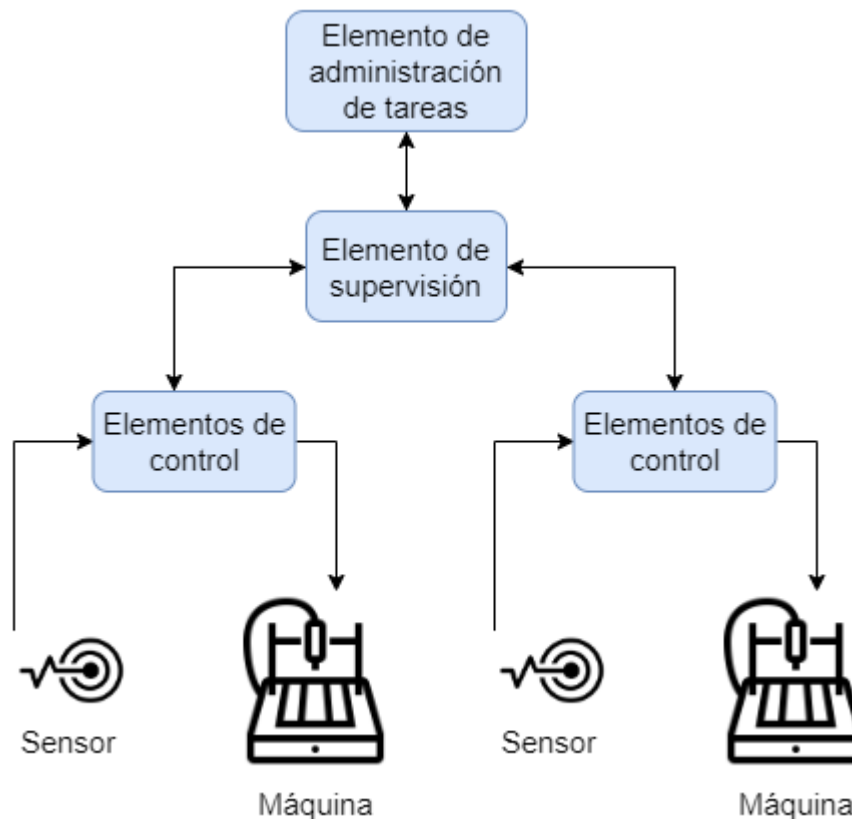


Figura 2.41. Estructura de métodos de trabajo tradicionales

Sin embargo, con la integración de CPS en el modelo de trabajo se crea interacción entre elementos que, a pesar de que algunos siguen cumpliendo con la jerarquía del método tradicional, siguen interactuando a través de la comunicación realizada por el internet [47]. La figura 2.42 muestra de manera gráfica lo mencionado anteriormente.

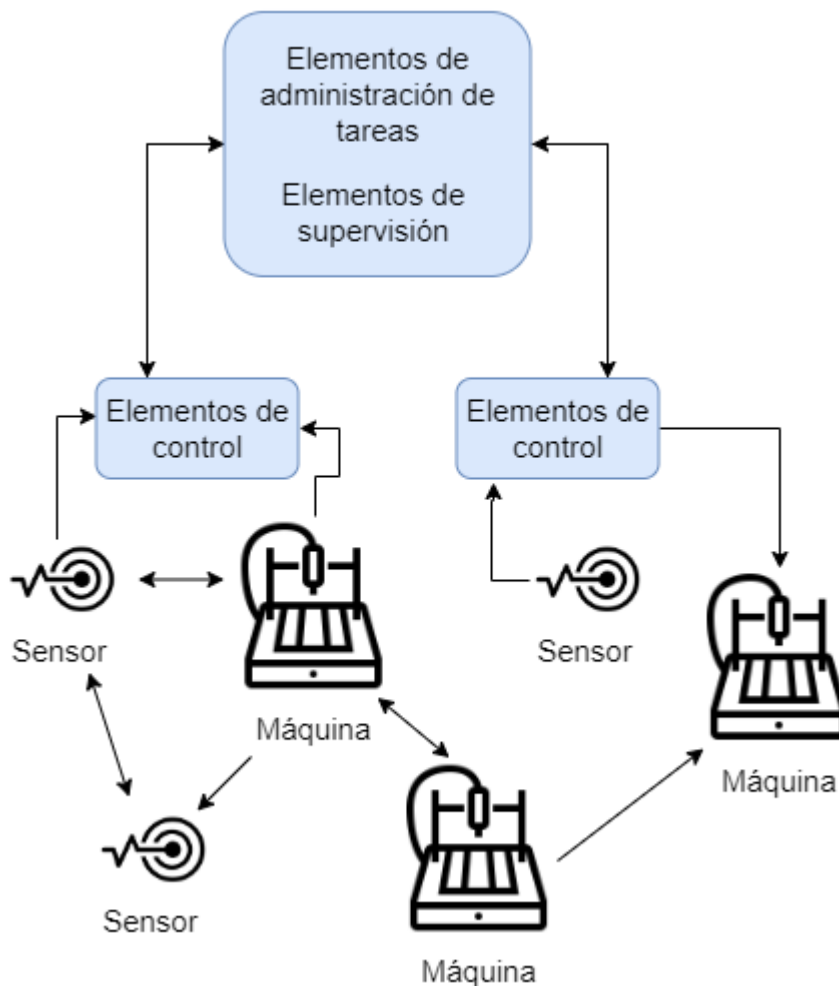


Figura 2.42. Estructura de métodos de trabajo implementando CPS

## 2.7. Sistema en chip

Un sistema en chip o system on chip (SoC, por sus siglas en inglés), es un circuito integrado que integra los componentes de una computadora y una serie de sistemas de software y hardware en un solo chip, formado por una serie de componentes analógicos y digitales así como elementos de radiofrecuencia [48]–[50]. Por lo general,

los SoC son una mejora de los circuitos integrados, solo que con un mayor número de transistores [63]. Estos sistemas son utilizados en diferentes campos debido principalmente a su reducido tamaño y bajo consumo de energía así como su alto rendimiento y funcionalidad [50], [51].

Algunos de los campos de utilidad de estos dispositivos son la comunicación móvil y los sistemas de control [51], pero uno de los usos más significativos es en la fabricación avanzada [63].

Es importante destacar que un sistema que contiene hardware SoC no es eficiente por sí mismo, ya que requiere de software para que funcione eficientemente [50].

---

## Capítulo 3

# Materiales y Métodos

---

En base al objetivo planteado, a continuación, se describe el proceso realizado para la implementación de la tecnología de manufactura en la nube móvil en sistemas ciber físicos para el control y monitoreo de impresión 3D.

Lo más relevante de este proceso radica en la capacidad de utilizar algún dispositivo móvil, ya sea un teléfono inteligente o una tablet con acceso a internet para poder supervisar, controlar y operar las máquinas, creando con esto un entorno de fabricación remota.

El método convencional de operación de las impresoras 3D requiere que cada equipo esté conectado a una computadora para que los softwares respectivos de cada máquina estén operando. Este tipo de operación es perjudicial a mediano y largo plazo ya que se transforma en daños a los equipos de cómputo y un gasto mayor de energía eléctrica.

En la figura 3.1 se puede observar del lado izquierdo los métodos usuales de impresión 3D, el primero utilizando una computadora con un software de impresión 3D cuyo proceso requiere que ésta esté operando en todo momento, por lo tanto, no puede entrar en estado de suspensión, además de que requiere de control y supervisión presencial, eso sin contar que una computadora debe controlar solo una impresora,

por lo que tener más de una máquina representa tener más de una computadora. El segundo método es a través de la inserción de una memoria microSD que tiene el archivo de impresión cargado, por lo que la impresora 3D comenzará a realizar la impresión desde ahí, una vez más, una memoria para cada impresora 3D y la supervisión y el control son presenciales. Del lado derecho de la imagen, se observa la tecnología de impresión propuesta, cuyas características permiten a un sólo usuario utilizar el dispositivo móvil que esté más al alcance o sea más cómodo de utilizar para controlar y supervisar el proceso de trabajo de la impresión 3D, todo esto de manera remota, teniendo como medio de comunicación un solo sistema ciber físico con una plataforma de cómputo en la nube embebida que permite tener más de una impresora 3D conectada a la vez.

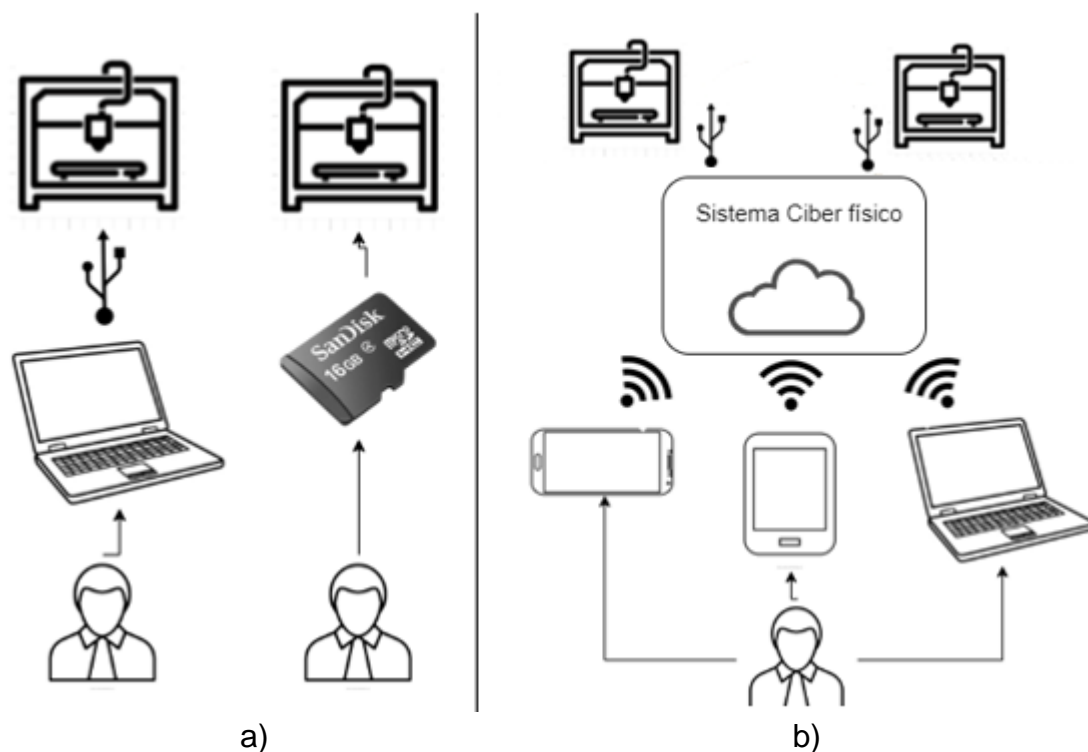


Figura 3.1. Características de los métodos de impresión 3D a) tradicionales, b) propuesto

La tecnología propuesta busca realizar un medio de fabricación digitalizado, donde el almacenamiento del archivo a imprimir, la renderización y la preparación para

impresión se realicen en un solo medio, que será la plataforma de manufactura en nube.

Como se muestra en la figura 3.2, el sistema está digitalizado casi en su totalidad, excluyendo únicamente a la computadora donde se realiza el diseño digital inicial y a la impresora 3D que es el medio de transformación del archivo digital a un archivo real tangible.

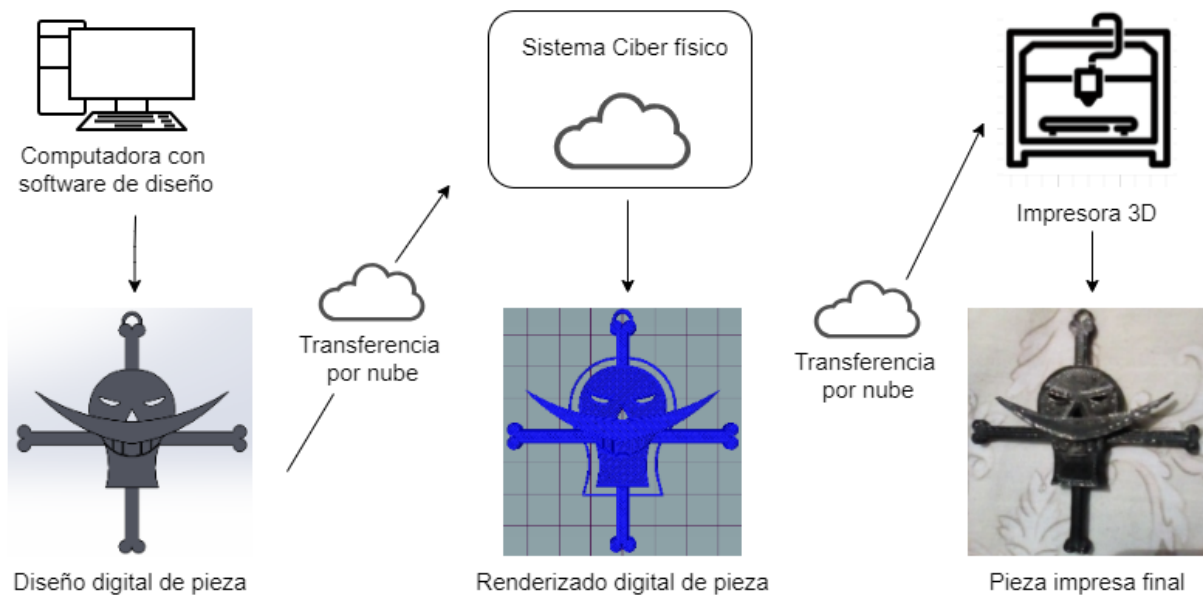


Figura 3.2. Proceso en el cual se llevará un archivo digital a una pieza real terminada

### 3.1. Materiales

Para poder llevar a cabo el desarrollo del proyecto se requiere una serie de elementos digitales (software) y físicos (hardware) que tengan compatibilidad entre sí, de tal forma que el proceso de fabricación resulte lo más eficiente posible, creando con esto una fabricación basada en la nube y sistema ciber físico, pues el sistema contendrá un elemento que controlará directamente a otros, creando una comunicación entre elementos que pueden ser operados a través del internet.

Los elementos principales del sistema se muestran en la figura 3.3, los mismos se interconectan entre sí para lograr el proceso de control y supervisión de las impresoras 3D a través de manufactura en la nube móvil.

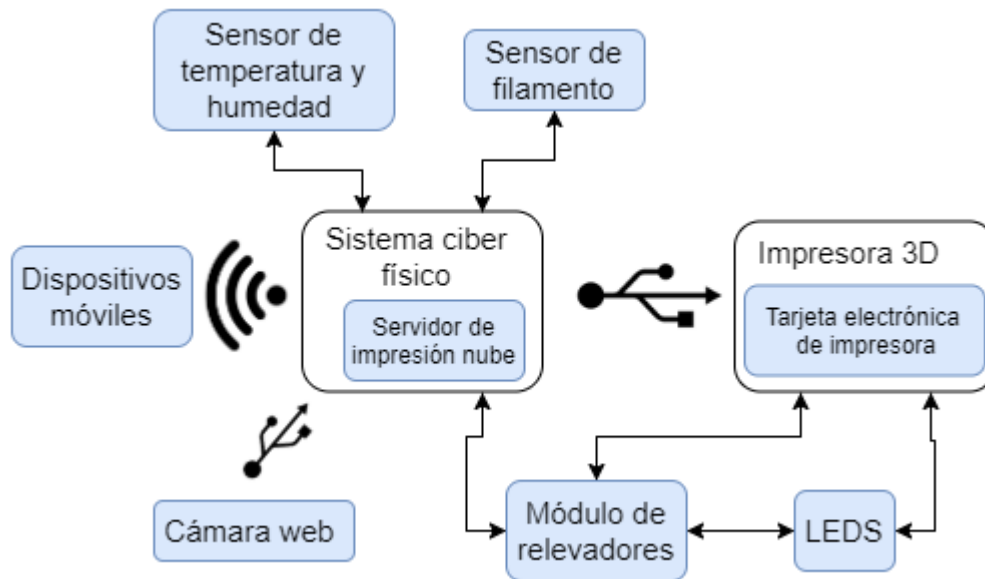


Figura 3.3. Elementos del sistema de impresión 3D propuesto

A continuación, se describen de manera más concreta los elementos necesarios para que el sistema sea funcional.

### 3.1.1. Hardware

El hardware y los elementos utilizados se dividen en ciertos grupos según para lo que han sido utilizados. Algunos son elementos clave para el desarrollo del proyecto, mientras que otros sirven para hacerlo más eficiente, pudiendo omitirlos si es necesario.

La figura 3.4 muestra los elementos de hardware interconectados entre sí. Cabe señalar que la protoboard sirve como puente entre algunos elementos de los sensores e incluso estos mismos y el sistema ciber físico, por lo cual varias de las conexiones



de los pines GPIO que sirven como control están conectadas directamente sobre la protoboard y de la protoboard van al sistema ciber físico.

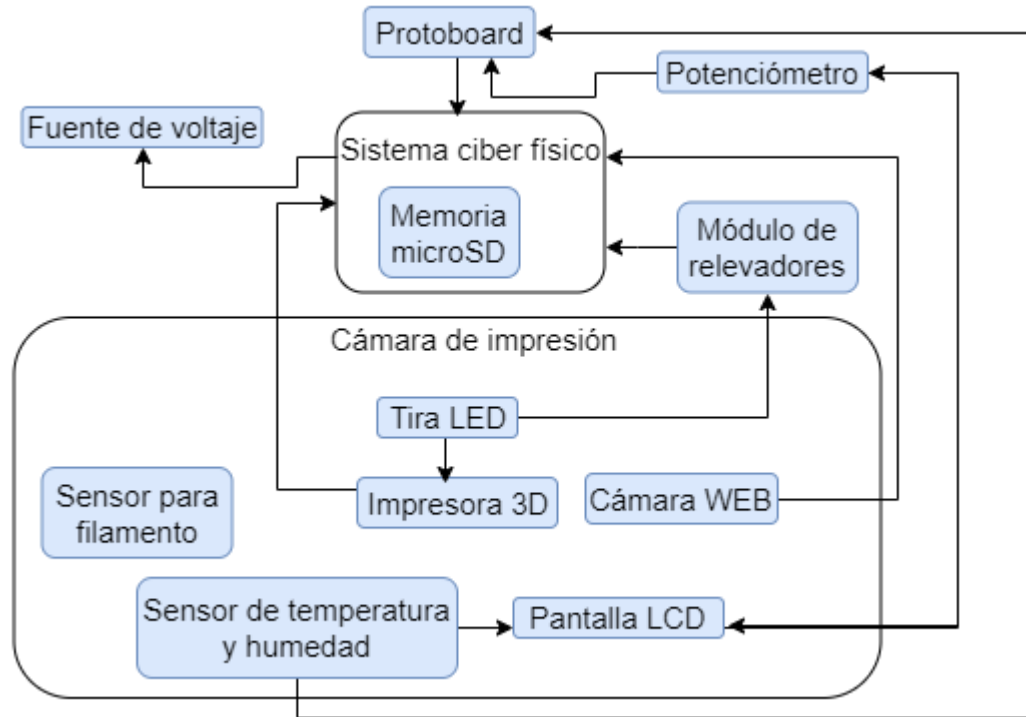


Figura 3.4. Elementos de hardware conectados entre sí

Además de esto, varios elementos se encuentran dentro de la cámara de impresión, mientras que otros se ubican fuera de la misma. A continuación, se describe de manera más detallada cada uno de los elementos de hardware y las funciones que cumplen.

#### 3.1.1.1. Impresora 3D

La impresora 3D es el elemento fundamental para el proceso propuesto. Para este proyecto se utilizó una impresora 3D de tipo de impresión FDM de marca *Tronxy P802E* que es un tipo de impresora *RepRap*, impresora que se puede ver en la figura 3.5.

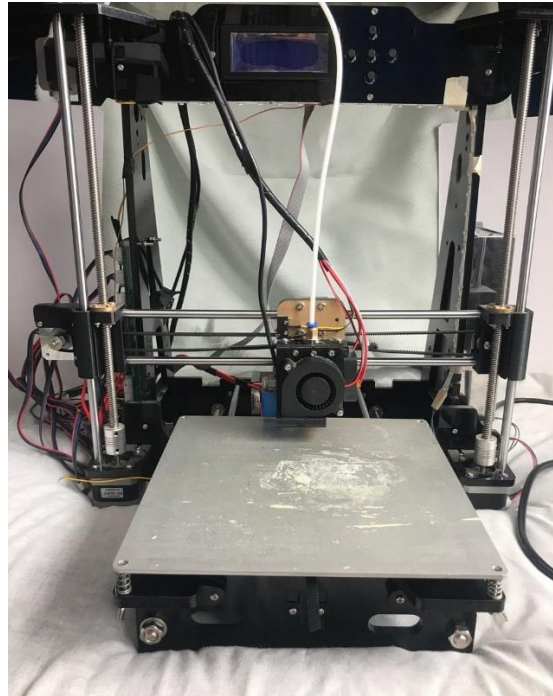


Figura 3.5. Impresora 3D utilizada en el proyecto

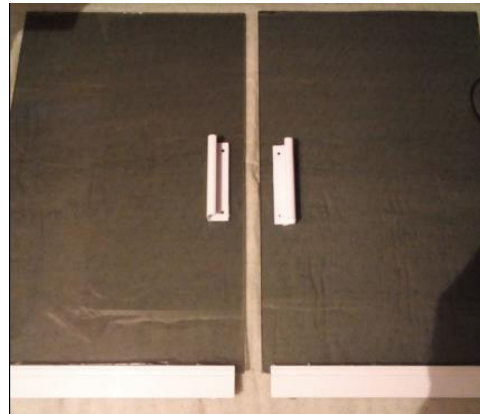
### 3.1.1.2. Cámara protectora

Se construyó una cámara para la impresora 3D cuyo principal objetivo es mantener una temperatura y humedad interna casi constante, para objetivo de este documento se le llamará cámara de impresión. Como se muestra en la figura 3.6, la cara superior y laterales están hechas de vidrio, mientras que la trasera e inferior están hechas con MDF, todo unido entre si a través de aluminio.



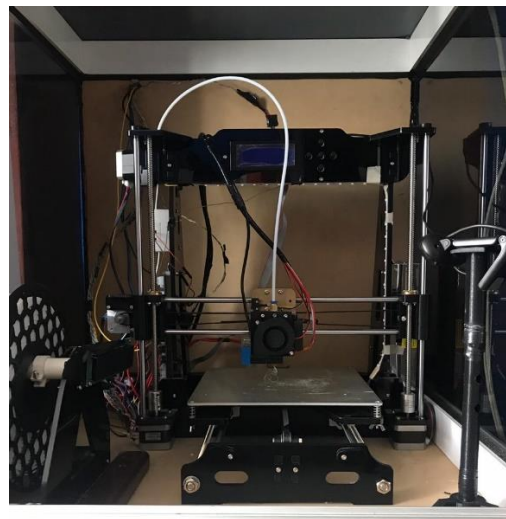
Figura 3. 6. Cámara de impresión vacía, a) sin puertas, b) con puertas

La figura 3.7 muestra que la cámara tiene un par de puertas corredizas que pueden desmontarse para introducir o extraer la impresora en caso de que se requiera realizar alguna reparación.



*Figura 3.7. Puertas desmontables de cámara de impresión*

Esta cámara ayuda a evitar las variaciones de temperatura que pueden ocurrir en el lugar donde la impresora 3D está operando, el acabado de las piezas no se ve comprometido, sobre todo por el problema más constante en una impresión 3D que es el desprendimiento de las piezas de la cama, provocando una deformación y compresión en las partes afectadas de la pieza [39], [62]. En la figura 3.8 se muestra la impresora dentro de la cámara de impresión.



*Figura 3. 8. Impresora dentro de cámara de impresión*

### 3.1.1.3. Sistema ciber físico

Este elemento es considerado clave ya que es en este dónde se instalará el software que permita realizar el control remoto de las máquinas y a la capacidad que tiene para poder conectar más de un equipo. Es el elemento más importante ya que tanto los elementos que componen a la tarjeta como el software instalado es donde se concentran tres fases del proceso, que son la computación en la nube (ya que aquí se cargan los archivos), el internet de las cosas (ya que se puede configurar Wi-Fi para el sistema ciber físico) y la parte inicial de la fase de manufactura.

Para este apartado, se analizaron las especificaciones de 7 tarjetas que pueden servir como el sistema ciber físico, comparando las especificaciones que se pueden ver en la tabla 3.1:

*Tabla 3.1. Comparación de características de tarjetas electrónicas [65]–[71]*

| Tarjeta electrónica       | Memoria RAM | Puertos USB | Módulo Wi-Fi | Precio |
|---------------------------|-------------|-------------|--------------|--------|
| Jaguar One Plus           | 1 GB        | 3 de 2.0    | Accesorio    | 96 dls |
| Orange Pi PC Plus 2       | 2 GB        | 4 de 2.0    | Por antena   | 49 dls |
| Odroid-C2                 | 2 GB        | 4 de 2.0    | Por antena   | 46 dls |
| Hummingboard Pro          | 2 GB        | 2 de 2.0    | Integrado    | 96 dls |
| Beaglebone Black Wireless | 512 MB      | 1 de 2.0    | Integrado    | 68 dls |
| pcDuino4                  | 1 GB        | 2 de 2.0    | Por antena   | 49 dls |
| Raspberry Pi 3 B Model    | 1 GB        | 4 de 2.0    | Integrado    | 54 dls |

De entre todas las tarjetas, se optó por elegir la *Raspberry Pi 3*, ya que a pesar de que existen algunas que tienen una mayor memoria RAM y un procesador más actualizado, las especificaciones de *Raspberry* son suficientes para llevar a cabo el proyecto, además de que su precio es más accesible.

La figura 3.9 muestra la *Raspberry Pi*, que es una tarjeta electrónica con una única placa que contiene diferentes elementos de tal manera que puede utilizarse y ser sustituto de una computadora [72]–[74]. Para este caso, se utilizó el modelo *Raspberry Pi 3 modelo B*, que incluye los siguientes elementos [72]–[74]:

- Microchip Broadcom BCM2836 con una unidad de procesamiento central (CPU) ARM Cortex-A7 de cuatro núcleos de 900 MHz
- Unidad de procesamiento de gráficos GPU 3D Core IV
- Memoria de 1 GB LPDDR2 SDRAM
- 4 puertos USB
- 40 pines GPIO
- Puerto HDMI
- Puerto Ethernet
- Conector de audio 3.5 mm
- Interfaz de cámara (CSI)
- La interfaz de visualización (DSI)
- Ranura para tarjeta de memoria microSD



Figura 3.9. Vista superior de tarjeta electrónica elegida

#### 3.1.1.4. Memoria MicroSD

La tarjeta de memoria es donde se instalará la interfaz de manufactura en la nube por lo que es importante que ésta sea de 8 GB de capacidad como mínimo, aunque es

recomendable que la memoria sea de 16 GB. Como se ilustra en la figura 3.10, debe ser microSD ya que es el tipo de memoria que utiliza la tarjeta elegida.



Figura 3.10. Memoria microSD de 16 GB

#### 3.1.1.5. Fuente de voltaje

La fuente de voltaje se utiliza para administrar corriente a la tarjeta. La salida debe ser de máximo 5 Volts de corriente directa y 2 Amperes [74]. Para este caso se utilizó un cargador de teléfono celular de 1 ampere de corriente, tal como el que se muestra en la figura 3.11.



Figura 3.11. Fuente de poder para Raspberry Pi

#### 3.1.1.6. Cámara web

La cámara web permite tener una visión en tiempo real del proceso de trabajo de la máquina a la cual se quiera monitorear.

Es necesario mencionar que no cualquier cámara web es compatible con el software de control, ya que requiere de características específicas para poder realizar la transmisión de video [75].

Se optó por utilizar una cámara *Logitech Webcam C110*, ya que esta cámara es de las más sencillas de configurar y su resolución es suficiente para observar el proceso de impresión, además en cuanto a precio, es de las más accesibles. No requiere configuraciones, solo basta con conectarla a través del puerto USB del sistema ciber físico y comienza a mostrar la imagen. La cámara es la que se muestra en la figura 3.12.



Figura 3.12. Cámara web utilizada en el proyecto

#### 3.1.1.7. Módulo de relevadores

El módulo de relevadores puede ser controlado por medio de algún microcontrolador (como *Arduino*, o en este caso, *Raspberry*) y se utiliza para controlar dispositivos de forma remota o automatizada [74], [75].

Las características de este módulo de relevadores son las siguientes:

- Voltaje de alimentación de 5V de corriente directa
- Voltaje de control de 3.3 a 9V







### 3.1.1.8. *Sensor de temperatura de humedad*

El sensor utilizado, mostrado en la figura 3.14, es un sensor DHT11[78] utilizado para medir la temperatura y la humedad que se encuentran en el interior de la cámara de impresión. Es de suma importancia conocer dichos datos, ya que esto influye en el proceso de impresión, más concretamente en el acabado y estructura final de las piezas y es gracias a este sensor que se pueden conocer dichos parámetros.

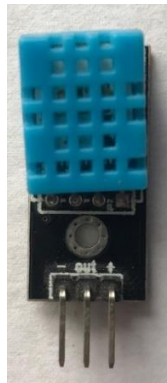


Figura 3.14. Sensor DHT11

### 3.1.1.9. *Sensor para filamento*

Se seleccionó un interruptor de final de carrera con pulsador [79] que fue utilizado para la detección de filamento, ya que si éste llegara a romperse o terminarse, este elemento enviará una señal de alarma que pausará el proceso de impresión. El sensor en cuestión se muestra en la figura 3.15.



Figura 3.15. Interruptor de final de carrera con pulsador

### 3.1.1.10. Pantalla LCD

La pantalla LCD [80] ,mostrada en la figura 3.16, se utilizó en conjunto con el sensor DHT11 para tener control sobre la temperatura y humedad del interior de la cámara de impresión. Es en esta pantalla que los parámetros se muestran digitalmente, obteniendo los valores reales que el sensor DHT11 está lanzando.

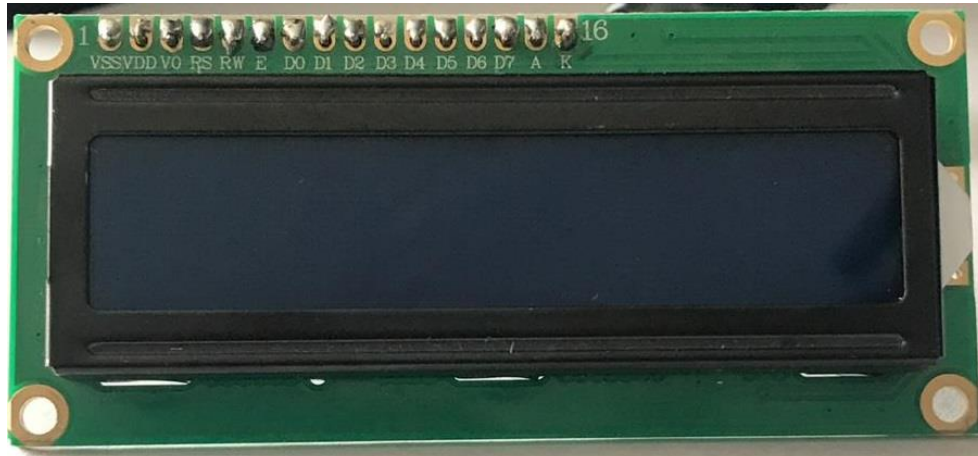


Figura 3.16. Pantalla LCD para mostrar datos de sensor DHT11

### 3.1.1.11. Conectores

Estos cables se utilizan para realizar conexiones entre los sensores y accesorios de éstos y el sistema ciber físico a través de la Protoboard. Están divididos en tres tipos diferentes (figura 3.17): Hembra-Hembra, Macho-Macho, Hembra-Macho.

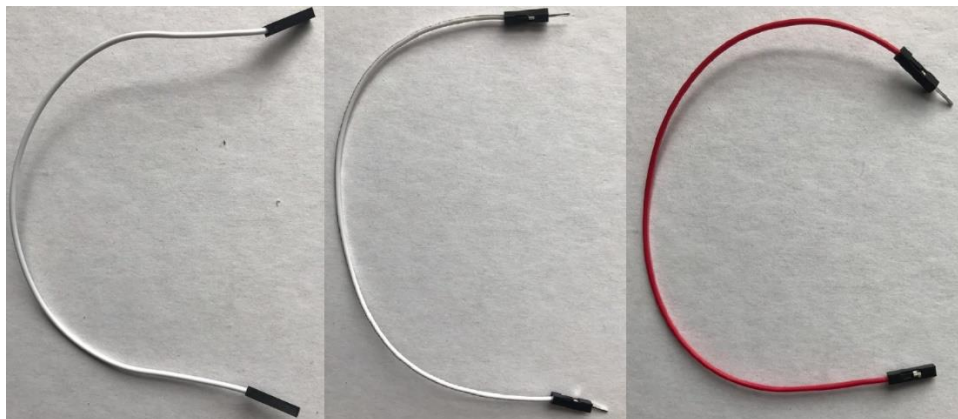


Figura 3.17. Conectores para conexión entre sensores y Raspberry

### 3.1.1.12. Protoboard

La protoboard se utilizó, en conjunto con los conectores para poder realizar conexiones de todos los sensores, accesorios y el sistema ciber físico. Es debido a la cantidad de sensores que no se pueden realizar conexiones directas con los pines GPIO del sistema ciber físico, por lo que el uso de la protoboard es de gran importancia para la alimentación de todos los elementos electrónicos. Se utilizó un protoboard como el que se muestra en la figura 3.18.

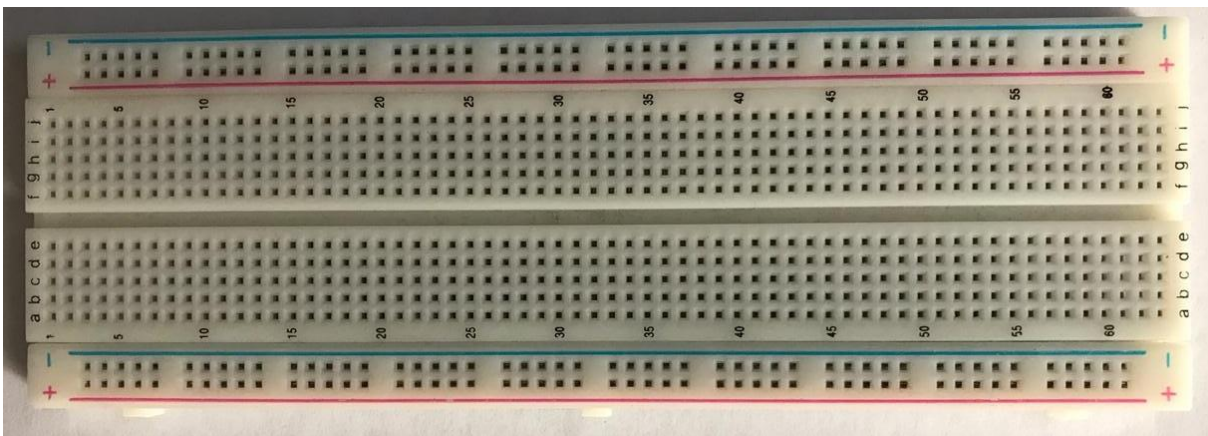


Figura 3.18. Protoboard

### 3.1.1.13. Tira LED

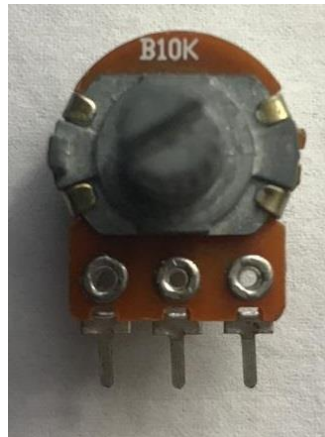
La tira LED se utilizó para iluminar la impresora 3D cuando el entorno se oscurece. Se colocaron en lugares estratégicos para proporcionar una mejor iluminación. La figura 3.19 muestra la tira LED utilizada.



Figura 3.19. Tira LED utilizada para iluminación

#### 3.1.1.14. Potenciómetros

Los potenciómetros utilizados son de 10K Ohm, se utilizan en conjunto con la pantalla LCD para controlar el brillo y contraste de ésta. Se utilizaron dos potenciómetros como el que se muestra en la figura 3.20.



*Figura 3.20. Potenciómetro de control de contraste o brillo*

Los elementos de hardware mostrados anteriormente son todos los que se utilizaron para que el sistema pueda ser funcional. Otro elemento utilizado son los dispositivos móviles, que se describirán más adelante. A continuación, se describirá el software que ha sido utilizado a lo largo del proyecto.

#### 3.1.2. **Software**

Dentro del software que se va a utilizar, se tienen distintos grupos, ya que algunos solo se utilizan para ciertas acciones de configuración, mientras que otros son directamente responsables de que el proceso de fabricación sea eficiente y funcional.

La figura 3.21 muestra los softwares que se utilizaron y la clasificación de estos.

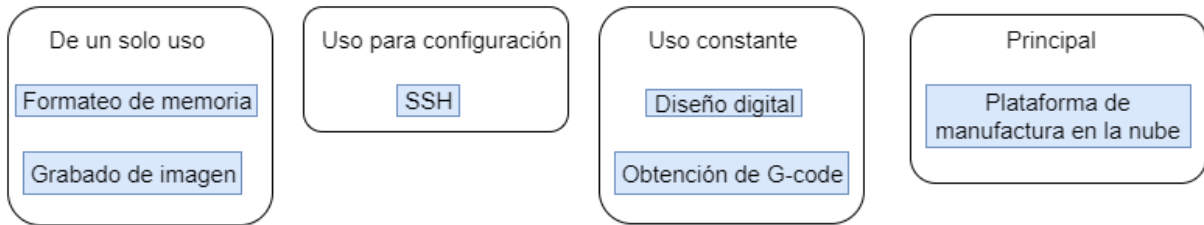


Figura 3.21. Softwares utilizados y su clasificación

En las siguientes secciones se describen los softwares de manera más detallada y las características de éstos.

#### 3.1.2.1. Software para formateo de memoria

Este software solo se utiliza una vez. El software utilizado es *SD Card Formatter* que permite formatear tarjetas de memoria SD, SDHC y SDXC siempre y cuando éstas cumplan con las especificaciones de sistema SD, además de que no estén protegidas o estén bloqueadas. Otra de las funciones es la restauración de capacidad de memorias que de una u otra forma han sido particionadas o su formato ha sido cambiado [81].

#### 3.1.2.2. Software para grabado de imagen en memoria

Al igual que el anterior, este software solo se utiliza una vez. Para este propósito se utilizó *Win32 Disk Imager* que se utiliza para guardar o restaurar archivos de imagen de unidades extraíbles. Las imágenes pueden ser archivos de imagen de arranque, es decir, la unidad extraíble se convierte en un arranque para una computadora o imágenes ISO [82].

#### 3.1.2.3. Software de cliente SSH

A diferencia de los anteriores, este software se utilizó más constantemente, aunque no es del todo necesario ya que si se conecta el sistema ciber físico a un monitor por medio de la entrada HDMI se puede realizar lo mismo que con este software. *Putty* se trata de un software cliente de SSH (Secure Shell) desarrollado para Windows [83] y

fue el seleccionado para su uso en este proyecto. Es cómodo utilizarlo en sustitución a la conexión del sistema ciber físico a un monitor, ya que es más fácil utilizar la computadora para la interacción con el sistema ciber físico que conectar monitor y teclado a la misma.

#### 3.1.2.4. Softwares para diseño digital

El software de diseño se utiliza para la creación digital de las piezas que se quieren imprimir, a través de un archivo STL. En este software se realiza la pieza en tamaño real con todas las características y especificaciones requeridas.

El software seleccionado fue *SolidWorks*. *SolidWorks* es un software CAD desarrollado para su uso en el sistema operativo de *Windows*. Este programa se utiliza para realizar diseños y modelos digitales en 2D y 3D de piezas y ensamblajes de los cuales pueden realizarse planos para extraer información útil de los modelos creados. Los archivos creados se pueden guardar en distintos formatos, entre estos el archivo STL, archivo utilizado para la impresión 3D. Los diseños son realizados a través de geometrías utilizando sólidos paramétricos [84]–[86]. La figura 3.22 muestra un ejemplo de una pieza creada en *SolidWorks*.

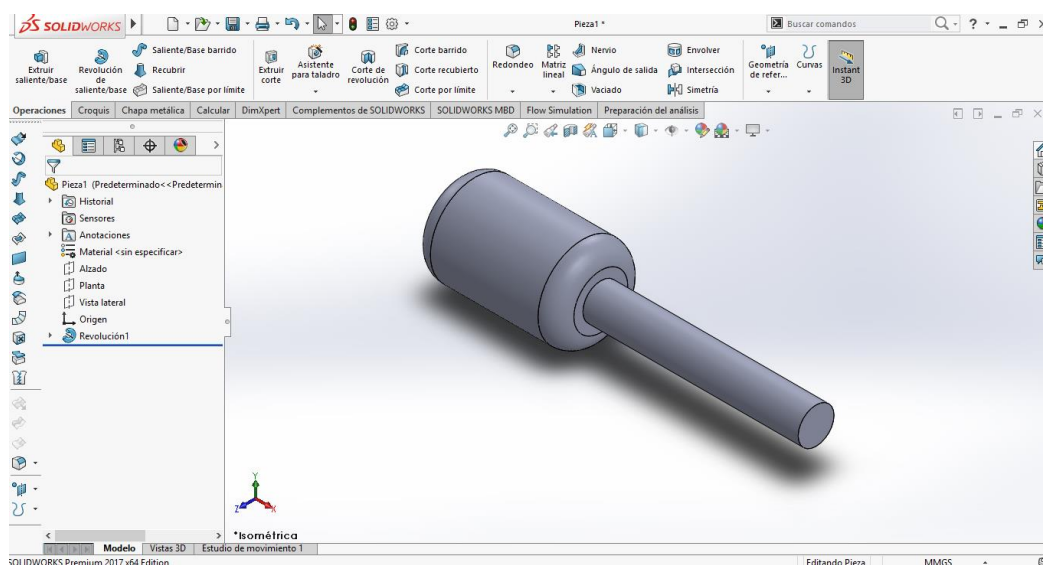


Figura 3.22. Ejemplo de pantalla de diseño en *SolidWorks*



### 3.1.2.5. Software para obtención de G-code

Este software se utiliza para la obtención del archivo G-code, es el que contiene el renderizado de las piezas a imprimir. Este software es opcional, ya que, como se verá más adelante, el software de manufactura en la nube cuenta con un sistema de renderizado interno que sustituye a este tipo de software. Sin embargo, sigue siendo una opción por lo que es necesario considerarlo.

El software elegido es *Repetier Host*, un software que se utiliza para controlar y manipular impresoras 3D. Este software contiene distintos perfiles de configuración de renderizado, tales como *Cura*, *Slic3r*, entre otros. Además, es compatible con la mayoría de los firmware de las impresoras por lo que su uso podría ser casi general [87], [88]. En la figura 3.23 se muestra un ejemplo del software renderizando un archivo STL.

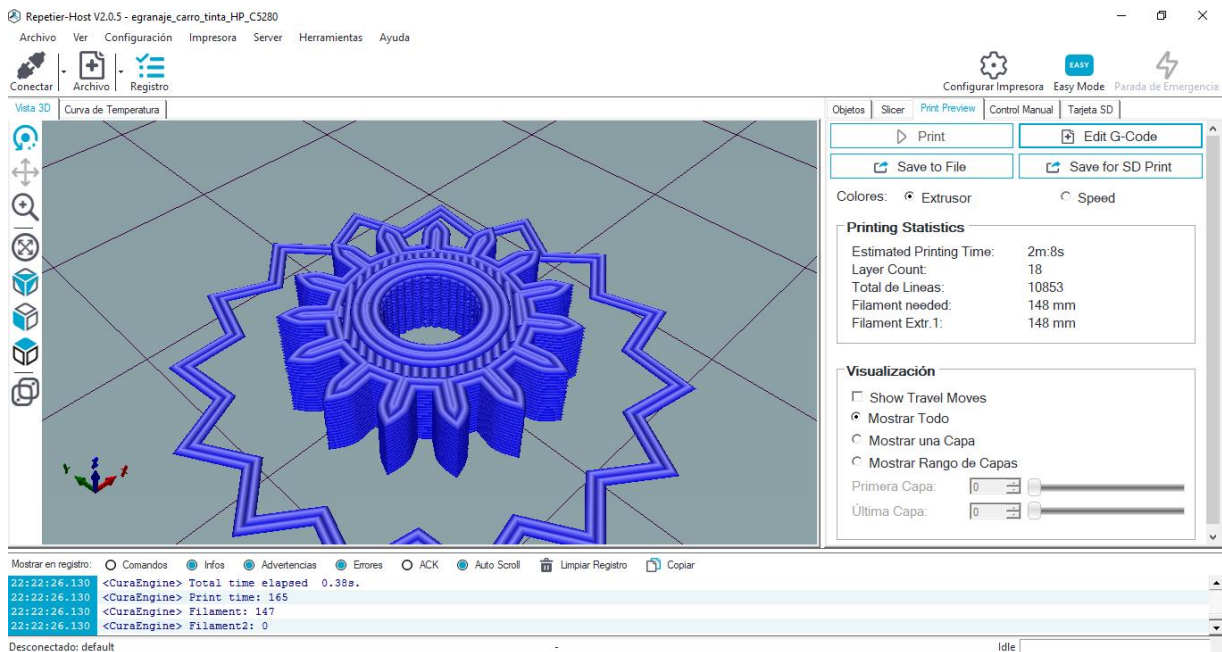


Figura 3.23. Ejemplo de pantalla de Repetier Host

### 3.1.2.6. Software de plataforma de manufactura en nube

El software clave es llamado así debido a que es el encargado de llevar lo digital o lo real, en este caso, es la interfaz principal de control de la impresora 3D. Para que el control de las impresoras sea posible, se requiere un software que sea instalado en el sistema ciber físico, software que servirá como interfaz de manufactura en la nube que otorgará control y supervisión de la impresora 3D, además de contar con la capacidad de almacenar archivos para su posterior impresión.

En la tabla 3.2, se muestran algunos softwares con las características mostradas anteriormente.

*Tabla 3.2. Comparación de características de softwares de impresión 3D [89]–[91]*

| <b>Software de control</b> | <b>Tipo de código</b> | <b>Tipos de impresoras configurables</b> | <b>Renderizado interno</b> | <b>Control por dispositivo móvil</b> |
|----------------------------|-----------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|
| 3DPrinter OS               | Cerrado               | Dadas por default                        | Si                         | No habilitado                        |
| Astroprint                 | Cerrado               | Dadas por default - Personalizables      | Si                         | Requiere aplicación                  |
| Octoprint                  | Abierto               | Dadas por default - Personalizables      | Si                         | Habilitado – Aplicación opcional     |

Realizando la comparación de características, se optó por seleccionar *Octoprint* como el software a utilizar ya que es compatible con el sistema ciber físico seleccionado, además de contar con las siguientes características [92]:

- No requiere de dispositivos externos para realizar conexión a internet.
- No requiere instalación de aplicaciones extra para funcionar (existen algunas, pero son opcionales).
- La interfaz es mejorada continuamente y al ser de código abierto, se pueden realizar cambios por el usuario, haciéndola más eficiente.
- Compatible con un gran número de impresoras 3D.

Otra de las características de este software y que es lo que le otorga más ventajas, es que no gasta recursos externos del dispositivo móvil, ya que solo se utiliza el



navegador de éste para poder acceder a la interfaz por medio de la nube. Así mismo, este software tiene espacio de almacenamiento interno que ofrece hasta 14 GB, con lo cual se pueden subir y almacenar una gran cantidad de archivos para posteriormente poder descargarlos desde la misma interfaz, almacenarlos por carpetas o mandarlos a imprimir directamente a la impresora 3D [89]. Se puede observar la pantalla del software en la figura 3.24.

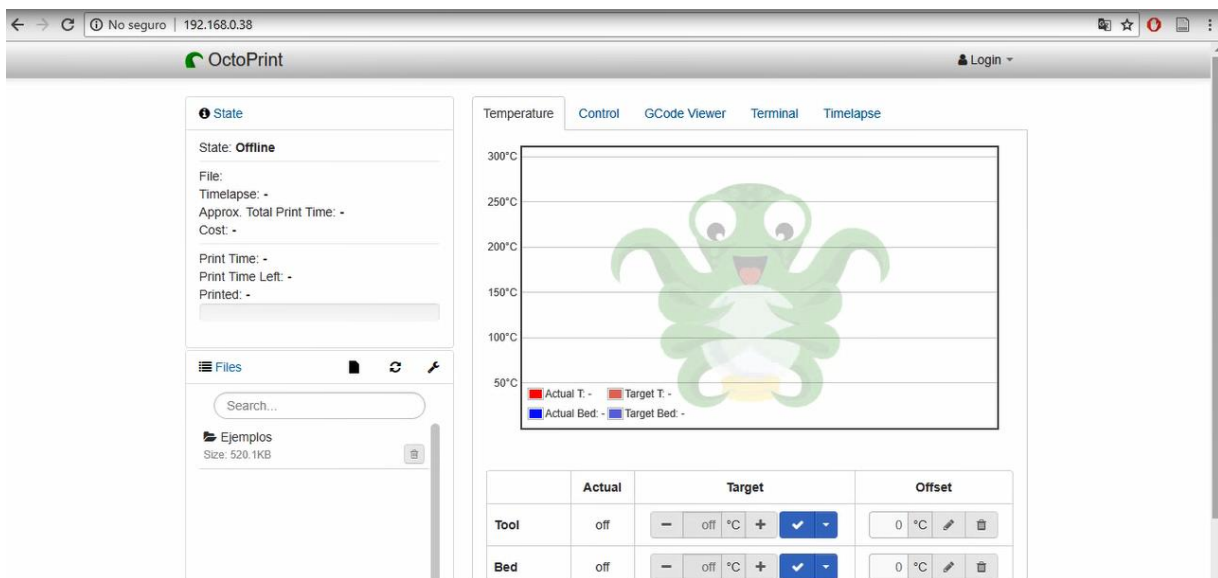


Figura 3.24. Vista de interfaz principal de Octoprint

Con este último software, la sección de softwares utilizados ha concluido. Hasta este punto, una vez descrito el sistema ciber físico y la plataforma de manufactura en la nube, el sistema se puede llamar sistema de manufactura en la nube con sistemas ciber físicos aplicado a impresión 3D. La siguiente sección muestra los dispositivos móviles que se utilizaron para poner a prueba el sistema de manufactura en la nube.

### 3.1.3. Dispositivos móviles.

Los dispositivos móviles sirven para poder realizar las acciones de control en la plataforma de manufactura en la nube. Gracias al añadido de estos elementos, el sistema se transforma al término llamado manufactura en la nube móvil con sistemas ciber físicos aplicado a impresión 3D, debido a que se utilizan los dispositivos móviles

para controlar la impresora 3D por medio de la plataforma de manufactura en la nube que esta embebida en el sistema ciber físico. A continuación, se muestran y describen los dispositivos utilizados.

El teléfono celular utilizado, mostrado en la figura 3.25 es de la marca BLU modelo Studio X Plus, con una memoria RAM de 1 Gigabytes y un procesador quad-core 1.3 Gigahertz.



*Figura 3.25. Teléfono inteligente*

La figura 3.26 muestra el segundo dispositivo móvil utilizado que fue una tablet de la marca GHIA modelo 47418, con memoria RAM de 1Gigabyte y procesador quad-core 1.5 Gigahertz.



*Figura 3.26. Tablet*

La computadora portátil utilizada como el último dispositivo móvil es marca Acer modelo Aspire F5-573, con una memoria RAM de 16 Gigabytes y un procesador Intel® Core™ i5-7200U CPU @ 2.50 Gigahertz, con sistema operativo Windows 10 a 64 bits. La computadora se muestra en la figura 3.27.



*Figura 3. 27. Laptop*

La siguiente sección muestra el proceso realizado para que el sistema sea funcional, utilizando los elementos tanto de software como de hardware combinándolos para que cada elemento cumpla con su función.

### **3.2. Metodología**

Una vez que se han seleccionado los medios necesarios para el sistema, se comienza a realizar las conexiones de los elementos de hardware y la instalación de los elementos de software.

La figura 3.28 muestra los pasos a seguir para que el sistema vaya siendo funcional. El primer bloque debe realizarse estrictamente al inicio, pues se refiere a la instalación y configuración de la plataforma de manufactura en nube. El segundo bloque puede realizarse en cualquier momento, pero es recomendable realizarlo como segundo paso

debido al uso que tendrá. Los elementos del tercer bloque pueden realizarse en cualquier orden, pero deben ser realizados para el mejor funcionamiento del sistema. Para terminar, el bloque final se realiza como último paso pues es cuando el sistema ya está completamente listo para utilizarse.

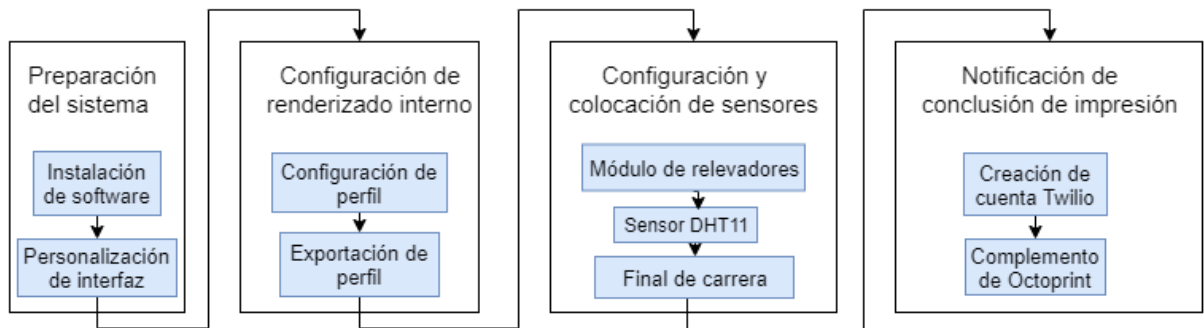


Figura 3.28. Pasos generales por seguir para realizar el proyecto

Cada uno de los bloques mostrados en la figura anterior será descrito de manera general, explicando solo por qué se realizan las acciones, debido a que las configuraciones, procesos y conexiones son material confidencial.

### 3.2.1. Preparación del sistema

Esta fase en general se refiere a la instalación de la plataforma de manufactura en la nube en la memoria microSD para que sea funcional al insertar la memoria en el sistema ciber físico para posteriormente realizar algunas configuraciones necesarias para que pueda ser visualizada en los dispositivos móviles, además de algunos complementos que apoyan a que la plataforma de manufactura en nube sea más eficiente. A continuación, se describen los dos pasos que conforman esta fase.

#### 3.2.1.1. Instalación de software

Este paso se refiere particularmente a la instalación de la plataforma de manufactura en la nube en la memoria microSD. Los softwares utilizados en este paso son *SD Card Formatter* y *Win32 Disk Imager*.

### 3.2.1.2. *Personalización de interfaz*

En este paso, se realizan varias acciones. Una de estas es la configuración del Wi-Fi y la dirección IP para poder acceder a la plataforma de manufactura en la nube por medio del navegador del dispositivo móvil utilizado. Para esta acción en particular se utilizó el software *Putty*. Otra de las acciones es la configuración de los perfiles de acceso y de las características de la máquina utilizada. Además, se realiza la instalación de varios plugin que sirven de apoyo para ciertas características del proceso de manufactura en la nube.

### 3.2.2. **Configuración de renderizado interno**

Esta fase es de las más importantes dentro de la configuración de la plataforma de manufactura en la nube, debido a que le otorga más características para ser una tecnología de fabricación digital. La plataforma de manufactura en la nube tiene la capacidad de generar el G-code dentro de sí misma, renderizando los archivos STL según la configuración elegida, de manera que el software *Repetier Host* se vuelve un software opcional. A continuación, se describen los dos pasos requeridos para

#### 3.2.2.1. *Configuración de perfil*

Este paso se realiza fuera de la plataforma de manufactura en la nube. A través del uso de algún software de renderizado, se configura uno o varios perfiles de impresión con características específicas de temperaturas, tipo de material, grosor de boquilla, entre otras cosas. Se debe guardar cada perfil en algún lugar accesible, ya que en el paso siguiente se utilizan.

#### 3.2.2.2. *Exportación de perfil*

Para este paso, se requiere realizar algunas configuraciones dentro de la plataforma de manufactura en la nube. Una vez realizadas dichas configuraciones, se exportan los perfiles de renderizado, en caso de ser más de uno se deben exportar y guardar uno por uno. La ventaja de tener más de un perfil de renderizado es que a una sola

pieza STL pueden dársele diferentes características, por lo que dentro de la plataforma de manufactura en la nube con una sola pieza pueden generarse varios archivos de renderizado G-code, a diferencia por ejemplo de *Repetier Host* en donde se debe cargar la pieza cada vez que quiere tenerse un archivo G-code.

### 3.2.3. Configuración y colocación de sensores

Esta sección describe de manera general como se configuran los sensores de apoyo. Cada sensor tiene sus propias características y la colocación de estos depende de la acción que realizan.

#### 3.2.3.1. Módulo de relevadores

Para el módulo de relevadores, se requiere la instalación de algunos plugin en la plataforma de manufactura en la nube que permiten generar algunas características que activan las funciones del sensor. Además, se requiere algunas conexiones a la tarjeta de la impresora 3D y otras al sistema ciber físico. Por último, se requiere programar algunos códigos en *Python* dentro del sistema operativo del sistema ciber físico. Este sensor esta fuera de la cámara de impresión.

#### 3.2.3.2. Sensor DHT11

Al igual que el sensor anterior, este requiere la programación de códigos en *Python*, pero no requiere de plugin en la plataforma de manufactura en la nube. El sensor está conectado directamente al sistema ciber físico, mientras que los complementos de este están conectados al protoboard. A excepción de los potenciómetros, todos los elementos están dentro de la cámara de impresión.

#### 3.2.3.3. Final de carrera

El ultimo sensor está ubicado cerca del motor que empuja el filamento. Esto con la intención de que la detección de falla del filamento sea más eficiente. Este es el único sensor que no requiere de configuración de código en *Python* sin embargo si requiere

de configuraciones en un plugin de la plataforma de manufactura en la nube. Además, se colocó sobre algunas piezas impresas en 3D (que se detallan más adelante) para que funcione correctamente.

### **3.2.4. Notificación de conclusión de impresión**

Esa última fase es de gran ayuda para el control del proceso de impresión 3D. Gracias al uso de una página de mensajería gratuita y un plugin de la plataforma de manufactura en la nube es posible configurar un número de teléfono celular para que sea enviado un mensaje a este de que una impresión 3D ha terminado. A continuación, se describen los pasos necesarios para que esta fase sea funcional.

#### *3.2.4.1. Creación de cuenta Twilio*

*Twilio* es la página de mensajería gratuita elegida. En necesario crear una cuenta la cual contiene los datos necesarios del usuario para poder configurar el número de teléfono celular al que se enviara el mensaje que notifica la conclusión de una pieza 3D.

#### *3.2.4.2. Complemento de plataforma de manufactura en la nube*

Para poder terminar el proceso, es necesario instalar un plugin en el cual se agregan los datos de la cuenta de *Twilio* haciendo que la plataforma y la pagina manden el mensaje al usuario de que su impresión a concluido.

De manera general, esas fueran las fases de configuración del sistema de manufactura en la nube móvil, concluyendo esa sección. En la siguiente sección se muestran los datos de la tecnología desarrollada mostrando si es capaz de sustituir a los procesos de impresión 3D tradicionales.

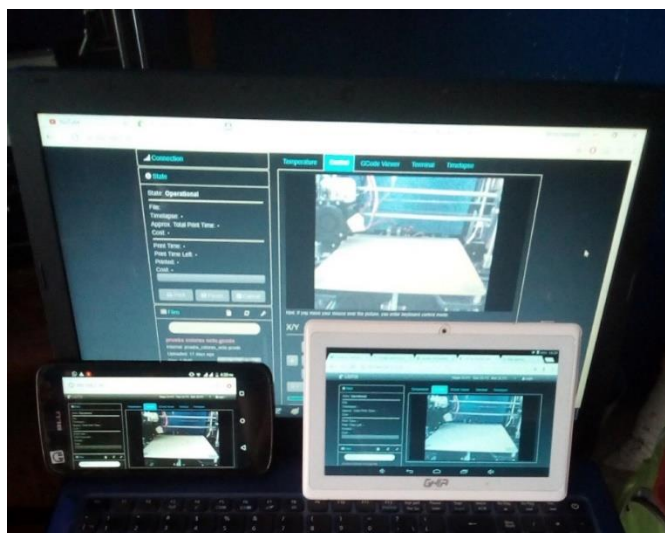
# Resultados y discusión

---

### 4.1. Resultados de control y supervisión de impresión 3D por medio de dispositivo móvil

#### 4.1.1. Control de impresora por dispositivo móvil

Gracias a la combinación de hardware y software, el sistema de manufactura en la nube móvil resultó ser exitoso. Después de realizar las instalaciones y configuraciones necesarias, además de configurar todos los sensores necesarios, se realizaron varias impresiones 3D.



*Figura 4.1. Dispositivos móviles accediendo a Octoprint*



Empleando dispositivos móviles mostrados en la figura 4.1, se realizó el control y monitoreo del proceso de impresión de las piezas. En algún punto de las impresiones una de estas piezas fallo debido a la ruptura del filamento utilizado, el cual fue PLA. Gracias a las configuraciones en la plataforma de manufactura en la nube, el sensor de filamento y un teléfono celular, se logró pausar el proceso de impresión para recolocar el material y proseguir con la fabricación de la pieza, evitando tener una pieza fallida y desperdicio de material, tiempo, energía y dinero.

Los dispositivos móviles utilizados dieron buenos resultados ya que el sistema fue funcional y no hubo problema al acceder a la IP a través del navegador. Sin embargo, cabe señalar que, de los tres dispositivos, la tablet reaccionó de manera más lenta y la laptop presentó el mejor rendimiento a la hora de controlar la impresora 3D. Aun así, se demostró que el sistema no requiere marcas o modelos específicos de dispositivos móviles para ser funcional. En la siguiente sección se muestran y describen algunas de las piezas realizadas con el sistema.

#### **4.1.2. Piezas obtenidas**

A través de la tecnología estudiada a lo largo del documento, y con la finalidad de probarla, se fabricaron algunas piezas de impresión 3D utilizando filamento PLA.

La tabla 4.1 muestra las características de las piezas impresas, destacando principalmente el consumo energético y el gasto monetario que conllevó la realización de cada una de éstas. Cabe señalar que el gasto energético y económico registrado es en referencia al sistema ciber físico, más concretamente al cargador de celular que se utilizó como fuente de poder alimentarlo, no se está considerando el gasto de los dispositivos móviles ni de la impresora 3D, ya que estos elementos requieren su propia carga para funcionar.

*Tabla 4.1. Características de las piezas impresas*

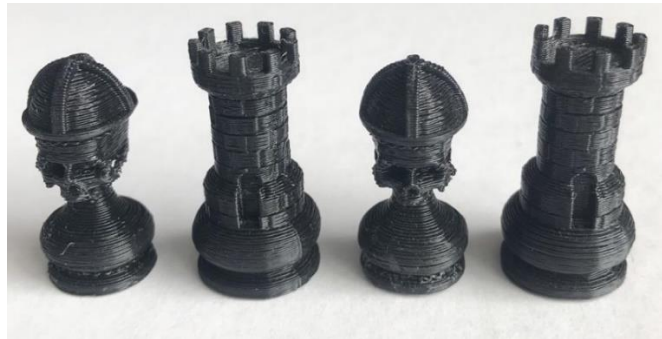
| <b>Pieza impresa</b>         | <b>Tiempo de impresión (min)</b> | <b>Gasto energético (KW)</b> | <b>Gasto económico (\$)</b> |
|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Parte superior de carcasa    | 101                              | 0.00799                      | 0.00633                     |
| Parte inferior de carcasa    | 115                              | 0.00910                      | 0.00721                     |
| Peón ajedrez                 | 62                               | 0.00490                      | 0.00389                     |
| Torre ajedrez                | 61                               | 0.00482                      | 0.00382                     |
| Tripie de cámara WEB         | 355                              | 0.02810                      | 0.02228                     |
| Tope para rollo de filamento | 8                                | 0.00063                      | 0.00050                     |
| Soporte de final de carrera  | 18                               | 0.00142                      | 0.00112                     |
| Soporte de filamento         | 69                               | 0.00546                      | 0.00432                     |

A continuación, se mostrarán las piezas realizadas. La figura 4.2 muestra las partes de una carcasa que en inicio se diseñó con el objetivo de contener al sistema ciber físico y al módulo de relevadores. Tales piezas son “Parte superior de carcasa” y “Parte inferior de carcasa”.



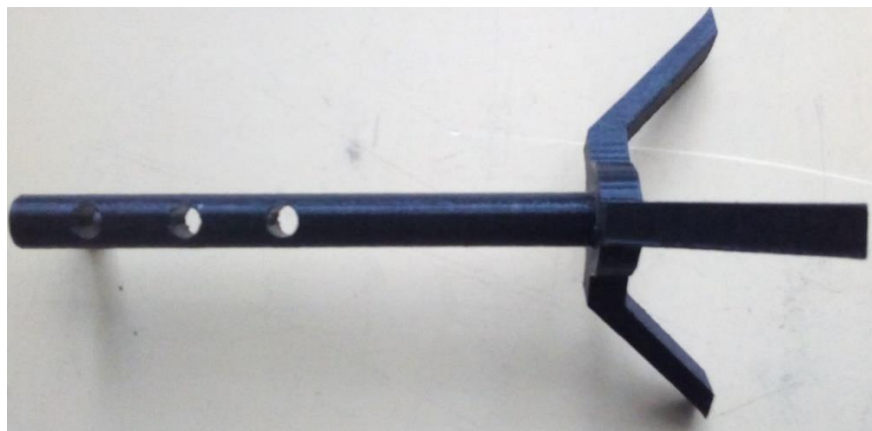
*Figura 4.2. Partes de carcasa*

Las siguientes son las piezas de ajedrez. La figura 4.3 muestra dos piezas de cada tipo, que son “Peón Ajedrez” y “Torre Ajedrez”. Son de las piezas más pequeñas impresas por el sistema.



*Figura 4.3. Piezas de ajedrez*

Una de las piezas más largas y quizá más elaboradas es la mostrada en la figura 4.4 que es “Tripie de cámara web”. Dicha pieza requirió la colocación de soportes para poder imprimirla, pues las patas no hubieran quedado firmes sin dichos soportes.



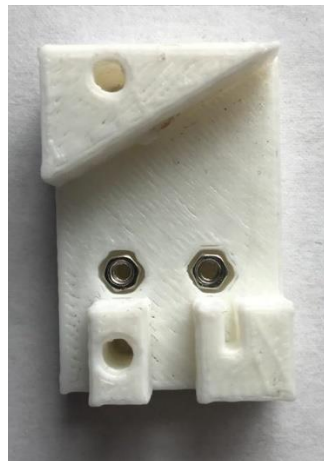
*Figura 4.4. Tripie para cámara web*

En la figura 4.5 se puede ver la pieza “Tope para el rollo de filamento”, a la cual se le coloca un tornillo que permite la compresión de las pestañas rectangulares causando que estas presionen el tubo y el rollo de filamento no se mueva más allá de donde se coloca esta pieza.



*Figura 4.5. Tope de rollo de filamento*

En la figura 4.6 se muestra la pieza “Soporte de final de carrera”, pieza utilizada para colocar el interruptor de final de carrera que sirve para la detección de la falta de filamento. A esta pieza se le colocaron un par de tuercas que sirven para sujetar el interruptor.



*Figura 4.6. Soporte de final de carrera*

Por último, se muestra en la figura 4.10 la pieza “Soporte para filamento” que tiene la función de contener a la pieza anterior. Contiene también un par de huecos para colocar tuercas que sirven para fijar la pieza de la figura 4.7.

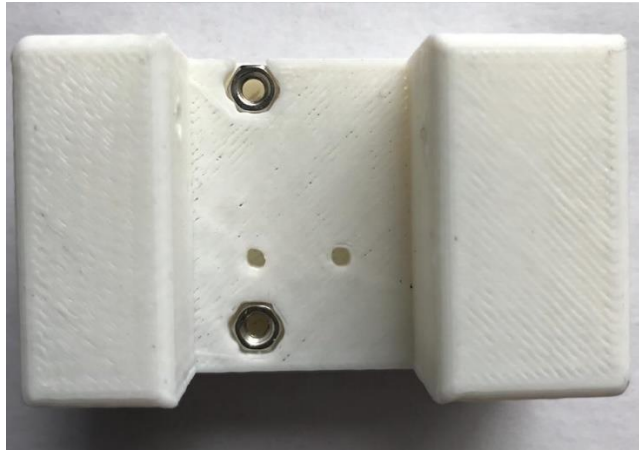


Figura 4.7. Soporte para filamento.

Todos los anteriores son ejemplos de piezas que se imprimieron con el sistema propuesto, llevándolo desde su diseño digital en *SolidWorks* (carcasa, tripie, tope de filamento y soportes de interruptor y filamento) o a través de la búsqueda del archivo digital en internet (piezas de ajedrez), pasando por su renderizado y por último su impresión real, pasando del archivo digital a un objeto físico.

#### 4.1.3. Ahorro energético y económico

El sistema de impresión 3D remoto tiene más ventajas además de la facilidad de control y supervisión a distancia. Algunas de esas ventajas son el ahorro energético y económico. Dado que el método descrito se centra en el sistema ciber físico como método de control de la impresora (o impresoras), se toma en cuenta que el gasto energético de dicho dispositivo es el equivalente a la fuente de poder utilizada para alimentarlo. Tomando esa consideración se procede a describir la diferencia del gasto energético y económico entre un sistema convencional de impresión a través del uso de una computadora y el desarrollado.

Suponiendo que se quiere imprimir una pieza de 19 horas de duración, la computadora empleada realiza un consumo de energía (obtenido directamente del cargador del equipo) de 50.916 Wh (Watts/Hora) lo que equivale a 0.051 KWh (Kilowatt/Hora)

aproximadamente. Según los datos arrojados por la CFE, la tarifa eléctrica del Kilowatt/Hora sería de 0.793 pesos en un consumo básico [96].

Siguiendo con el ejemplo anterior, y tomando en consideración que la computadora estaría conectada las 19 horas para evitar que se apague, se obtiene que el consumo de energía eléctrica sería el siguiente:

$$\text{Consumo de la computadora} = (0.051 \text{ KWh})(19) = 0.969 \text{ KWh}$$

$$\text{Gasto de energía eléctrica} = (0.969 \text{ KWh})(0.793) = 0.768$$

En total, para la fabricación de la pieza, se estaría gastando un total de 77 centavos, lo cual no puede representar una cantidad significativa, pero esto es tomando en cuenta una tarifa doméstica de servicio básico cuyo gasto energético es el más barato por lo que, considerando piezas que requieran el mismo tiempo para su fabricación, si este gasto se realiza por semana, por mes o por año los números son más elevados. Además de esto, si se tienen más de una máquina, el gasto aumenta, ya que cada una de las máquinas requeriría un equipo de cómputo para poder operar.

Ahora, por parte de la tecnología desarrollada, la fuente de poder gasta un aproximado de 0.0095 KWh por dos horas de uso continuo, por lo tanto, el gasto aproximado por una hora es de 0.00475 [97]. Siguiendo con el ejemplo de la pieza de 19 horas de duración, se calcula el gasto de energía eléctrica del sistema ciber físico, obteniendo los resultados siguientes:

$$\text{Consumo de la tarjeta} = (0.00475 \text{ KWh})(19) = 0.09025 \text{ KWh}$$

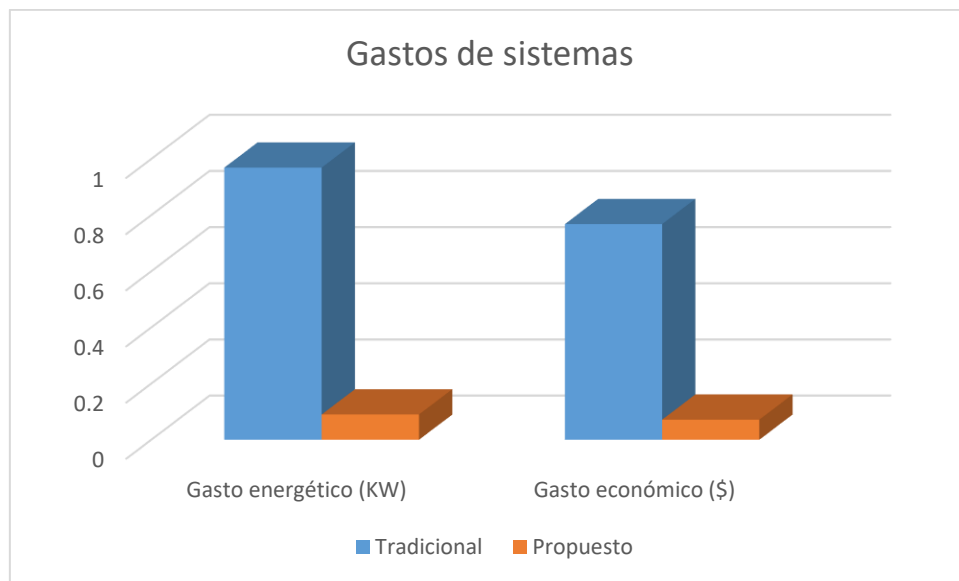
$$\text{Gasto de energía eléctrica} = (0.09025 \text{ KWh})(0.793) = 0.0715$$

Por tanto, como se puede notar, el gasto de la impresión utilizando el sistema ciber físico sería de 7 centavos, además de señalar nuevamente que este puede controlar más de una máquina (el consumo no incluye el gasto que realiza la máquina

conectada, esto solo es del equipo controlador) con la ventaja de poder supervisar a través de un dispositivo móvil. Los resultados pueden verse de manera resumida en la Tabla 4.2 y de manera más grafica en la figura 4.8.

*Tabla 4.2. Comparación de gasto energético*

| Sistema     | Gasto energético (KW) | Gasto económico (\$) |
|-------------|-----------------------|----------------------|
| Tradicional | 0.969                 | 0.768                |
| Propuesto   | 0.090025              | 0.0715               |



*Figura 4.8. Grafica de comparación de gasto energético*

Esta es otra de las razones por las que la tecnología desarrollada tiene ciertas ventajas sobre los métodos de impresión 3D tradicionales, pues el gasto tanto energético como económico de varias piezas al día, semana, mes o año es considerablemente bajo en comparación al método de la computadora.

#### 4.1.4. Efectividad del sistema

Para comprobar la eficiencia del sistema, se realizaron pruebas de funcionamiento empleando los dispositivos móviles mencionados en la sección de materiales y métodos. Las pruebas se realizaron a lo largo de tres días, utilizando una red de internet de 20 megabits de velocidad arrojando los datos mostrados en las tablas 4.3 a 4.5. Dichos datos muestran el promedio de los tres días en que las pruebas se ejecutaron, seguido de su desviación estándar ( $\sigma$ ).

Las pruebas se centraron en observar y registrar el retraso en tiempo transcurrido al momento de pulsar los diferentes comandos en la pantalla del dispositivo móvil y el momento que la acción se ejecutó en la impresora y los elementos de control extras. El tiempo para dichas pruebas se midió con un cronómetro. Las pruebas fueron las mismas para cada dispositivo, todas hacen referencia al retraso con el que la acción fue ejecutada al realizar la operación, siendo las siguientes:

Prueba 1. El internet estuvo siendo utilizado exclusivamente por el sistema ciber físico, es decir, ningún otro dispositivo estaba utilizando la red de internet a excepción claro, del dispositivo móvil que se utilizó en su momento para la prueba.

Prueba 2: Se realizó con el internet siendo utilizado por más dispositivos en el lugar, sobre todo reproduciendo videos en calidad HD.

Prueba 3. Para esta prueba, se estaba realizando una descarga de 2 GB de información, lo cual hacía que el internet estuviera ocupado para esa descarga.

La tabla 4.3 muestra el retraso de movimiento de los motores en todos los ejes (X, Y, Z) y en ambas direcciones posibles (izquierda o derecha para X, hacia delante o hacia atrás en Y o hacia arriba y abajo en Z) realizando las acciones con cada dispositivo móvil, mostrándose de manera gráfica en la figura 4.9.



Tabla 4.3. Tiempos de movimiento de motores

| Dispositivo | Prueba 1 (seg)         | Prueba 2 (seg)         | Prueba 3 (seg)         |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Laptop      | 0.88, $\sigma = 0.029$ | 0.86, $\sigma = 0.009$ | 1.23, $\sigma = 0.048$ |
| Celular     | 0.89, $\sigma = 0.012$ | 0.87, $\sigma = 0.016$ | 1.27, $\sigma = 0.018$ |
| Tablet      | 0.96, $\sigma = 0.028$ | 0.94, $\sigma = 0.029$ | 1.44, $\sigma = 0.016$ |

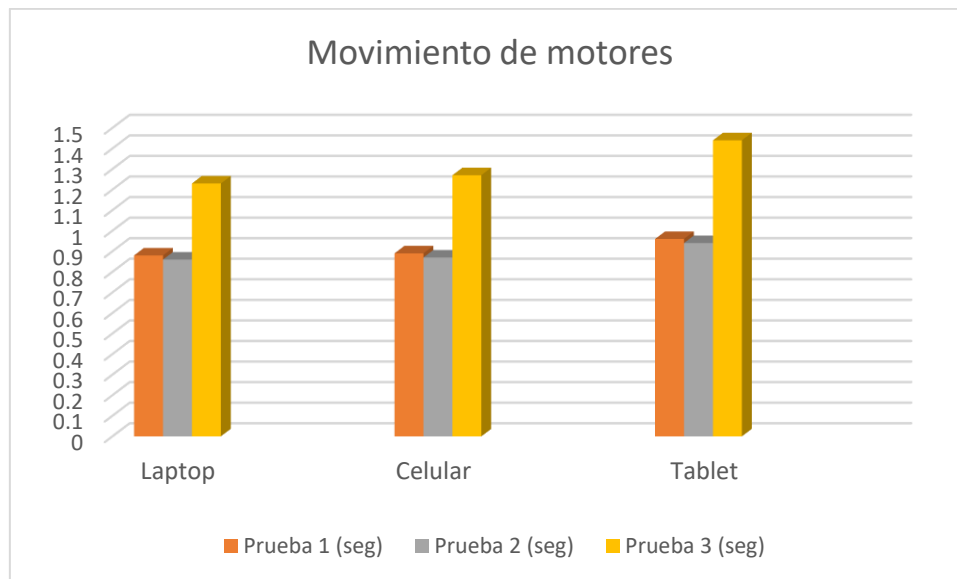


Figura 4.9 Gráfica de tiempos de pruebas de movimiento de motores

La tabla 4.4 muestra el retardo del encendido y apagado de los LED al ejecutar los comandos con cada dispositivo móvil. Su respectiva grafica se muestra en la figura 4.10.

Tabla 4.4. Tiempos de encendido y apagado de LED

| Dispositivo | Prueba 1 (seg)         | Prueba 2 (seg)         | Prueba 3 (seg)         |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Laptop      | 1.60, $\sigma = 0.020$ | 1.61, $\sigma = 0.012$ | 1.77, $\sigma = 0.004$ |
| Celular     | 1.62, $\sigma = 0.009$ | 1.62, $\sigma = 0.020$ | 1.82, $\sigma = 0.020$ |
| Tablet      | 1.73, $\sigma = 0.012$ | 1.75, $\sigma = 0.012$ | 1.89, $\sigma = 0.021$ |

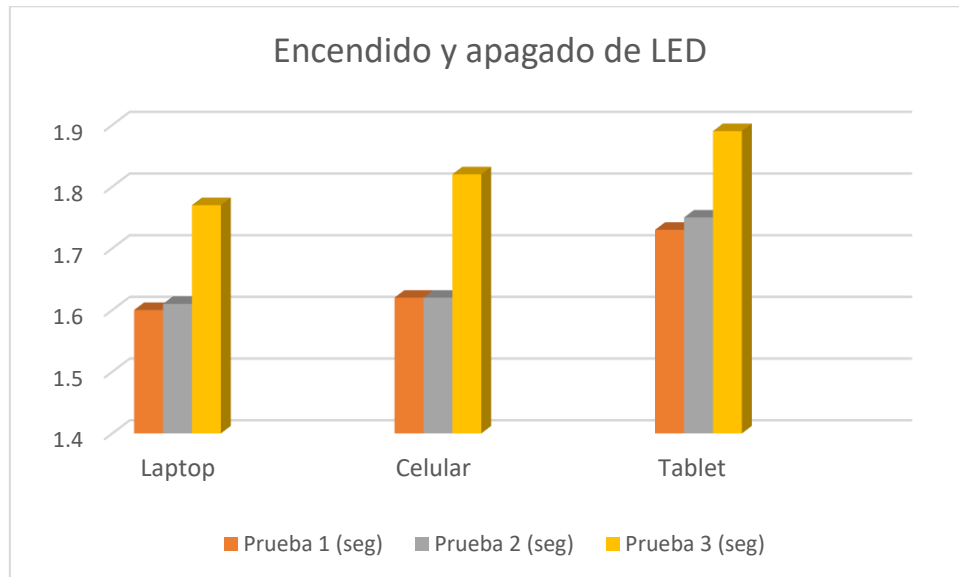


Figura 4.10. Grafica de tiempos de prueba de encendido y apagado de LED

Por último, la tabla 4.5 muestra el retraso de la visión de la cámara web en comparación a cuando las acciones se realizan con cada uno de los dispositivos empleados, los datos se muestran gráficamente en la figura 4.11.

Tabla 4.5. Tiempos de cámara web

| Dispositivo | Prueba 1 (seg)         | Prueba 2 (seg)         | Prueba 3 (seg)         |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Laptop      | 1.63, $\sigma = 0.012$ | 3.22, $\sigma = 0.024$ | 3.44, $\sigma = 0.018$ |
| Celular     | 2.35, $\sigma = 0.024$ | 3.06, $\sigma = 0.018$ | 3.09, $\sigma = 0.018$ |
| Tablet      | 2.66, $\sigma = 0.023$ | 3.53, $\sigma = 0.040$ | 3.71, $\sigma = 0.020$ |

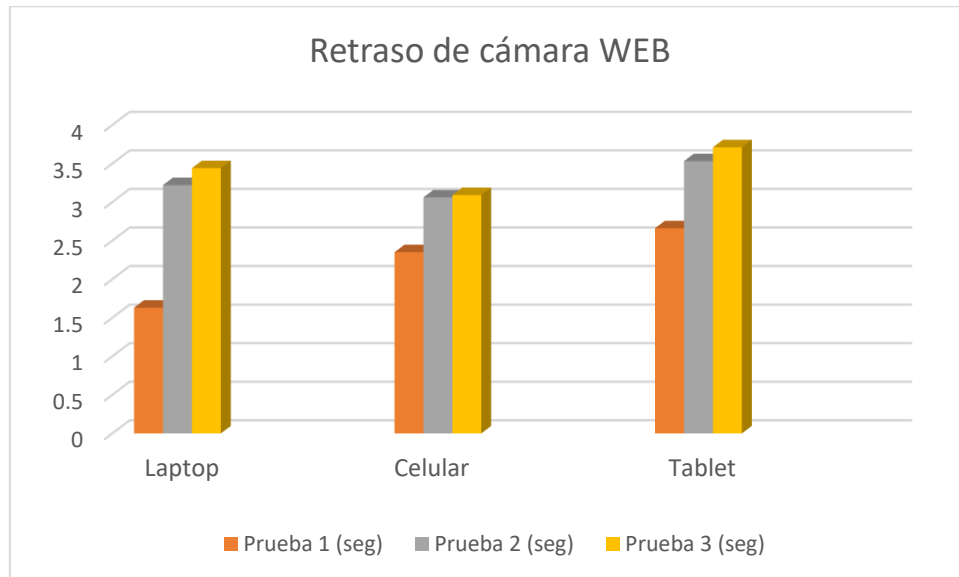


Figura 4.11. Grafica de tiempos de prueba de retraso de cámara WEB

De acuerdo con los resultados mostrados en las tablas y graficas anteriores, el tiempo de reacción de la impresora se comporta de manera eficiente en los dispositivos móviles utilizados para las pruebas, por lo que se observa que el desempeño de la tecnología de manufactura en la nube móvil es eficiente como alternativa a los procesos de impresión tradicionales.

#### 4.1.5. Funcionamiento de los sensores adicionales

Una parte fundamental para aumentar la eficiencia del sistema de impresión remoto son los sensores que se utilizaron. Estos sensores propiciaron un control mayor sobre el proceso de impresión pues sus funciones están relacionadas a un aspecto importante a cuidar al momento de realizar una impresión 3D; el módulo de relevadores provee iluminación sin la necesidad de contar con un foco encendido, además del cuidado del extrusor y la cama al apagarlos por inactividad; el sensor DHT11 muestra la temperatura y humedad dentro de la cámara de impresión, previniendo al usuario sobre una posible falla en la impresión debido a cambios de temperatura y por último el interruptor de fin de carrera, el cual alerta sobre la falta o ruptura del filamento, evitado la obtención de una pieza fallida.

#### 4.1.5.1. Apagado y encendido de LED

Para el encendido y apagado de los LED, el sistema reaccionó bien. Gracias a los datos arrojados por una de las tablas de la sección anterior, se puede observar que los comandos encargados de esta acción son efectivos, evitando tener alguna fuente de luz tal como un foco o una lámpara. Estos comandos pueden encenderse y apagarse según se requiera, además, en caso de no querer tener la luz LED encendida durante la noche, la luz puede apagarse y la impresión continuar sin problemas, ya que el sensor de filamento o la notificación de conclusión de impresión aportan supervisión adicional.

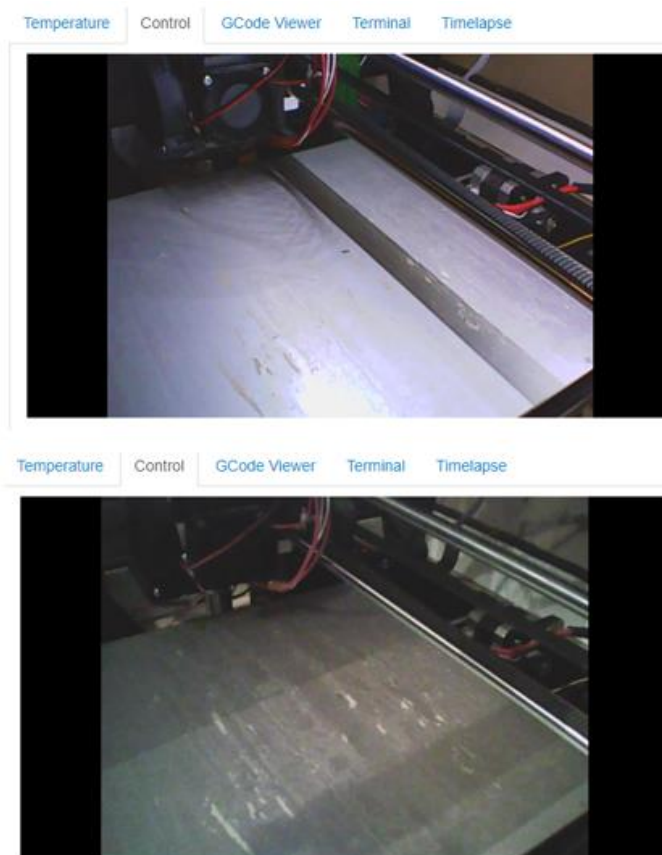


Figura 4.12. Prueba de encendido de LEDS, arriba: LED encendido; abajo: LED apagado

La figura 4.12 muestra un ejemplo del encendido y apagado de los LED vistos en la plataforma de manufactura en la nube desde la cámara web. En la parte superior de

la imagen se puede observar la iluminación proporcionada por los LED, mientras que la parte inferior de la imagen muestra como se ve la impresora con los LED apagados.

Visto frontalmente y no a través de la plataforma de manufactura en la nube, se puede apreciar mejor la diferencia entre la iluminación dada por los LED. La figura 4.13 muestra desde fuera de la cámara de impresión como se ve la impresora 3D cuando esta iluminada y cuando no lo está.

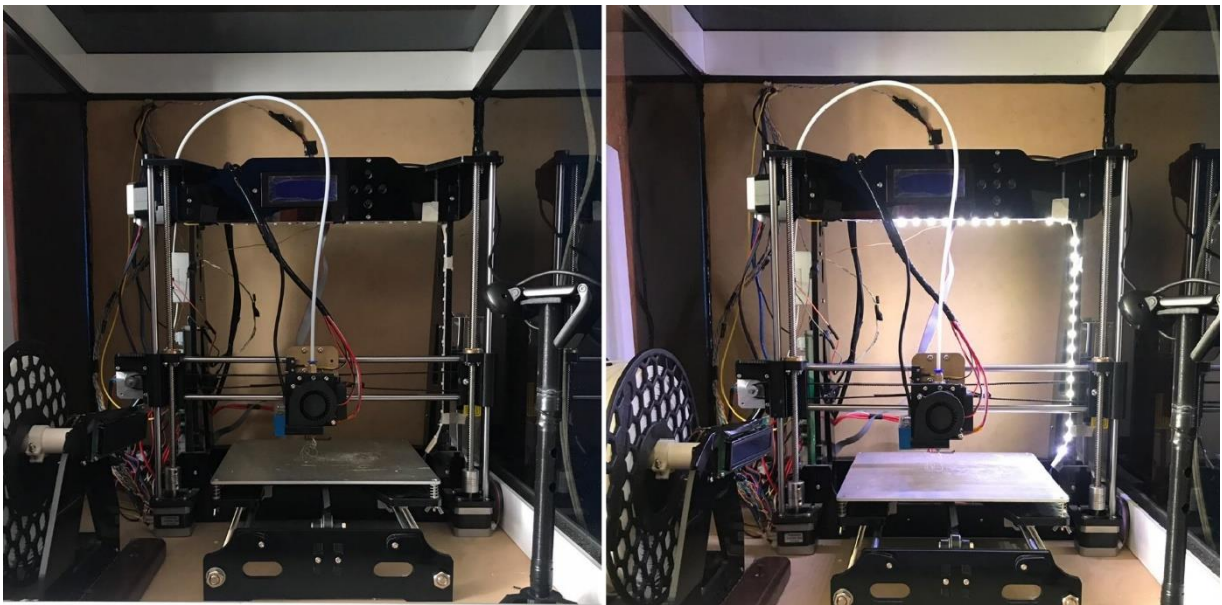


Figura 4.13. LED apagados y encendidos

Vistas las imágenes, se observa que el sistema de iluminación es eficaz, ya que la luz proporcionada por los LED más el control a través del módulo de relevadores permite tener un mayor monitoreo y control sobre el proceso de impresión.

#### 4.1.5.2. Apagado de cama o extrusor

Al igual que la iluminación de la impresora, este apartado se relaciona con el módulo de relevadores. Según la configuración dada, el relevador y la plataforma de manufactura en la nube detectan cuando la cama de la impresora o el extrusor tienen una temperatura de 40 °C o superior y si han pasado 10 minutos sin que se realice



Con respecto a la lectura de la pantalla LCD instalada y configurada para que muestren los datos obtenidos por el sensor DHT11 únicamente se mostraran una serie de datos a la vez (uno para temperatura y otro para humedad), los cuales cambian, pero no arrojan un historial como el que lanza *Putty*. En la figura 4.15 se muestra la pantalla arrojando los datos que el sensor está obteniendo, de modo que se puedan observar en la interfaz de *Octoprint* a través de la cámara.



Figura 4.15. Pantalla LCD mostrando los datos de sensor DHT11

Estos datos arrojados por el sensor permiten tener un conocimiento del ambiente, lo cual es sumamente importante antes de querer iniciar alguna impresión 3D, pues si existen variaciones constantes, la calidad de las piezas su puede ver comprometida, y como los datos de interés son los mostrados en la pantalla LCD que es la que se puede ver desde la cámara y por lo tanto en el dispositivo móvil, se puede saber si es conveniente o no seguir fabricando piezas.

#### 4.1.5.4. Interruptor de final de carrera

Para este sensor, se realizó la prueba de detección con un pequeño trozo de filamento simulando una impresión 3D y otra con el sensor ya colocado en la impresora y realizando una impresión sencilla con el filamento cortado para que se terminara mientras aun la impresión no concluía. Ambas pruebas se realizaron 3 veces para



comprobar que el sensor es funcional. A pesar de que el sensor no requiere un programa en *Python* para cumplir su labor, se puede verificar que éste está funcionando a través de *Putty*, como lo muestra la figura 4.16 donde se puede observar que el sensor envía señal a la plataforma de manufactura en la nube pausando la impresión si ocurrió alguna falla.

```
octoprint.plugins.filamentreload - INFO - Setting up s
octoprint.plugins.filamentreload - INFO - Using BCM Mo
octoprint.plugins.filamentreload - INFO - Filament Sen
]
octoprint.plugins.filamentreload - INFO - PrintStarted
.
octoprint.util.comm - INFO - M110 detected, setting cu
octoprint.plugins.filamentreload - INFO - Out of filament!
octoprint.plugins.filamentreload - INFO - Pausing print.
octoprint.server.util.sockjs - INFO - Client connection closed:
```

Figura 4.16. Sensor para filamento pausando la impresión al detectar falta de material

Por tanto, el funcionamiento del interruptor de final de carrera permite tener control sobre el filamento, ya que la ruptura de éste es de las fallas más comunes y es la causante de impresiones fallidas. Así, al tener conocimiento sobre si hay o no un flujo de filamento, el control del proceso de impresión aumenta, pues al primer fallo en el filamento el sistema pausa la impresión para tomar una medida de seguridad, para con ello, una vez corregido el problema, la impresión puede reanudarse y completarse satisfactoriamente.

#### 4.1.6. Notificación de finalización de impresión

Por último, está el envío del mensaje de conclusión de impresión al celular. Gracias a la configuración de *Twilio* y el plugin necesario en la plataforma de manufactura en la nube, el sistema envía un mensaje de celular cada vez que una de las piezas ha sido concluida. Una vez la impresora termina el proceso y vuelve a su posición de origen, el mensaje es enviado inmediatamente mostrando el nombre de la pieza que ha sido



concluida en conjunto con el tiempo que esta tarda en realizarse. Esto resulta ser de gran ayuda en caso de que se requiera hacer otra pieza después de que alguna termine, por lo que sabiendo que la impresión a concluido se puede retirar la pieza terminada e inmediatamente después comenzar con el proceso de impresión de la siguiente. Otro ejemplo puede ser que al saber que una impresión ha concluido y no se requiere hacer otra, pero el sistema de iluminación este encendido, este se puede apagar una vez sabiendo que la impresión concluyo.

En la figura 4.17 se muestra un ejemplo de los mensajes recibidos cuando la impresión ha sido concluida, en el segundo se muestra el perfil de la impresora (Tronxy) el nombre del archivo impreso (Prueba\_SMS\_gcode.gcode) y en el tercero se muestra el tiempo que tomo fabricar la pieza, que fue de casi 7 minutos.

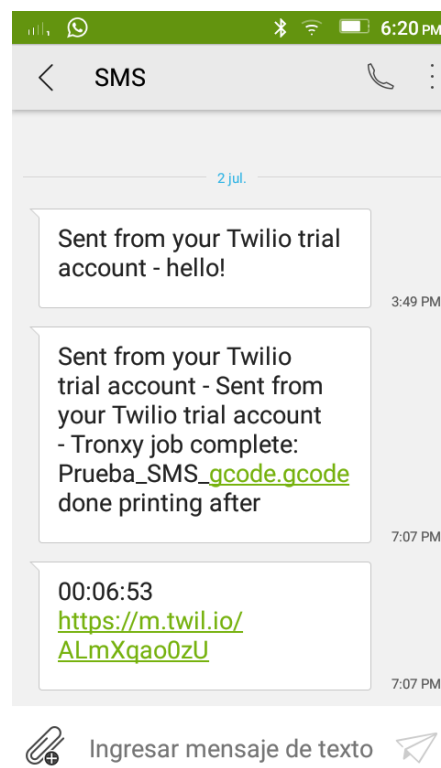


Figura 4.17. Ejemplo de mensaje recibido

Todo lo descrito hasta este punto son los resultados arrojados al utilizar la tecnología de manufactura en la nube móvil con sistemas ciber físicos aplicado en impresión 3D.

Cada uno de dichos resultados demuestra que la tecnología desarrollada tiene ventajas sobre los métodos tradicionales de impresión 3D, pues la efectividad que tiene se ve reflejada en varios aspectos, yendo desde la comodidad que ofrece al utilizar un simple teléfono celular para controlar y supervisar la impresora 3D hasta el ahorro energético y económico generado por el uso del sistema ciber físico en sustitución de una computadora. Además, en conjunto con los sensores agregados, el sistema se vuelve más eficiente y el control y supervisión aumentan considerablemente. Sin embargo, un detalle a destacar es que la tecnología es dependiente del internet, por lo que, si por alguna razón este se pierde, el sistema dejara de funcionar, cancelando la impresión.

## 4.2. Productos generados

### 4.2.1. Artículos con índices de impacto

#### 4.2.1.1. Año 2019

1. D.A. Silva Ramírez, R. Jaramillo Martínez, M.R. Martínez Blanco, J.M. Ortiz Rodríguez (2019). **Control y monitoreo de impresoras 3D mediante computación en la nube móvil**. Propuestas de innovación de los avances en investigación de la SEPI ESIME Zacatenco (invitación y trabajo en proceso).

En este documento se describe el proceso de impresión 3D controlado por dispositivos móviles desde algunos elementos utilizados hasta algunas configuraciones enfocándose especialmente en las ventajas que tiene en comparación con los métodos tradicionales de impresión 3D, destacando entre estos el ahorro energético y económico otorgado por el proceso de impresión remoto.

2. Martínez Blanco M.R., Silva Ramírez D., Jaramillo Martínez R., Ortiz Rodríguez J.M. (2019). **3D printing control and monitoring with Mobile cloud**

**manufacturing.** Artículo en proceso de revisión para revista indizada de la IEEE.

El documento expone las características de una nueva tecnología conocida como manufactura en la nube móvil, además del desarrollo de nuevos elementos tecnológicos que se especializan en la explotación de la manufactura en la nube móvil.

#### 4.2.2. Participación en congresos

##### 4.2.2.1. Año 2018

1. D.A. Silva Ramírez, R. Jaramillo Martínez, M.R. Martínez Blanco, J.M. Ortiz Rodríguez (2018). **Control y monitoreo de impresoras 3D mediante computación en la nube móvil.** XVII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CNIES 2018) Ciudad de México, México.

En este documento se describe el proceso de impresión 3D controlado por dispositivos móviles desde algunos elementos utilizados hasta algunas configuraciones enfocándose especialmente en las ventajas que tiene en comparación con los métodos tradicionales de impresión 3D, destacando entre estos el ahorro energético y económico otorgado por el proceso de impresión remoto.

##### 4.2.2.2. Año 2019

2. Martínez Blanco M.R., Silva Ramírez D., Jaramillo Martínez R., Ortiz Rodríguez J.M. (2019). **3D printing control and monitoring with Mobile cloud manufacturing.** XXVIII Reunión Internacional de Otoño de comunicaciones, computación, electrónica, automatización, robótica y exposición industrial. Acapulco, Guerrero.

El documento expone las características de una nueva tecnología conocida como manufactura en la nube móvil, además del desarrollo de nuevos elementos tecnológicos que se especializan en la explotación de la manufactura en la nube móvil.

### 4.2.3. Registros de derechos de autor

Como parte de los productos obtenidos en la presente tesis de maestría, se desarrollaron un par de códigos que permiten a ciertos sensores del sistema, iniciar su proceso de censado al energizar el sistema ciber físico, esto debido a que no están ligados a un plugin de la plataforma de manufactura en la nube, por lo tanto, debían ser configurados de distinta manera. A continuación, se enlistan los registros de derechos de autor realizados.

1. Código que permite al sensor DHT11 iniciar el censado de los parámetros al energizar la tarjeta electrónica.
2. Código que permite al primer sensor utilizado como detector de filamento (sensor infrarrojo) enviar señal al ser energizado, enviando una alarma al detectar falla en él filamento.
3. Registro del documento de tesis.

### 4.2.4. Certificaciones

#### 4.2.4.1. Año 2017

SolidWorks CSWA otorgando el nivel de Asociado dentro de la comunidad de SolidWorks.

#### 4.2.4.2. Año 2018

SolidWorks CSWP otorgando el nivel de Profesional dentro de la comunidad de SolidWorks.

## 4.3. Discusión

El objetivo del proyecto fue diseñar e implementar en un sistema ciber físico, tecnología de manufactura en la nube móvil para control y monitoreo de impresión 3D,

mismo que se pudo lograr satisfactoriamente. Esta tecnología tiene como principal ventaja el control y supervisión remotos de las impresoras 3D, siendo, por varias características que se describirán a continuación, una opción más viable que los sistemas de impresión 3D tradicionales.

Como primer punto, se tiene el uso del sistema ciber físico como sustituto de la computadora para poder ejercer el control de la impresora. A pesar de que el sistema ciber físico no es precisamente de bajo costo, el beneficio se ve reflejado a corto plazo, pues una computadora es más costosa y es menos viable que esta se dañe por el constante uso del cargador pues eso disminuye la vida útil de la batería de la máquina. Además, la tarjeta electrónica gasta 90% menos energía en fabricar las piezas que la computadora, por tanto, no solo se está protegiendo el equipo de cómputo, sino que además se reduce el costo energético y económico al utilizar una o varias impresoras 3D, pues el sistema ciber físico no solo se limita a la conexión de una máquina.

El segundo punto es la plataforma de manufactura elegida. Esta al ser un software de código abierto está constantemente siendo actualizado y mejorado para que su uso sea más viable y sea menos riesgoso dejar la máquina trabajando sin supervisión presencial. Otro punto destacable es lo amigable de la plataforma, pues no se requiere de mucha investigación para saber cómo se controla lo básico, que es el movimiento de los motores y la carga e impresión de piezas. Por último, la pantalla que muestra la cámara es lo suficientemente grande para poder tener la supervisión requerida y percatarse de algún fallo a tiempo.

El tercer punto es el uso de los sensores implementados, que controlan un elemento de importancia para el correcto proceso de fabricación de piezas 3D. Al controlar la iluminación (gracias al módulo de relevadores) se puede tener mayor supervisión sobre la fabricación de la pieza, y si no se requiere iluminación, no es necesario ir hasta el lugar donde está la impresora para apagar una lámpara o una luz de habitación, solo basta con presionar un comando desde el dispositivo móvil y la luz se apaga o se enciende. Así mismo, si no hay actividad en la impresora, esta dejará de

calentar sus elementos para evitar que se dañen por uso constante. También, conocer la temperatura y la humedad del ambiente de la cámara de impresión (sensor DHT11) ayuda a determinar si es viable imprimir alguna pieza o si por el contrario es mejor esperar a que el ambiente sea más estable para evitar tener piezas terminadas pero dañadas estructuralmente. Por último, como falla más común en impresiones 3D, se encuentra la falta o rotura de filamento, circunstancia que está controlada al pausar la impresión automáticamente si se diera el caso de falla de filamento (interruptor de final de carrera). Cabe destacar que, en esta última parte, se utilizó primeramente un sensor infrarrojo que detectaba presencia, si el filamento se acababa o rompía, el sensor, que tenía una tapa, detectaba el filamento roto que se movía dentro de la tapa y pausaba la impresión e incluso encendía un LED de alarma. Al principio, el sensor funcionó bien, pero al realizar dos pruebas de una impresión con una duración de 12 horas, al cabo de un tiempo el sensor comenzaba a realizar detecciones fallidas, quizá por el calor del ambiente o por el excesivo movimiento de los ejes de la impresora. Al final se sustituyó por el final de carrera, el cual no presento dichas fallas.

Como último punto, está la notificación de que la impresión ha concluido. A pesar de que existe la posibilidad de enviar un correo electrónico, la opción más viable fue la de un envío de mensaje al celular, ya que casi cualquier persona hace uso de este tipo de dispositivo. Esta acción ayuda a tomar la decisión siguiente una vez la impresión de una pieza finalizó, así se evita tener tiempo muerto si se requieren más impresiones o se apaga el equipo si ya no va a ser utilizado.

Después de analizar los resultados obtenidos y los puntos anteriormente descritos, se observa que la tecnología desarrollada no solo es más cómoda de utilizar, sino que tiene mayores elementos de control del proceso de impresión 3D, además de otorgar ahorro energético y económico, lo que aumenta de manera sustancial su uso como opción principal de impresión 3D, dejando de lado el uso de la computadora y la memoria microSD como métodos de fabricación de piezas 3D.

Aun así, al utilizar el sistema, se presentaron pequeños inconvenientes siendo el mayor problema la obtención de piezas fallidas, estas fallas se debían principalmente a movimientos no deseados en la impresora que desfasaban el filamento o cables que se desoldaban arrojando un error y cancelando las impresiones. Como se puede notar, las fallas están relacionada a la impresora 3D mas no al sistema, ya que la plataforma de manufactura en la nube nunca tuvo conflictos de movimiento. Aun así, esta se congelaba de vez en cuando y solo si en un lapso corto de tiempo (10 minutos aproximadamente) se habían pausado o cancelado al menos 5 intentos de impresión de piezas. De alguna manera, la plataforma interpreta esto como un error y por seguridad se bloquea para evitar daños tanto al sistema ciber físico como a la impresora. Si esto sucedía, bastaba con desconectar completamente el sistema y la impresora, esperar como mínimo media hora, y pasado ese tiempo al volver a utilizar el sistema, este respondía como si nada hubiera sucedido. Un problema que está relacionado directamente a la tecnología desarrollada es la perdida de la señal de internet, lo que causa que el sistema se apague y la impresión en curso se cancele. Esta es quizá la desventaja que tiene la manufactura en la nube móvil comparado a los sistemas tradicionales, ya que estos últimos únicamente dejan de operar si la energía eléctrica se pierde, sin embargo, la tecnología propuesta está ligada a esa falla y a la perdida de internet, siendo dos medios de pérdida de energía.

Aun con todo lo que implicó, el desarrollo del proyecto muestra que las tecnologías más actuales o de mayor impacto dentro de la Industria 4.0 siempre pueden mejorar, sobre todo si se combinan varias áreas para generar nuevas características, pues en el caso de este proyecto, el internet de las cosas, el cómputo en la nube, los dispositivos móviles, sistemas ciber físicos y las impresoras 3D, todas tecnologías de gran importancia en la industria 4.0, sirvieron como complemento unas de las otras para el diseño e implementación en un sistema ciber físico de tecnología de manufactura en la nube móvil para control y monitoreo de impresión 3D, término generado a partir del uso de varios elementos que permitieron demostrar la importancia del uso del internet, las mejoras que pueden hacerse a la impresión 3D, incluso destacar usos más especializados de los dispositivos móviles, todo con el

objetivo de lograr una meta propia de la nueva revolución industrial que es la fabricación digital.



---

## Capítulo 5

# Conclusiones

---

En la actualidad, la impresión 3D es una tecnología de gran peso en la evolución de la industria manufacturera, área que debe buscar el objetivo primordial de la Industria 4.0, que es la fabricación digital. A pesar de contar con elementos de digitalización, la impresión 3D se lleva a cabo por medio de dos métodos, siendo el primero la inserción de una memoria microSD con un archivo cargado directo a la máquina, y el segundo es por medio de la conexión de una computadora que contiene un software que realiza la fabricación de las piezas. En cuanto a este último, se debe considerar que la computadora que sirve como medio de control requiere estar encendida en todo momento pues de suspenderse o apagarse, la señal se pierde deteniendo automáticamente la impresión en curso, lo que implica que debe estar encendida y conectada en todo momento, sobre todo si la impresión se deja sin supervisión, por ejemplo, a altas horas de la noche. Esto provoca daños a mediano y largo plazo en el equipo de cómputo y representa un gasto energético considerable sobre todo si es más de una computadora la que está trabajando.

Lo que ambos métodos comparten es que requieren una supervisión constante y presencial lo cual causa que el proceso de impresión 3D, sobre todo si la pieza es de larga duración, sea cansado y difícil de seguir. A esto, se le debe sumar el hecho de que si el filamento se termina o se rompe y no se está supervisando constantemente la impresión, la pieza no se fabricará correctamente. Hay que añadir además el uso de

lucos que permiten supervisar el proceso de impresión, ya sea focos de habitación o lámparas, iluminación necesaria para llevar un control de la pieza que se está fabricando. Por último, está el hecho de no saber cuándo ha concluido una impresión 3D, aspecto que es importante conocer debido a las acciones que deben hacerse después de que el proceso ha finalizado. Por tanto, a pesar de que la impresión 3D se basa en transformar un archivo digital a un objeto real, el proceso como tal no está digitalizado en su totalidad debido en gran parte a la necesaria presencia del usuario para controlar y supervisar la fabricación de piezas.

En consecuencia, se observó que era necesario contar con un sistema de control y supervisión de impresoras 3D que eliminara la dependencia de la presencia del usuario en todo momento, sistema que además pudiera ser utilizado por medio de dispositivos móviles, pues estos son elementos muy utilizados en la actualidad. Debido a esto, se desarrolló el proyecto presentado en este documento, pues gracias al uso de ciertas tecnologías tales como el cómputo en la nube y los dispositivos móviles se pudo obtener control y monitoreo de impresoras 3D realizados de manera remota y cómoda para el usuario, logrando con esto el objetivo establecido en el documento, el cual fue alcanzado de manera satisfactoria pues se logró diseñar e implementar en un sistema ciber físico, tecnología de manufactura en la nube móvil para control y monitoreo de impresión 3D.

Los dispositivos móviles utilizados, a pesar de sus limitaciones de recursos, mostraron ser útiles y funcionales como un medio de control de las impresoras, dispositivos que no gastaron sus recursos al mostrar la interfaz de la plataforma de manufactura nube de manera fluida sin la necesidad de descargas de aplicaciones, ya que lo único que se requiere es el uso del navegador del dispositivo pues solo basta con escribir la dirección IP necesaria para acceder a la plataforma, concluyendo entonces que, si un dispositivo móvil puede conectarse a internet, este puede servir como medio de control del sistema, pues la plataforma de manufactura en la nube no requiere marcas, tipos ni modelos de dispositivos móviles específicos para poder ser utilizada.

En base a las características descritas de los métodos de impresión 3D tradicionales, la tecnología utilizada mostró tener ventajas significativas al compararse con dichos métodos, pues con la ayuda de diferentes sensores y configuraciones adicionales, el proceso de impresión 3D se ve altamente mejorado.

Iniciando por el uso del sistema ciber físico como medio de control principal, mismo que permite la conexión de más de una impresora 3D, es un elemento que se utiliza como sustituto de un equipo de cómputo y que se reserva para el uso de la impresión 3D a diferencia de una computadora que generalmente se utiliza para otras acciones, por lo que limitarla como un medio de control de impresión 3D no es viable, sobre todo si se trata de una computadora de uso personal.

Por parte de la plataforma de manufactura en la nube, el hecho de ser de código abierto permite que el usuario realice las modificaciones necesarias para la adaptación de nuevos elementos, además de estar siendo actualizada y mejorada constantemente, lo que permite tener mayores posibilidades de mejora del sistema. Otra característica importante es su renderizado interno configurable, característica que elimina el uso de un software adicional pues este solo se utiliza si se requiere crear un nuevo perfil de renderizado, lo que le da al sistema un punto más como sistema digital, ya que las piezas se guardan en la misma plataforma en su archivo STL y los renderizados disponibles pueden hacer que una misma pieza se pueda renderizar de diferente manera, evitando con esto utilizar un software adicional para tener distintos archivos de renderizado y asignarles nombres diferentes para su reconocimiento.

Adicionalmente, con el uso de la cámara web, el proceso de impresión 3D puede vigilarse de vez en cuando para asegurarse que no ha tenido fallas (las cuales por lo regular suelen ser mecánicas debido a la impresora utilizada) sin necesidad de desplazarse al lugar donde está trabajando la máquina y, por tanto, dejar de lado otras actividades que se puedan estar llevando a cabo.

En cuanto a los sensores, cada uno de estos se implementó para solucionar deficiencias o problemas de la impresión 3D tradicional. El módulo de relevadores, por ejemplo, cubre el problema de la iluminación, pues gracias a la tira LED que se colocó en la impresora, y el uso de algunos plugin y configuraciones, el sistema cuenta con su propia fuente de iluminación, la cual se puede encender y apagar en el momento que se requiera. Este sensor también ayuda a la desactivación de los termistores que calientan la cama o el extrusor en caso no se esté haciendo uso de la impresora, evitando así un uso no deseado de los elementos propios de la máquina, incrementando su periodo de vida. El sensor de temperatura y humedad permite conocer las características del ambiente dentro de la cámara de impresión, previniendo realizar impresiones en caso existan cambios bruscos en la temperatura y la humedad, cambios que pueden hacer que las piezas a pesar de estar terminadas sufran de debilidad estructural. Gracias a la cámara de impresión, estas variaciones no suelen aparecer con frecuencia, pues los cambios que más afectan son corrientes de aire o paredes muy húmedas y frías, aun así, es importante conocer si no existen variaciones de estos parámetros para saber si es conveniente seguir imprimiendo o esperar a que el ambiente sea más estable. El último es el sensor de filamento, que pausa la impresión en curso si detecta la falta de filamento a través de su sistema de alarma, lo cual permite al usuario tomar medidas al respecto sin la necesidad de cancelar o reiniciar la pieza que se está fabricando en el momento, hecho que puede ser realmente desagradable si la impresión está por concluir. Cabe señalar que este sensor no reinicia automáticamente la impresión, debe ser el mismo usuario el que manualmente lo haga lo cual aumenta la seguridad al utilizar este elemento.

Para mejorar más el sistema, se tiene el mensaje de notificación de conclusión de una impresión, situación que debe conocerse para poder tomar una decisión de que se va a hacer después, ya sea pedirle a alguien que retire la pieza para iniciar otra, apagar el equipo, apagar o encender los LED, entre otras situaciones.

Por último, se destacan el ahorro energético y económico que implica utilizar el sistema propuesto, los cuales son de hasta un 90% en comparación con el uso constante de

una computadora, lo que conlleva a mantenerla conectada en todo momento para evitar la pérdida de la señal. Además, como se mencionó, el sistema ciber físico puede tener más de un equipo conectado, lo cual reduce aún más los gastos de producción de las piezas tanto energéticamente como de manera económica.

Como adición, se destaca la utilidad de este método de impresión 3D, pues puede ser utilizado de manera particular, donde cada persona tiene su sistema y lo utiliza para realizar proyectos propios, o puede también ser de uso didáctico si se implementa en instituciones educativas en donde se requiere enseñar a las nuevas generaciones la importancia de la digitalización y el avance que implica la Industria 4.0 en la vida cotidiana, incluso puede utilizarse en el medio empresarial, pues con sus mejoras requeridas puede adaptarse para ofrecer servicios de impresión 3D remotos.

Debido a todo lo mencionado anteriormente, se puede asegurar que la tecnología es apta para su uso como sustitución de los métodos de impresión tradicionales pues no se limita solo a otorgar comodidad por el uso de un dispositivo móvil de uso diario como un teléfono inteligente, sino que además es eficiente, segura, reduce costos de producción, otorga mayor control y supervisión y lo más destacable, se convierte en manufactura remota, lo que lo convierte en un sistema de Industria 4.0, pues, se transforma en un medio de fabricación digital, que es la meta que en la industria manufacturera.

Aun con todo esto, si hay algo que afecta al sistema es su dependencia al uso del internet, por lo que una pérdida de la señal de la red o una señal no constante o baja provoca fallo en el proceso de impresión, desde un desfasamiento de la cama o del extrusor, hasta la cancelación de la impresión, aunque sobre este elemento no se tiene control del todo, tener una buena señal de internet es crucial para el correcto funcionamiento del sistema, por lo que un internet de alta velocidad es requerido para evitar fallos inesperados.

## 5.1. Prospectivas

A pesar de las ventajas demostradas por el sistema propuesto en este documento, aún existen algunos puntos en los cuales se puede trabajar para con ello aumentar la eficiencia y utilidad del sistema. Dichos puntos se muestran a continuación:

- Aumento de sensores.

El sistema demuestra ser funcional y tener gran control sobre aspectos a considerar al momento de realizar el proceso de la impresión 3D. Sin embargo, si se coloca mayor cantidad de sensores, el sistema puede aumentar su eficiencia de manera considerable, un ejemplo de esto sería colocar un módulo Bluetooth que permita controlar la impresora en caso el internet no esté disponible, pues a pesar de no ser tan remoto como el control por Wi-Fi, permite que el sistema no sea dependiente de la computadora.

- Uso de plugin

El estudio de las características y utilidades de lo plugin puede mejorar considerablemente las características de control del sistema, un ejemplo de esto es el plugin llamado “FilamentManager” que permite llevar un control de la cantidad de filamento utilizada por una u otra máquina o extrusor, mostrando cuanto es el filamento inicial y cuanto el restante, aspecto que es importante al momento de querer imprimir una pieza, pues si el filamento restante no es suficiente para fabricar la pieza (que muestra el estimado de filamento que requiere para su impresión) se puede cambiar a otro filamento. Otro plugin interesante es “Auto bed leveling expert” que ayuda con la nivelación de la cama y extrusor de la impresora, e incluso “Grbl support for Octoprint” que permite el uso de máquinas CNC o grabadoras láser dentro de la interfaz. Algunos dependen de contar con ciertas características especiales, pero existen muchos otro que son más generales y pueden incrementar la eficiencia del sistema o darle características más atractivas.

- Implementación de placas de circuito impreso como sustitución de elementos

Existe la posibilidad de sustituir varios elementos utilizados para el proyecto por placas de circuito impreso que cumplan las mismas funciones y se puedan conectar directamente a los pines GPIO del sistema ciber físico sin la necesidad de utilizar cables. Un ejemplo es el módulo de relevadores, el cual puede anexarse en una placa y agregarle unos conectores que permitan aumentar el número de relevadores para distintas funciones y conectarse directamente al sistema ciber físico. Esto se hace para evitar las protoboard y los cableados que pueden desconectarse, romperse o sustituirse, pero conservando las funciones que se requieren como los potenciómetros, por poner un ejemplo.

- Sistema complementario de retiro de piezas.

A pesar de que esto es más un desarrollo que da pie a otro proyecto se puede llegar a complementar el sistema de impresión remota a través de un sistema que pueda retirar las piezas una vez estas hayan sido terminadas. Esto sería útil especialmente si se requiere imprimir varias piezas, de esta forma se retira la pieza concluida y por medio del dispositivo móvil se inicia el proceso de impresión de la pieza siguiente.

## Apoyos

---

- Este trabajo fue parcialmente apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación de CONACyT bajo el convenio 241771.
- Este trabajo fue apoyado por la empresa OMADS S.A. de C.V.
- Se agradece al Programa Nacional de Posgrados de Calidad de CONACyT por la beca otorgada como alumno de maestría en el posgrado de Ingeniería y Tecnología Aplicada con número de becario 828509.
- Se agradece al Laboratorio de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Inteligencia Artificial (LIDTIA) con sede en la Universidad Autónoma de Zacatecas por el apoyo otorgado para el correcto desarrollo del proyecto y la oportunidad de formar parte de su equipo en el área de manufactura avanzada.
- Se agradece al Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada con sede en la Universidad Autónoma de Zacatecas por la oportunidad otorgada de formar parte de su equipo de trabajo en el área de Maestría.



---

## Bibliografía

---

- [1] «Las herramientas de piedra en nuestra prehistoria», Parque Lineal del Manzanares. .
- [2] A. Gómez-Castanedo, «El Olduvayense: la industria de piedra tallada más antigua en África. Una visión general y algunas reflexiones.», *Rev. Sautuola*.
- [3] K. Witkowski, «Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 – Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management», *Procedia Eng.*, vol. 182, n.o Supplement C, pp. 763-769, ene. 2017.
- [4] «Las revoluciones industriales - Enciclopedia | Banrepcultural». [En línea]. Disponible en: [http://enciclopedia.banrepcultural.org/index.php?title=Las\\_revoluciones\\_industriales](http://enciclopedia.banrepcultural.org/index.php?title=Las_revoluciones_industriales). [Accedido: 08-ene-2018].
- [5] «Las tres Revoluciones Industriales», *Escuelapedia - Recursos educativos*, 26-may-2012. .
- [6] E. por: L. Portillo, «Edad de los metales: Cobre, Bronce y Hierro». .
- [7] «Edad de los Metales | Qué es, características, etapas, herramientas, arte», *Euston96*, 06-dic-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.euston96.com/edad-de-los-metales/>. [Accedido: 08-ene-2018].
- [8] M. Gabriel y E. Pessl, «Industry 4.0 and Sustainability Impacts: Critical Discussion of Sustainability Aspects with a Special Focus on Future of Work and Ecological Consequences», *Ann. Fac. Eng. Hunedoara - Int. J. Eng.*, vol. 14, n.o 2, pp. 131-136, may 2016.
- [9] J. Qin, Y. Liu, y R. Grosvenor, «A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond», *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 173-178, ene. 2016.
- [10] T. Stock y G. Seliger, «Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0», *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 536-541, ene. 2016.
- [11] A. Schumacher, S. Erol, y W. Sihn, «A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises», *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 161-166, ene. 2016.
- [12] S. Erol, A. Jäger, P. Hold, K. Ott, y W. Sihn, «Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production», *Procedia CIRP*, vol. 54, pp. 13-18, ene. 2016.
- [13] M. Pan et al., «Applying Industry 4.0 to the Jurong Island Eco-industrial Park», *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1536-1541, ago. 2015.
- [14] J. Chen et al., «CPS Modeling of CNC Machine Tool Work Processes Using an Instruction-Domain Based Approach», *Engineering*, vol. 1, n.o 2, pp. 247-260, jun. 2015.
- [15] N. Shariatzadeh, T. Lundholm, L. Lindberg, y G. Sivard, «Integration of Digital Factory with Smart Factory Based on Internet of Things», *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 512-517, ene. 2016.

- [16] «Axiomatic Design Applied to the Development of a System for Monitoring and Teleoperation of a CNC Machine through the Internet - ScienceDirect». [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116307181>. [Accedido: 08-mar-2018].
- [17] J. O. Adam, *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2017.
- [18] «CAM / Manufactura Asistida por Computadora», *prezi.com*. [En línea]. Disponible en: <https://prezi.com/-mkti1jkb9/cam-manufactura-asistida-por-computadora/>. [Accedido: 28-may-2017].
- [19] «CAM / Manufactura Asistida por Computadora: Siemens PLM Software». [En línea]. Disponible en: [https://www.plm.automation.siemens.com/es\\_mx/plm/cam.shtml](https://www.plm.automation.siemens.com/es_mx/plm/cam.shtml). [Accedido: 28-may-2017].
- [20] I. Khajenasiri, A. Estebasari, M. Verhelst, y G. Gielen, «A Review on Internet of Things Solutions for Intelligent Energy Control in Buildings for Smart City Applications», *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 770-779, mar. 2017.
- [21] P. P. Ray, «A survey on Internet of Things architectures», *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, oct. 2016.
- [22] A. Meola, «What is the Internet of Things (IoT)?», *Business Insider*. [En línea]. Disponible en: <http://www.businessinsider.com/what-is-the-internet-of-things-definition-2016-8>. [Accedido: 28-may-2017].
- [23] S. Mehmi, H. K. Verma, y A. L. Sangal, «Simulation modeling of cloud computing for smart grid using CloudSim», *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 4, n.o 1, pp. 159-172, may 2017.
- [24] S. Elsherbiny, E. Eldaydamony, M. Alrahmawy, y A. E. Reyad, «An extended Intelligent Water Drops algorithm for workflow scheduling in cloud computing environment», *Egypt. Inform. J.*, jul. 2017.
- [25] D. Golightly, S. Sharples, H. Patel, y S. Ratchev, «Manufacturing in the cloud: A human factors perspective», *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 55, pp. 12-21, sep. 2016.
- [26] F. Gu, J. Niu, Z. Qi, y M. Atiquzzaman, «Partitioning and offloading in smart mobile devices for mobile cloud computing: State of the art and future directions», *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 119, pp. 83-96, oct. 2018.
- [27] H. Kchaou, Z. Kechaou, y A. M. Alimi, «Towards an Offloading Framework based on Big Data Analytics in Mobile Cloud Computing Environments», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 53, pp. 292-297, ene. 2015.
- [28] S. Alonso-Monsalve, F. García-Carballeira, y A. Calderón, «A heterogeneous mobile cloud computing model for hybrid clouds», *Future Gener. Comput. Syst.*, abr. 2018.
- [29] P. K. Paritala, S. Manchikatla, y P. K. D. V. Yarlagadda, «Digital Manufacturing- Applications Past, Current, and Future Trends», *Procedia Eng.*, vol. 174, pp. 982-991, 2017.
- [30] D.-A. Türk, L. Triebe, y M. Meboldt, «Combining Additive Manufacturing with Advanced Composites for Highly Integrated Robotic Structures», *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 402-407, ene. 2016.
- [31] A. Patwardhan, «Chapter 22 - How 3D Printing Will Change the Future of Borrowing Lending and Spending?», en *Handbook of Blockchain, Digital Finance, and Inclusion, Volume 2*, Academic Press, 2018, pp. 493-520.
- [32] M. G. Mitchell, «Chapter 2 - Applications of 3D Printing in Cell Biology», en *Cell Biology*, Boston: Academic Press, 2016, pp. 121-162.
- [33] A. C. Majarena, J. J. Aguilar, y J. Santolaria, «Development of an error compensation case study for 3D printers», *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 864-871, ene. 2017.
- [34] «17854.pdf». [En línea]. Disponible en: [http://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local\\_repository/documents/17854.pdf](http://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf). [Accedido: 11-mar-2018].

- [35] «The Free Beginner's Guide - 3D Printing Industry». [En línea]. Disponible en: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>. [Accedido: 11-mar-2018].
- [36] A. Guerrero-de-Mier, M. M. Espinosa, y M. Domínguez, «Azara: A New 32 bit RepRap with Improved Performance», *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 118-125, ene. 2015.
- [37] T. Faustino Andrade, P. Abreu, M. Restivo, M. de F. Chouzal, B. F. Santos, y J. Rodrigues, «Enhancing a 3D Printer with Online Access», *Int. J. Interact. Mob. Technol. IJIM*, vol. 11, p. 44, jul. 2017.
- [38] C. Prinz, F. Morlock, S. Freith, N. Kreggenfeld, D. Kreimeier, y B. Kuhlenkötter, «Learning Factory Modules for Smart Factories in Industrie 4.0», *Procedia CIRP*, vol. 54, pp. 113-118, ene. 2016.
- [39] R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodríguez, X. Corbella, R. Busqué, y G. Gomez-Gras, «Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier», *Mechatronics*, vol. 36, pp. 119-126, jun. 2016.
- [40] «IMPRESORAS 3D». [En línea]. Disponible en: [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:8vktPBNKLUJ:https://www.edu.xunta.gal/centros/cfrvigo/aulavirtual2/pluginfile.php/17609/mod\\_folder/content/0/Fundamentos\\_en\\_impresion\\_3D\\_con\\_PS3Steel.pdf%3Fforcedownload%3D1+&cd=7&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:8vktPBNKLUJ:https://www.edu.xunta.gal/centros/cfrvigo/aulavirtual2/pluginfile.php/17609/mod_folder/content/0/Fundamentos_en_impresion_3D_con_PS3Steel.pdf%3Fforcedownload%3D1+&cd=7&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx). [Accedido: 21-sep-2018].
- [41] M. Chiang, B. Balasubramanian, y F. Bonomi, *Fog for 5G and IoT*. John Wiley & Sons, 2017.
- [42] D. Freire-Obregón, F. Narducci, S. Barra, y M. Castrillón-Santana, «Deep learning for source camera identification on mobile devices», *Pattern Recognit. Lett.*, ene. 2018.
- [43] J. Díaz-García, P. Brunet, I. Navazo, y P.-P. Vázquez, «Progressive ray casting for volumetric models on mobile devices», *Comput. Graph.*, mar. 2018.
- [44] «Uso de dispositivos móviles», p. 29.
- [45] C. Zhang, P. Jiang, K. Cheng, X. W. Xu, y Y. Ma, «Configuration Design of the Add-on Cyber-physical System with CNC Machine Tools and its Application Perspectives», *Procedia CIRP*, vol. 56, pp. 360-365, ene. 2016.
- [46] R. Alguliyev, Y. Imamverdiyev, y L. Sukhostat, «Cyber-physical systems and their security issues», *Comput. Ind.*, vol. 100, pp. 212-223, sep. 2018.
- [47] J. Lopez y J. E. Rubio, «Access control for cyber-physical systems interconnected to the cloud», *Comput. Netw.*, vol. 134, pp. 46-54, abr. 2018.
- [48] A. Rigoni, G. Manduchi, A. Luchetta, C. Taliercio, y T. Schröder, «A framework for the integration of the development process of Linux FPGA System on Chip devices», *Fusion Eng. Des.*, vol. 128, pp. 122-125, mar. 2018.
- [49] X. Du et al., «Soft error evaluation and vulnerability analysis in Xilinx Zynq-7010 system-on chip», *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 831, pp. 344-348, sep. 2016.
- [50] R. Bansal y A. Karmakar, «Efficient integration of coprocessor in LEON3 processor pipeline for System-on-Chip design», *Microprocess. Microsyst.*, vol. 51, pp. 56-75, jun. 2017.
- [51] X. Du et al., «Single event effects sensitivity of low energy proton in Xilinx Zynq-7010 system-on chip», *Microelectron. Reliab.*, vol. 71, pp. 65-70, abr. 2017.
- [52] J.-P. Rudolph y C. Emmelmann, «A Cloud-based Platform for Automated Order Processing in Additive Manufacturing», *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 412-417, 2017.
- [53] F. W. Baumann, «3D printing-as-a-service for collaborative engineering», 2017.
- [54] InmaJG, «industria lítica qué es - Prehistoria de Asturias», *Historia de Asturias*, 13-oct-2014. [En línea]. Disponible en: <https://historiadeasturias.com/industria-litica/>. [Accedido: 08-ene-2018].

- [55] I. de la T. Sáinz, *La arqueología de los orígenes humanos en África*. Ediciones AKAL, 2008.
- [56] F. Rennung, C. T. Luminosu, y A. Draghici, «Service Provision in the Framework of Industry 4.0», *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 221, pp. 372-377, jun. 2016.
- [57] M. Chiregi y N. Jafari Navimipour, «Cloud computing and trust evaluation: A systematic literature review of the state-of-the-art mechanisms», *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, oct. 2017.
- [58] K. Gnanasekaran et al., «3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling», *Appl. Mater. Today*, vol. 9, pp. 21-28, dic. 2017.
- [59] P. Gómez-Pérez, M. Crego-García, I. Cuiñas, y R. F. S. Caldeirinha, «Modeling and inferring the attenuation induced by vegetation barriers at 2G/3G/4G cellular bands using Artificial Neural Networks», *Measurement*, vol. 98, pp. 262-275, feb. 2017.
- [60] P. Papcun, I. Zolotova, y K. Tafsi, «Control and Teleoperation of Robot Khepera via Android Mobile Device through Bluetooth and WiFi», *IFAC-Pap.*, vol. 49, n.o 25, pp. 188-193, ene. 2016.
- [61] P. J. Mosterman y J. Zander, «Industry 4.0 as a Cyber-Physical System study», *Softw. Syst. Model.*, vol. 15, n.o 1, pp. 17-29, feb. 2016.
- [62] N. Canadas, J. Machado, F. Soares, C. Barros, y L. Varela, «Simulation of cyber physical systems behaviour using timed plant models», *Mechatronics*, vol. 54, pp. 175-185, oct. 2018.
- [63] Y.-H. Fan, «Fast routing verification with complexity effect for SOC», *Appl. Comput. Inform.*, ene. 2018.
- [64] M. Kafara, J. Kemnitzer, H.-H. Westermann, y R. Steinhilper, «Influence of Binder Quantity on Dimensional Accuracy and Resilience in 3D-Printing», *Procedia Manuf.*, vol. 21, pp. 638-646, 2018.
- [65] «Plus2 - Orange Pi Plus2». [En línea]. Disponible en: <http://www.orangepi.org/orangepiplus2/>. [Accedido: 16-may-2018].
- [66] «ODROID | Hardkernel». [En línea]. Disponible en: [http://www.hardkernel.com/main/products/prdt\\_info.php?g\\_code=G145457216438](http://www.hardkernel.com/main/products/prdt_info.php?g_code=G145457216438). [Accedido: 16-may-2018].
- [67] «HummingBoard Pro», SolidRun. .
- [68] «BeagleBoard.org - black-wireless». [En línea]. Disponible en: <https://beagleboard.org/black-wireless>. [Accedido: 16-may-2018].
- [69] «LinkSprite pcDuino – LinkSprite». .
- [70] «Raspberry Pi 3 Model B», Raspberry Pi. .
- [71] «Jaguarboard: Jaguar One Plus». [En línea]. Disponible en: [http://www.jaguarboard.org/index.php/com\\_virtuemart\\_menu\\_configuration/products/buy/jaguarboard/220/jaguar-one-plus-detail.html](http://www.jaguarboard.org/index.php/com_virtuemart_menu_configuration/products/buy/jaguarboard/220/jaguar-one-plus-detail.html). [Accedido: 16-may-2018].
- [72] H. Ozbay, A. Karafil, Y. Onal, M. Kesler, y H. Parmaksiz, «The Monitoring of Monthly, Seasonal and Yearly Optimum Tilt Angles by Raspberry Pi Card for Bilecik City, Turkey», *Energy Procedia*, vol. 113, pp. 311-318, may 2017.
- [73] D. Shah y V. haradi, «IoT Based Biometrics Implementation on Raspberry Pi», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 79, pp. 328-336, ene. 2016.
- [74] «Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi», *Raspberry Pi*. [En línea]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/>. [Accedido: 23-sep-2017].
- [75] «Webcams known to work · foosel/OctoPrint Wiki · GitHub». [En línea]. Disponible en: <https://github.com/foosel/OctoPrint/wiki/Webcams-known-to-work>. [Accedido: 09-ago-2018].

- [76] «Módulo de 2 Relevadores (2 Canales) 5VDC». [En línea]. Disponible en: <http://teslabem.com/modul-de-2-relevadores-2-canales-5vdc.html>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [77] Regata, «Módulo de Relés», 08-oct-2012. .
- [78] «Aerial.net:: DHT11 1-Wire PCB Temperature / Humidity Sensor». [En línea]. Disponible en: [https://www.aerial.net/shop/product/161\\_196/1789/dht11-1wire-pcb-temperature.html](https://www.aerial.net/shop/product/161_196/1789/dht11-1wire-pcb-temperature.html). [Accedido: 07-jul-2018].
- [79] «354253011.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://descargas.cetronic.es/354253011.pdf>. [Accedido: 05-mar-2019].
- [80] designthemes, «Arduino y los displays de 16x2 | Tienda y Tutoriales Arduino». .
- [81] «SD Memory Card Formatter 5.0 for SD/SDHC/SDXC», SD Association. [En línea]. Disponible en: [https://www.sdcard.org/downloads/formatter\\_4/index.html](https://www.sdcard.org/downloads/formatter_4/index.html). [Accedido: 17-dic-2017].
- [82] «Win32DiskImager - Ubuntu Wiki». [En línea]. Disponible en: <https://wiki.ubuntu.com/Win32DiskImager>. [Accedido: 17-dic-2017].
- [83] «Download PuTTY - a free SSH and telnet client for Windows». [En línea]. Disponible en: <https://www.putty.org/>. [Accedido: 07-ago-2018].
- [84] P. por S. Caicedo, «Qué es SolidWorks?» .
- [85] uniat\_redes, «La importancia de SolidWorks y el diseño industrial», UNIAT, 26-may-2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.uniat.com/solidworks/>. [Accedido: 18-jun-2017].
- [86] «SolidWorks programa de diseño mecanico 3D». [En línea]. Disponible en: <http://www.3dcadportal.com/solid-works.html>. [Accedido: 18-jun-2017].
- [87] «<https://www.repetier.com/>», Repetier Software. [En línea]. Disponible en: <https://www.repetier.com/>. [Accedido: 23-sep-2017].
- [88] «Repetier-Host - RepRapWiki». [En línea]. Disponible en: <http://reprap.org/wiki/Repetier-Host>. [Accedido: 30-sep-2017].
- [89] G. Häußge, «OctoPrint.org», OctoPrint.org. [En línea]. Disponible en: <http://octoprint.org/>.
- [90] «Cloud 3D Printer Management Software». .
- [91] «Plataforma online para la Impresión 3D | AstroPrint®». [En línea]. Disponible en: <https://www.astroprint.com/es>. [Accedido: 18-may-2018].
- [92] G. Häußge, OctoPrint is the snappy web interface for your 3D printer! 2018.
- [93] «Conceptos generales - OctoPrint 1.3.9.post3.dev0 + g2f89082 documentación». [En línea]. Disponible en: <http://docs.octoprint.org/en/master/plugins/concepts.html>. [Accedido: 30-oct-2018].
- [94] «Plugins by Date», OctoPrint Plugin Repository. [En línea]. Disponible en: [https://plugins.octoprint.org/by\\_date/](https://plugins.octoprint.org/by_date/). [Accedido: 30-oct-2018].
- [95] «Twilio - Communication APIs for SMS, Voice, Video and Authentication». [En línea]. Disponible en: <https://www.twilio.com/>. [Accedido: 02-nov-2018].
- [96] «Tarifas - CFE». [En línea]. Disponible en: [http://app.cfe.gob.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/tarifas\\_casa.asp?Tarifa=DACTAR1&Anio=2016&mes=12&imprime=](http://app.cfe.gob.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/tarifas_casa.asp?Tarifa=DACTAR1&Anio=2016&mes=12&imprime=). [Accedido: 12-ene-2018].
- [97] «¿Cuánto pagas por cargar el celular? • Forbes México». [En línea]. Disponible en: <https://www.forbes.com.mx/cuanto-pagas-cargar-celular/>. [Accedido: 12-ene-2018].

# Currículum Vitae

---



**David Alejandro Silva Ramírez**

Maestro en ingeniería y tecnología aplicada

Teléfono celular: 492 202 1120

Correo electrónico: [dasr261092@gmail.com](mailto:dasr261092@gmail.com)

Domicilio: Emiliano Zapata 209, Colonia Miguel Hidalgo  
Segunda Sección, Zacatecas, Zacatecas, México

---

## EXPERIENCIA LABORAL

Empresa: ProtecZac,

Lugar: Zacatecas, Zacatecas

Fecha de inicio: agosto 2015, fecha de fin: mayo 2016

Puesto: Instalador de cámaras de seguridad

Actividades: Instalación, reinstalación y mantenimiento de equipos de seguridad tales como cámaras CCTV, alarmas de edificios y micrófonos.

## FORMACIÓN ACADÉMICA

Titulación: Maestro en ingeniería y tecnología aplicada

Institución: Universidad Autónoma de Zacatecas

Lugar: Zacatecas, Zacatecas, México

Fecha de inicio: enero 2017, fecha de fin: diciembre 2018

Titulación: Ingeniero electromecánico

Institución: Instituto Tecnológico de Zacatecas

Lugar: Zacatecas, Zacatecas, México

Fecha de inicio: agosto 2010, fecha de fin: diciembre 2014

## PRODUCTIVIDAD

### Artículos publicados en revistas con índices de impacto

Invitación a publicación en revista de IPN con ISSN con el artículo “Control y monitoreo de impresoras 3D mediante computación en la nube móvil”.

Artículo en proceso de revisión para revista de la IEEE que lleva por nombre “3D printing control and monitoring with mobile cloud manufacturing”.

### Participación en congresos internacionales

XXVIII Reunión internacional de otoño de comunicaciones, computación, electrónica, automatización, robótica y exposición industrial 2019 con sede en Acapulco, Guerrero.

### Participación en congresos nacionales

XVII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CNIES) 2018 con sede en IPN en Ciudad de México.

### Derechos de autor

Registro de código de arranque de sensor DHT11 en Raspberry Pi.

Registro de código de arranque de sensor PIR en Raspberry Pi.

Registro de documento de tesis de maestría.

## CURSOS Y CERTIFICACIONES

### Cursos

Conceptos básicos de SolidWorks

Dibujo 2D con DraftSight

Introducción a las tecnologías para la innovación

Preparación para la certificación CSWA

### Certificaciones

SolidWorks CSWA obtenida el 19 de agosto de 2017

SolidWorks CSWP obtenida el 19 de agosto de 2018

## IDIOMAS EXTRANJEROS

### Ingles

Nivel de escritura y lectura: Medio

Nivel de habla: Medio

## HABILIDADES INFORMÁTICAS

Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft PowerPoint, SolidWorks, AutoCAD, RepetierHost, Sony Vegas.