



Universidad Internacional de La Rioja
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología - ESIT

Máster Universitario en Industria 4.0

**Diseño de un sistema de fabricación
aditiva con fuentes de alimentación de
energía renovable**

Trabajo fin de estudio presentado por:	Córdova Uvidia, Rafael
Tipo de trabajo:	Investigación
Director:	Luna Molina, Francisco Javier
Fecha:	22/09/2021

Resumen

La fabricación aditiva (FA) se ha popularizado por la personalización de los productos y el consumo de menos materiales que los procesos convencionales; sin embargo, demanda mucha energía.

Con objeto de disminuir el consumo de energía de red que requiere un sistema de FA, en el presente trabajo se ha desarrollado un sistema de FA que utiliza energía fotovoltaica.

Puesto que las horas de luz solar en un determinado punto geográfico son limitadas, así como su intensidad es variable, con objeto de evitar paradas en la fabricación, el sistema de FA desarrollado consume también energía de red, no sólo energía solar fotovoltaica. No obstante, para minimizar el consumo de energía de red, los trabajos de impresión se catalogan en *urgentes*, para los que se usará energía de la red cuando la renovable se agote, y en *no urgentes*. El control y visualización de parámetros del sistema se realiza mediante sensores que envían datos a la plataforma *ThingSpeak*. La activación remota se realiza mediante dispositivos *SONOFF*, el sistema *Octoprint*, plugins de *Telegram*, *IFTTT* y *Alexa de Amazon*.

En el presente trabajo se ha comprobado que el sistema de FA desarrollado permitiría, en una ciudad con similares condiciones climáticas a Riobamba (Ecuador), realizar un trabajo de impresión de 4 horas consumiendo únicamente energía fotovoltaica o, lo que es lo mismo, reduciendo en un 100% el consumo de energía de red.

Palabras clave: manufactura aditiva, energía fotovoltaica, internet de las cosas, visualización de datos, medidor de energía

Abstract

Additive manufacturing (AM) has become popular due to the customization of products and the consumption of fewer materials than conventional processes; however, it requires a lot of energy.

In order to reduce the consumption of grid energy required by an AM system, in this work an AM system that uses photovoltaic energy has been developed.

Since the solar hours in a geographical point are limited, as the sun intensity is variable, to avoid manufacturing stoppages, the developed AM system also consumes grid energy, not only photovoltaic solar energy. However, to minimize grid power consumption, print jobs are categorized as *urgent*, for which grid power will be used when renewable runs out, and *non-urgent*. The control and visualization of system parameters is carried out by sensors that send data to the ThingSpeak platform. Remote activation is done using SONOFF devices, the Octoprint system, Telegram plugins, IFTTT and Amazon Alexa.

In this work it has been verified that the deployed AM system would allow, in a city with similar climatic conditions to Riobamba (Ecuador), to carry out a printing job of 4 hours consuming only photovoltaic energy, reducing up to 100% of the grid power consumption.

Keywords: additive manufacturing, photovoltaic energy, internet of things, data visualization, energy meter.

Índice de contenidos

1. Introducción.....	10
1.1. Motivación.....	10
1.2. Planteamiento del trabajo.....	10
1.3. Estructura del trabajo.....	12
2. Contexto y estado del arte.....	14
2.1. Contexto.....	14
2.2. Tecnologías relacionadas con el tema del TFM.....	14
2.2.1. Energía solar fotovoltaica.....	14
2.2.2. Fabricación aditiva.....	15
2.2.3. Internet de las cosas.....	15
2.2.4. Visualización de datos.....	15
2.2.5. Ciberseguridad.....	16
2.3. Uso de energías renovables en entornos industriales.....	16
2.4. Fabricación aditiva en la industria 4.0.....	19
2.4.1. Consumo de energía para la fabricación aditiva.....	20
2.5. Internet de las cosas en la visualización de datos.....	23
2.6. Ciberseguridad en las redes inteligentes de energías.....	25
2.6.1. Amenazas basadas en la conexión.....	25
2.6.2. Amenazas basadas en los dispositivos.....	25
2.7. Proyectos relacionados con el tema del TFM.....	26
2.7.1. Fabricación aditiva a escala global.....	26
2.7.2. Energías renovables para aplicaciones industriales.....	27
2.7.3. Medición inteligente de energía.....	28

2.8. Conclusiones sobre el estado del arte.....	30
2.8.1. Fabricación inteligente haciendo uso de energías renovables.....	30
2.8.2. Integración de habilitadores digitales en el contexto de la fabricación aditiva.....	30
3. Descripción general de la contribución del TFM.....	31
3.1. Objetivo general y objetivos específicos.....	31
3.2. Metodología del trabajo.....	31
3.3. Descripción de las partes y componentes de la propuesta.....	32
3.3.1. Descripción general de la propuesta.....	32
3.3.2. Alcance y limitaciones.....	33
3.3.3. Tecnologías implicadas.....	34
3.3.4. Arquitectura.....	38
3.3.5. Componentes e integración de tecnologías.....	40
3.3.6. Resultados esperados.....	45
3.3.7. Presupuesto y retorno esperado de la inversión.....	45
3.3.8. Planificación general.....	47
4. Desarrollo específico de la contribución del TFM.....	49
4.1. Desarrollo de instalaciones fotovoltaicas.....	49
4.1.1. Análisis de la demanda energética del sistema.....	49
4.1.2. Dimensionamiento de los paneles solares.....	50
4.1.3. Selección del controlador de carga solar.....	52
4.1.4. Acumulador solar.....	54
4.1.5. Inversor de onda senoidal.....	55
4.2. Integración de instalaciones fotovoltaicas con impresoras 3D.....	55
4.2.1. <i>Plugin The Spaghetti Detective</i> de <i>Octoprint</i>	56
4.3. Envío y visualización de los datos de los sensores en la nube.....	57

4.3.1. Datos del sistema solar fotovoltaico.....	57
4.3.2. Consumo de energía durante la impresión 3D.....	60
4.3.3. Parámetros meteorológicos de la instalación solar.....	63
4.4. Activación remota del sistema de fabricación aditiva.....	66
4.4.1. Integración de <i>EWELINK</i> y Alexa de <i>Amazon</i>	66
4.4.2. Integración de Octoprint y Telegram.....	66
4.5. Protocolo de funcionamiento para situaciones en que la energía solar almacenada es menor a la energía de trabajo de la máquina.....	67
4.6. Recomendaciones de ciberseguridad para el sistema.....	68
4.7. Resultado de una impresión en el sistema 3d desarrollado.....	70
5. Conclusiones y trabajo futuro.....	71
5.1. Conclusiones.....	71
5.2. Líneas de trabajo futuro.....	72
Referencias bibliográficas.....	73
Anexo A. Código de la tarjeta ESP8266 conectado al controlador de carga solar.....	77
Anexo B. Código del medidor de energía PZEM-004T v3.0.....	83
Anexo C. Código del medidor de parámetros meteorológicos.....	86
Anexo D. Archivo <i>secrets</i> con los datos de conexión WiFi.....	93

Índice de figuras

Figura 1. Habilitadores digitales de la <i>industria</i> 4.0. (Wikimedia, 2021).....	12
Figura 2. Consumo de energía global 2010-2050. (Cozzi et al., 2020) (traducción propia).....	18
Figura 3. Energía renovable a nivel mundial. (Our World in Data, 2020) (traducción propia).	18
Figura 4. Costo de sistemas fotovoltaicos desde 2000 a 2015 (Our World in Data, 2020) (traducción propia).....	19
Figura 5. Iniciativas más importantes de la Industria 4.0. (Dullaart, 2018) (traducción propia)	20
Figura 6. Las cinco Rs de la sostenibilidad. (Pinterest, s.f.) (traducción propia).....	21
Figura 7. Energía consumida en una impresora 3D. (Ajay, et al., 2017) (traducción propia)...	22
Figura 8. Máquina de fabricación aditiva FDM. (Agencia Espacial Europea, 2020).....	23
Figura 9. Infraestructura de medición avanzada. (Adaptado de Kabalci, 2016) (traducción propia).....	24
Figura 10. Curva de expectativas para la impresión 3D. (Goerke, 2019) (traducción propia).	27
Figura 11. Red inteligente de energía (ABB, 2020) (traducción propia).....	29
Figura 12. Interfaz de Octoprint. (Häußge, 2020).....	33
Figura 13. Impresora 3D Creality Ender 3 PRO. (impresoras3d.com, 2021).....	35
Figura 14. Arduino WiFi Rev.2 (izq) y ESP32 (der) (Arduino, 2021; ESPRESSIF, 2021).....	36
Figura 15. Sensor de energía PZEM-004T (izq), y actuador (der). (Alibaba, 2021).....	37
Figura 16. Flujo de información en ThingSpeak. (Mathworks, 2020) (traducción propia).....	38
Figura 17. Metas de seguridad de las TIC en redes inteligentes. (ENISA, 2012).....	39
Figura 18. Arquitectura para la propuesta planteada. (Elaboración propia).....	40
Figura 19. Componentes y conexiones del sistema propuesto. (Elaboración propia).....	42
Figura 20. Curva característica I - V para un panel solar. (Wikimedia.org, 2021).....	43
Figura 21. Voltaje en una batería vs. % de carga. (De Rooij, 2018) (traducción propia).....	44

Figura 22. Análisis del retorno esperado de la inversión. (Elaboración propia).....	48
Figura 23. Irradiación global horizontal en Ecuador. (Banco Mundial, 2018).....	51
Figura 24. Módulo solar instalado en Riobamba, Ecuador. (Elaboración propia).....	52
Figura 25. Controlador de carga solar EPEVER 3210 AN. (Elaboración propia).....	54
Figura 26. Banco de baterías instalado. (Elaboración propia).....	55
Figura 27. Inversor solar instalado. (Elaboración propia).....	56
Figura 28. Interfaz de Octoprint a través de TheSpaghettiDetective. (Elaboración propia)....	58
Figura 29. Conexión para el lector de datos del sistema fotovoltaico. (Elaboración propia). .	59
Figura 30. Parámetros del sistema fotovoltaico en ThingSpeak. (Elaboración propia).....	60
Figura 31. Conexión del sistema medidor de energía a la nube. (Elaboración propia).....	61
Figura 32. Valores eléctricos consumidos por el sistema. (Elaboración propia).....	62
Figura 33. Conexión del sistema de medición ambiental y solar (Elaboración propia).....	65
Figura 34. Parámetros meteorológicos del sitio de instalación. (Elaboración propia).....	66
Figura 35. Registro de dispositivos del sistema en EWELINK y Alexa. (Elaboración propia)....	67
Figura 36. Interfaz de control para el sistema de FA en Telegram. (Elaboración propia).....	68
Figura 37. Flujo en IFTTT para el apagado automático del sistema. (Elaboración propia).....	69
Figura 38. Interfaz de Eero para pausar o bloquear la señal WiFi. (Elaboración propia).....	70
Figura 39. Trabajo de impresión terminado. (Elaboración propia).....	71

Índice de tablas

Tabla 1. Consumo de energía en diferentes tecnologías de fabricación aditiva.....	21
Tabla 2. Presupuesto para el proyecto.....	46
Tabla 3. Planificación general del proyecto.....	48
Tabla 4. Demanda eléctrica del sistema de FA.....	49
Tabla 5. Detalles del protocolo MODBUS para el controlador solar Tracer AN 3210.....	53
Tabla 6. Conexiones entre el chip MAX485 y la tarjeta ESP8266.....	58
Tabla 7. Conexiones entre la PZEM-004T v3.0 y la tarjeta ESP32.....	60
Tabla 8. Conexiones entre los sensores ambientales y la tarjeta Arduino Uno WiFi Rev.2.....	64

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

La fabricación aditiva (FA) ha revolucionado la fabricación convencional y se usa cada vez más porque permite reducir el consumo de materiales, realizar procesos de prototipado rápido con poca necesidad de posprocesamiento, y la utilización de una impresora 3D es relativamente sencilla (Dilberoglu et al., 2017).

Si bien es cierto que, aunque la demanda básica de energía para la FA sea menor que para la fabricación tradicional, el tiempo de fabricación en ocasiones es más largo y esto ocasiona un consumo total de energía elevado (Balogun et al., 2014) lo que puede hacer menos atractiva la FA en dichas ocasiones, sobre todo en la actualidad, cuando existe la necesidad de cumplir con ciertas reglas de seguridad energética y de respeto al medio ambiente (Energy News Weekly, 2020).

Con objeto de reducir el consumo de energía de red de la FA, tanto para hacer la FA más atractiva como para cumplir con las exigencias medioambientales actuales, en el presente trabajo se desarrolla una impresora 3D que funciona tanto con energía de red como con energía solar fotovoltaica.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

Existe la oportunidad de desarrollar sistemas de FA que funcionen con energías renovables aprovechando las ventajas de algunos de los habilitadores digitales de la industria 4.0 que se muestra en la Figura 1, porque la tendencia de las nuevas fábricas es tener un funcionamiento automatizado, gran eficiencia y usar energía que provenga de fuentes renovables.



Figura 1. Habilitadores digitales de la industria 4.0. (Wikimedia, 2021)

Los habilitadores digitales de la industria 4.0 permiten crear una red inteligente de máquinas y procesos con fines industriales (ver Figura 1) que se encuentran interconectados entre sí. Para resolver la oportunidad planteada, se propone integrar los habilitadores digitales: internet de las cosas, *big data* y analítica, ciberseguridad y fabricación inteligente.

La integración de la industria 4.0 y las prácticas sostenibles puede fortalecer los mercados y mejorar la competitividad de las empresas (Daú et al., 2019). La pregunta de investigación que se pretende responder con el presente trabajo es: ¿Se puede desarrollar un sistema de FA utilizando energía fotovoltaica y los habilitadores digitales de la industria 4.0?

Entonces, se propone desarrollar un sistema de FA que sea alimentado por energía solar fotovoltaica, y que pueda ser controlado utilizando los habilitadores digitales de la industria 4.0. La interfaz del usuario permitirá acceder al sistema de forma remota a través de una conexión segura para controlar los ajustes del sistema y manejar el proceso de fabricación.

Los datos relacionados a producción y consumo de energía se almacenarán y visualizarán en la plataforma de internet de las cosas *ThingSpeak*, desde allí se enviará actualizaciones y alertas al terminal móvil del usuario, considerando las recomendaciones de ciberseguridad.

El trabajo podrá ser iniciado, pausado o cancelado desde la aplicación *TheSpaghettiDetective* que está basada en el sistema *Octoprint* mediante conexiones seguras, se recibirá notificaciones en *Telegram*, y en el caso de que el usuario no pueda monitorizar los procesos, se tendrá configuraciones que constantemente controlen el sistema, evitando así errores.

Para asegurar la culminación de las impresiones, el sistema tendrá dos estados: urgente, que utilizará la energía de la red eléctrica tradicional cuando la energía renovable sea escasa, y no urgente, en el que se utilizará exclusivamente la energía solar fotovoltaica.

1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo de fin de máster está estructurado en varios capítulos. A continuación se describe lo que incluye cada uno de los capítulos que integran el presente TFM:

En el capítulo de *Contexto y Estado del Arte* se muestra el entorno general del trabajo y una descripción del estado del arte de diferentes tecnologías que se ha revisado para fundamentarlo, estas son: uso de energías renovables en entornos industriales, fabricación aditiva en la industria 4.0, internet de las cosas para la visualización de datos, y ciberseguridad en redes inteligentes de energía.

A continuación, en el capítulo *Descripción General de la Contribución del TFM*, se presenta los objetivos del trabajo juntamente con la metodología secuencial seguida para su realización. La arquitectura de la propuesta y sus componentes se describen de forma general incluyendo las ecuaciones que se utilizará para dimensionar el sistema fotovoltaico. Finalmente, se incluye el presupuesto y la planificación general para el proyecto.

En el capítulo *Desarrollo Específico de la Contribución del TFM* se incluye el despliegue de las instalaciones fotovoltaicas, las conexiones y el código utilizado en las tarjetas microcontroladoras que han permitido enviar datos a la plataforma de internet de las cosas *ThingSpeak*. La validación se plantea en el contexto de un proyecto piloto, que utiliza un medidor inteligente de energía para evaluar el consumo de un sistema de FA basado en la impresora Ender 3 Pro. Los datos meteorológicos en el sitio de la instalación fotovoltaica se miden utilizando sensores GYML 8511 y BME680, mientras que los datos de producción solar se miden directamente en el controlador de carga utilizando la interfaz RS-485.

En el capítulo de *Conclusiones y Trabajo Futuro* se presenta las conclusiones del TFM donde se demuestra que los objetivos planteados han sido cumplidos. De la misma forma, se plantea líneas de trabajo futuro, que incluyen la integración de otras fuentes de energía renovable en el sistema, y la posibilidad de utilizar un sistema en isla. Un sistema en isla se encuentra aislado completamente de la red eléctrica tradicional, por lo que el dimensionamiento debe incluir únicamente el recurso solar disponible en un determinado punto geográfico, sin la posibilidad de contar con la red eléctrica tradicional para trabajos urgentes.

En el capítulo de *Referencias*, se recoge todas las referencias bibliográficas y enlaces de páginas web que se ha utilizado como fuentes de consulta para la realización del TFM. Las referencias se presentan de acuerdo con la normativa APA.

Finalmente, en el capítulo *Anexos* se muestra los programas desarrollados en el entorno de desarrollo integrado de Arduino para controlar las tarjetas microcontroladoras ESP8266, ESP32, y Arduino Uno WiFi Rev.2, y enviar los datos a la plataforma *ThingSpeak*.

2. CONTEXTO Y ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se describe el contexto en el que se realizará el proyecto, considerando el uso de energías renovables, fabricación aditiva, ciberseguridad, e internet de las cosas en entornos industriales. Luego, se describe proyectos que abordan uno o varios de los habilitadores digitales de la industria 4.0 que se ha mencionado; sin embargo, en ningún estudio se ha encontrado la integración de todos.

2.1. CONTEXTO

El presente proyecto se desarrolla en el contexto de un emprendimiento particular del autor ubicado en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo (Ecuador), que está enfocado a la impresión 3D de figuras y piezas utilizando filamentos termoplásticos, específicamente el ácido poliláctico (PLA). Actualmente, el emprendimiento cuenta con una impresora 3D Ender 3 Pro, que utiliza la energía de la red eléctrica tradicional, y una tarjeta micro USB en la que se carga los archivos para poder imprimirlos.

No siempre se puede realizar un monitoreo presencial durante todo el proceso de impresión por lo que a veces suceden errores que causan la pérdida total de la pieza que se está fabricando. Adicionalmente, dado que el proceso de impresión dura varias horas, la planilla de la electricidad cada mes es elevada, y en ocasiones, existen cortes de energía que provocan la interrupción completa de la fabricación.

La proyección a futuro de este emprendimiento es crear un sistema que permita utilizar la energía solar ampliamente disponible en la zona, para obtener energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos. Por otra parte, se requiere un sistema que permita medir la energía disponible, supervisar el proceso, enviar los trabajos de impresión de forma remota y cargar los archivos sin la necesidad de extraer la tarjeta de la impresora cada vez.

2.2. TECNOLOGÍAS RELACIONADAS CON EL TEMA DEL TFM

2.2.1. Energía solar fotovoltaica

Las energías renovables se están convirtiendo rápidamente en las fuentes de generación energética con mayor grado de inversión. Por el lado de la demanda, los consumidores buscan las fuentes de energía más fiables, económicas y respetuosas con el medio ambiente.

La energía solar fotovoltaica aprovecha los fotones provenientes del sol que alcanzan la superficie terrestre y convierte su energía en electricidad mediante el uso de dispositivos denominados paneles solares. Los módulos solares están contruidos de materiales semiconductores, tales como el silicio, que emiten electrones cuando absorben los fotones del sol (Ahmed Abdulkadir & Al-Turjman, 2021).

2.2.2. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva es una técnica moderna de fabricación que apareció a finales del siglo XX. A diferencia de las técnicas tradicionales que se basan en el conformado o remoción del material base para la fabricación de elementos, la técnica de fabricación aditiva deposita capas delgadas de material que forman objetos tridimensionales con poco desperdicio de material (Vicente Martínez, 2013).

La fabricación aditiva se ha consolidado en los últimos años en diferentes sectores industriales, pero su uso se ha democratizado desde el lanzamiento de las impresoras 3D con un precio y calidad accesibles para los usuarios. De acuerdo con la norma ASTM 52900:2017, existen siete procesos de FA que son: proyección de aglutinante, deposición de energía focalizada, extrusión de material, proyección de material, fusión de lecho de polvo, laminado de hojas, y fotopolimerización en tanque o cuba (ISO 52900, 2017).

2.2.3. Internet de las cosas

El internet de las cosas o mejor conocido en inglés como *internet of things (IoT)*, es un habilitador digital de la industria 4.0 que permite la comunicación entre máquinas y dispositivos en un ambiente industrial.

La interrelación de los dispositivos, vehículos, infraestructura, sensores y actuadores que se comunican mediante una conectividad de red permite que los objetos puedan recolectar e intercambiar datos sin la necesidad de la supervisión humana constante. Por lo tanto, el internet de las cosas permite automatizar los procesos e integrar directamente el control de los dispositivos físicos en base a ambientes virtuales (Oztemel & Gursev, 2020).

2.2.4. Visualización de datos

El internet de las cosas ha creado grandes oportunidades al permitir el monitoreo constante de los parámetros de equipos e infraestructura de forma automatizada; sin embargo, existe el reto de recopilar, visualizar y analizar esta gran cantidad de datos. La visualización es

parte del preprocesamiento de datos puesto que, una primera inspección de los mismos permite encontrar rápidamente relaciones entre las variables de estudio (Elsisi et al., 2021).

Los datos de los sensores pueden ser guardados utilizando el almacenamiento local de la empresa, aunque existen proveedores de este servicio tales como *Amazon Web Services* que lo ofrecen como un servicio de pago. Las plataformas especializadas tales como *ThingSpeak*, ofrecen el almacenamiento y visualización de datos de forma automática, sin la necesidad de realizar operaciones de código dentro de la plataforma, este tipo de servicios se conocen como *software as a service* (SAAS) (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

2.2.5. Ciberseguridad

Los avances de la sociedad y de la economía dependen ampliamente de las redes computacionales y de las tecnologías de la información y comunicación (TICs). A medida que la dependencia de las TICs se incrementa, el número de delincuentes que usan únicamente computadores y una conexión a internet para atacar las infraestructuras también lo hace.

La ciberseguridad se encarga de evaluar los riesgos o vulnerabilidades en los sistemas computacionales y establecer estrategias de defensa que permitan mantener la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información digital (Jang-Jaccard & Nepal, 2014).

2.3. USO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN ENTORNOS INDUSTRIALES

En 2018, alrededor del 45% del total de energía a escala global fue consumido por el sector industrial. Las proyecciones para 2050 aparecen en la Figura 2, en la cual se evidencia que, incluso con un cambio rápido hacia el uso de energías renovables, el porcentaje se mantendrá (bp p.l.c., 2021). Por lo tanto, existe la oportunidad de utilizar fuentes renovables para la producción de energía, considerando que, en el futuro esto brindará seguridad energética a las empresas y coadyuvará en los esfuerzos para luchar contra el cambio climático.

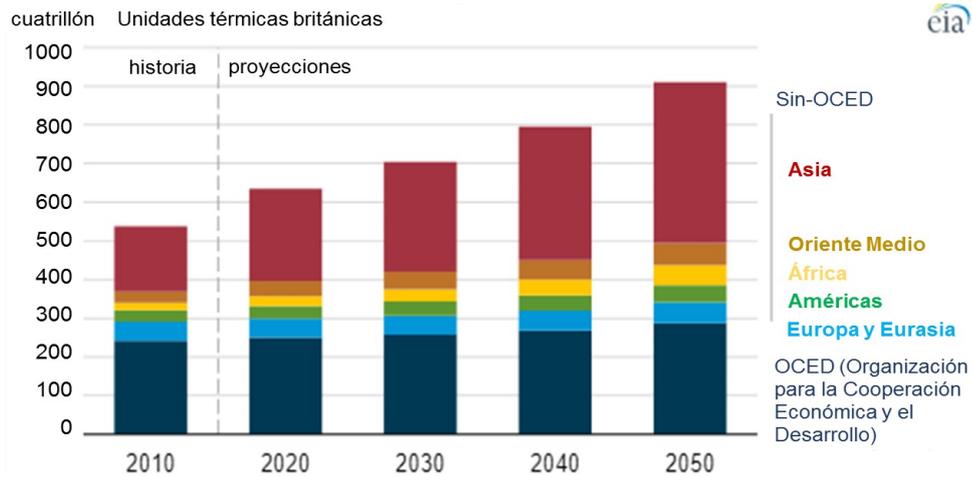


Figura 2. Consumo de energía global 2010-2050. (Cozzi et al., 2020) (traducción propia)

Las proyecciones entre 2018 y 2050 de la Administración de la Información Energética de los Estados Unidos de América muestran que, debido al crecimiento poblacional, el consumo energético se incrementará en casi 50% principalmente en Asia (ver Figura 2), en donde un cuatrillón equivale a 293 TWh de energía (Administración de la información energética, 2019).

En la Figura 3, se muestra el incremento sostenido de energías renovables a nivel mundial impulsado por la instalación de microrredes de electricidad y por la combinación de diferentes tecnologías (Ritchie & Roser, 2020).

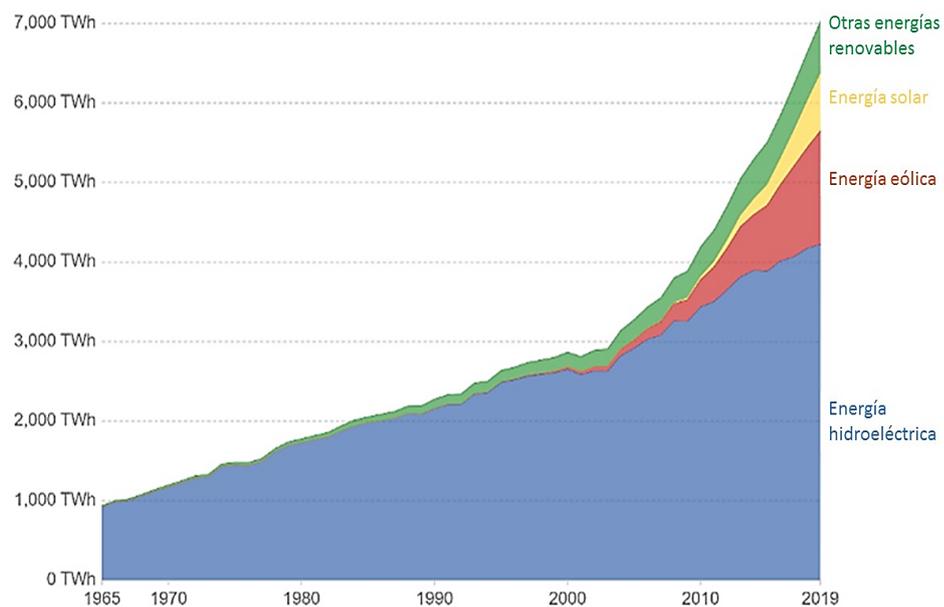


Figura 3. Energía renovable a nivel mundial. (Our World in Data, 2020) (traducción propia)

Aunque la energía hidroeléctrica sigue siendo la más importante (ver Figura 3), las energías solar, eólica, bioenergía, entre otras, han mostrado un crecimiento exponencial desde 2010. Los avances tecnológicos y la inclusión de controladores inteligentes han innovado estos sectores de la industria energética.

La economía circular y la cuarta revolución industrial se convertirán cada vez más en parte de la rutina de las personas en el escenario de transformación económica dado que, la materia prima y la energía son recursos limitados esenciales para tener una buena calidad de vida (Daú et al., 2019).

El avance de la tecnología ha logrado que los costos de los sistemas de energía solar fotovoltaica puedan igualar al precio de las energías convencionales como se aprecia en la Figura 4, por lo que se han convertido en un sector atractivo para la inversión de nuevos mercados (Deloitte Insights, 2019).

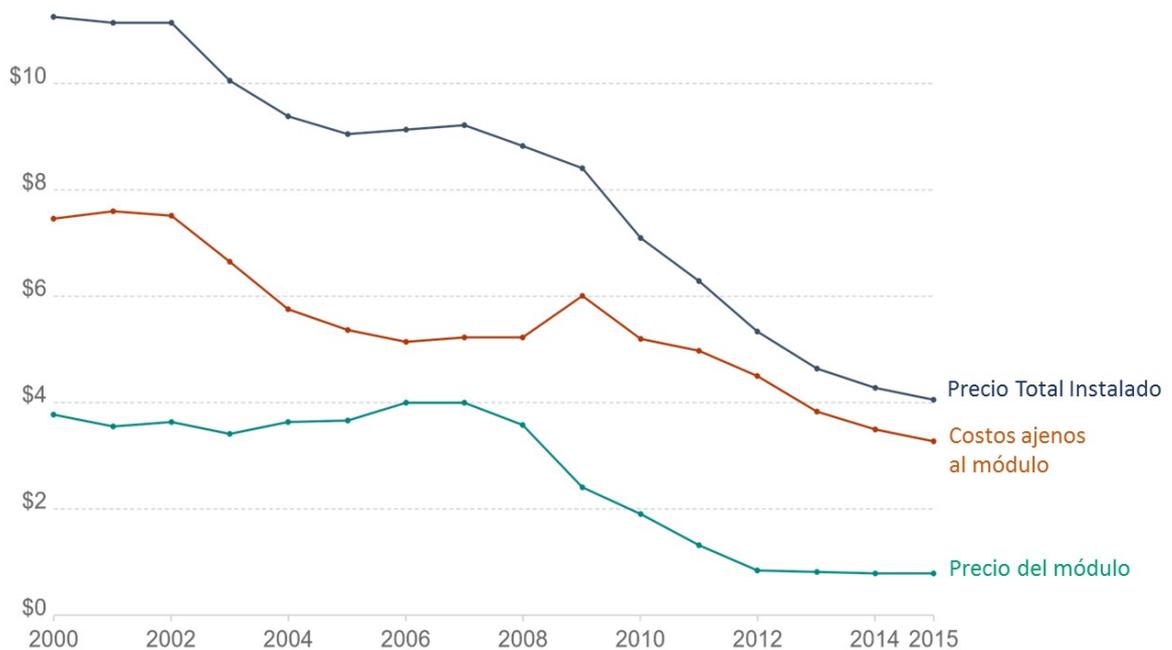


Figura 4. Costo de sistemas fotovoltaicos desde 2000 a 2015 (Our World in Data, 2020)
(traducción propia)

La teoría de las curvas de aprendizaje establece que cada vez que se duplica la capacidad instalada acumulada de cierta tecnología, su precio se reduce en la misma fracción. La Figura 4 muestra que en el caso de las instalaciones fotovoltaicas se cumple la teoría mencionada, pero el promedio de reducción en el costo es 20,2% (Ritchie & Roser, 2020). Por lo tanto,

existe también la factibilidad económica para desarrollar sistemas fotovoltaicos para pequeñas y medianas empresas.

2.4. FABRICACIÓN ADITIVA EN LA INDUSTRIA 4.0

En 2018, se realizó una encuesta en línea a profesionales en diferentes sectores cuyos resultados se muestran en la Figura 5. En las respuestas, 21 de los 60 encuestados indicaron que conocen el significado de la Industria 4.0 y que sus proyectos en los próximos seis meses se enfocarían en la FA (Dullaart, 2018).

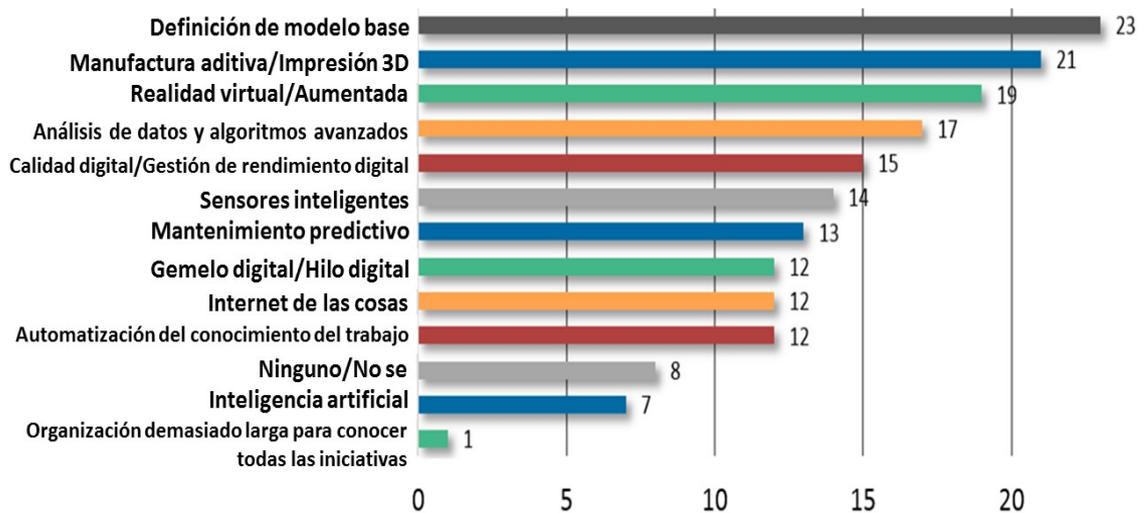


Figura 5. Iniciativas más importantes de la Industria 4.0. (Dullaart, 2018) (traducción propia)

Los proyectos que cubren habilitadores digitales de la industria 4.0 tales como sensores inteligentes, análisis de datos e internet de las cosas se consideran como importantes para las empresas (ver Figura 5). La FA fue la segunda respuesta más común para la mayoría de las empresas, por lo que se considera muy importante en el entorno industrial.

El despliegue combinado de tecnologías de FA y fabricación distribuida permitirá una manufactura cada vez más sostenible dado que las fábricas estarán cerca del usuario final, y crearán productos personalizados. De esta forma se reduce significativamente la carga sobre la red eléctrica tradicional y los costes de logística, distribución, etc. porque la fabricación se produce cerca de los consumidores (Namin, 2019; Peng et al., 2018).

Yi et al. (2020) afirman que, si los procesos de FA no tienen bien controlados sus parámetros, pueden resultar igual o más contaminantes que los procesos convencionales dejando de

lado el enfoque ecológico expresado mediante las 5 R's de la sostenibilidad que aparecen en la Figura 6.



Figura 6. Las cinco Rs de la sostenibilidad. (Pinterest, s.f.) (traducción propia)

El enfoque de la sostenibilidad ha ido evolucionando con el paso del tiempo, se inició con el concepto de las 3 R's, y ahora se aplica el concepto de las 5 R's que incluye también el compostaje de desechos y la restauración (ver Figura 6). La fabricación aditiva permitiría cumplir las metas de reducir los materiales, reutilizar y reciclar los elementos que han cumplido su ciclo de vida.

Entre las áreas que se debe explorar desde el punto de vista ecológico, está incluir un estudio de los datos relacionados al consumo de materiales y energía, y el uso de máquinas de FA inteligentes que permitan un mejor control del proceso (Peng et al., 2018). Un estudio de la eficiencia energética es más práctico que uno del ciclo de vida dado que requiere menos procesamiento de la información.

2.4.1. Consumo de energía para la fabricación aditiva

Huang et al., (2016) muestran que, en el sector aeronáutico, se puede ahorrar hasta un 50% de energía al utilizar tecnologías de FA comparado con el mecanizado convencional en metales; adicionalmente, se podría evitar el uso de aproximadamente veinte mil toneladas anuales de aluminio, titanio y níquel en 2050.

Por otro lado, el estudio de (Yoon et al., 2014) dice que la FA consume mucha energía y es necesario seguir investigando puesto que la FA consume menos material y en algunos casos, permite crear piezas igual de resistentes que aquellas obtenidas con procesos tradicionales.

En la Figura 7 se muestra el consumo de energía para una impresora que utiliza el proceso de extrusión de material, en el caso expuesto, los motores y las resistencias consumen más del 90% de energía en la impresora 3D (Ajay et al., 2017).

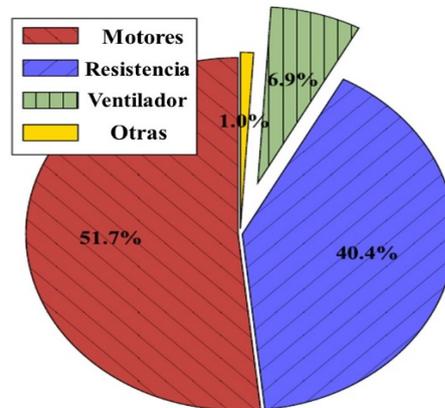


Figura 7. Energía consumida en una impresora 3D. (Ajay, et al., 2017) (traducción propia)

Las impresoras 3D aplican el proceso de extrusión de material, y van depositándolo capa por capa hasta obtener un elemento tridimensional. Por esta razón, los motores que mueven el extrusor y la base de la impresora en las tres dimensiones, y la resistencia que permite fundir el material, consumen un 51,7% y 40,4% (ver Figura 7) del total de la energía respectivamente (Ajay et al., 2017).

Baumers, et al. (2011) definieron una metodología estándar que permite el cálculo de la energía consumida en algunos de procesos de FA utilizando el área máxima de impresión y un área reducida. En la Tabla 1 se muestra las tecnologías y máquinas analizadas en el estudio y su resultado.

Tabla 1. Consumo de energía en diferentes tecnologías de fabricación aditiva

Sistema	Principio de operación	Tamaño nominal (x – y – z), en mm	Espesor de la capa, en μm	Material de construcción	Consumo de energía (MJ/kg)
SLM250	Deposición de energía focalizada	250x250 x300	50	Inox 316L	106 - 83
M3 Linear	Deposición de energía focalizada	250x250x250	30	Inox 316L	588 - 423
EOSINT M 270	Deposición de	250x250x215	20	Inox 17-4 PH	339 - 241

energía focalizada					
A1	Deposición de energía focalizada	200x200x180	70	Ti-6Al-4V	177 - 61
EOSINT P 390	Fusión de lecho de polvo	340x340x620	100	PA 12	4849 - 107
FDM 400 mc	Extrusión de material	406x335x406	178	Policarbonato	536 - 519

Adaptación de Baumer et al., 2011 (traducción propia)

En la Tabla 1 se muestra la existencia de un ahorro de energía cuando se utilizó el área máxima de impresión que alcanzó 97,79%, en el caso de la fusión en lecho de polvo (se debe a la gran cantidad de energía que se requiere para el precalentamiento). En el caso de la extrusión de material, la diferencia es de 3% únicamente, por lo que no existe una diferencia significativa entre usar un área grande o una pequeña para imprimir.

Aunque los valores de la eficiencia no pueden usarse como una medida de comparación, el consumo específico de energía en (kW-h/kg) sí puede ser usado. La tecnología de extrusión de material conocida también como deposición de material fundido (FDM) que se visualiza en la Figura 8, permitiría calcular fácilmente la energía total requerida para imprimir una pieza en base a parámetros iniciales (Baumers, Tuck, Wildman, et al., 2011).

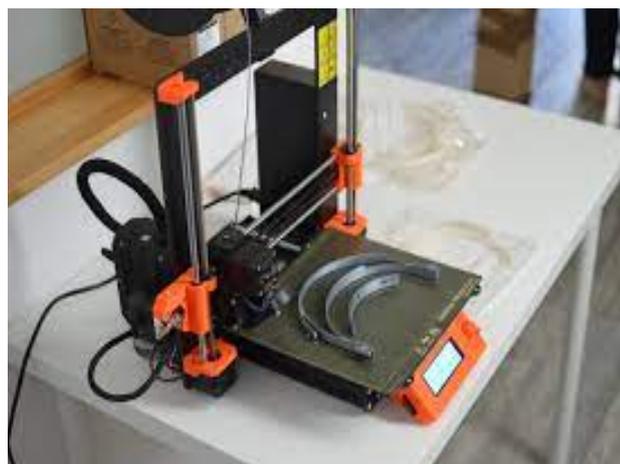


Figura 8. Máquina de fabricación aditiva FDM. (Agencia Espacial Europea, 2020)

En la Figura 8 se muestra una pieza fabricada utilizando FDM, al cuantificar la cantidad de energía requerida para su fabricación en base a la masa estimada o al tiempo de fabricación,

se podría integrar la demanda energética del sistema con la producción proveniente de fuentes renovables (Peng et al., 2018).

2.5. INTERNET DE LAS COSAS EN LA VISUALIZACIÓN DE DATOS

El acceso a tecnologías y habilitadores digitales de la industria 4.0 puede solucionar el problema de visualización de los datos en la generación de energía, consumo, y producción de artículos en tiempo real. Así se mediría con precisión el tiempo de fabricación de un elemento, la cantidad de energía consumida, y el material utilizado. Adicionalmente, se puede utilizar actuadores que respondan a las necesidades del usuario y aseguren el funcionamiento normal de los equipos en la fábrica.

Las soluciones basadas en el internet de las cosas (*IoT*) se utilizan para monitorizar la producción de energía renovable y medir el consumo de los equipos de una fábrica (Lea, 2020). Los sistemas de monitoreo están basados en tarjetas microcontroladoras, entre ellas el Arduino que es de bajo costo y permite realizar proyectos en las áreas del prototipado, impresión 3D, recolección y análisis de datos, entre otras (FlossManuals, n.d.). La infraestructura de medición avanzada (AMI), se muestra en la Figura 9.

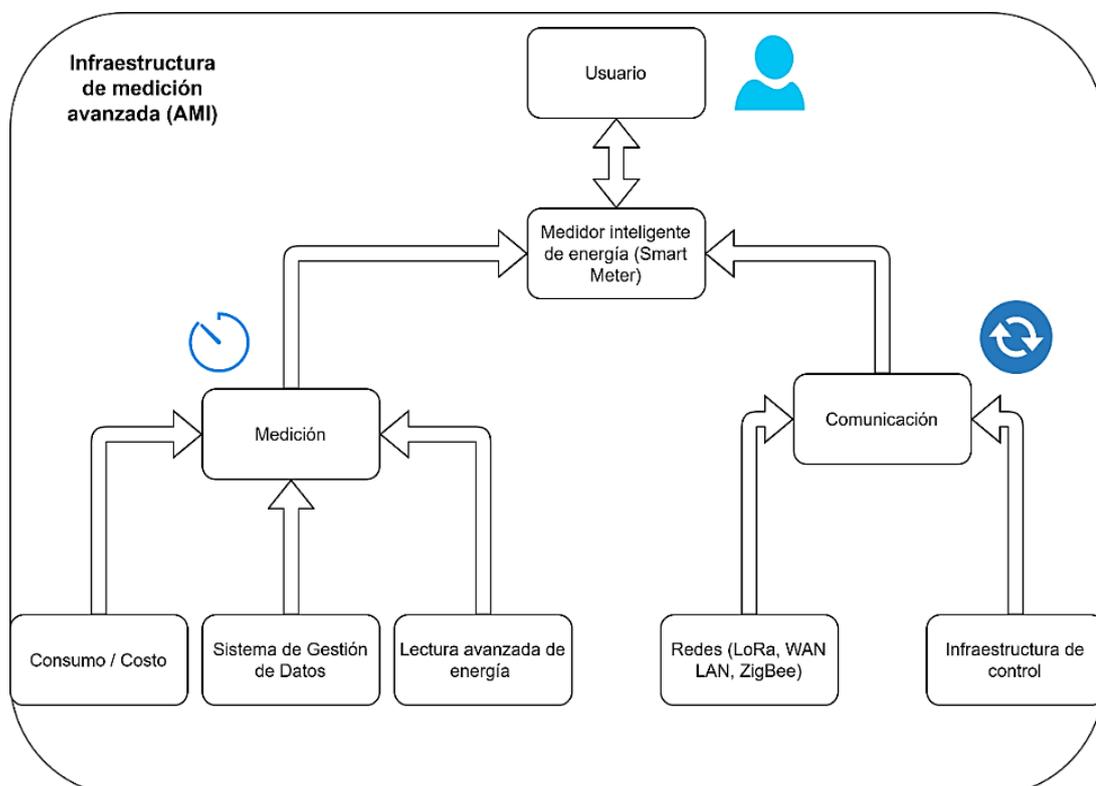


Figura 9. Infraestructura de medición avanzada. (Adaptado de Kabalci, 2016) (traducción propia)

De acuerdo con la Figura 9, los medidores inteligentes de energía deben permitir interacción, recepción de datos, actuación de comandos, visualización del consumo o generación de energía y comunicación con otros dispositivos inteligentes (Avancini et al., 2019). El usuario puede acceder al medidor con el fin de realizar lecturas y gestionar acciones sobre el sistema utilizando protocolos de comunicación tales como HTTP o MQTT.

La mayoría de los proveedores de servicios en la nube ofrecen servicios de *IoT* debido a la necesidad fundamental de visualizar los datos generados por los sensores en lugares remotos. Los proveedores más importantes tales como *Amazon Web Services*, *Azure*, *IBM Cloud*, *Alibaba Cloud*, etc. proveen un módulo *IoT* que permite la comunicación segura con dispositivos utilizando el protocolo MQTT. La ventaja de estas plataformas es que los datos se pueden visualizar o procesar con otras herramientas en la nube; la desventaja es que al usar tarjetas microcontroladoras, el proceso de comunicación es relativamente complicado.

Los servicios ofrecidos por las plataformas especializadas de internet de las cosas tales como *Ubidots*, *Arduino Cloud*, *Wolfram Data Drop*, *ThingSpeak*, etc., son más apropiados para una comunicación rápida y segura por medio de tarjetas microcontroladoras. Estas plataformas combinan la simplicidad de subir datos a la nube de forma segura con la visualización en tiempo real utilizando diagramas y gráficos.

Aunque todas las plataformas *IoT* mencionadas tienen en esencia las mismas herramientas, se considera que *ThingSpeak*, desarrollada por *Mathworks*, tiene las siguientes ventajas sobre las demás:

- ▶ Permite una comunicación directa (incluyendo operaciones de cálculo) con Matlab.
- ▶ La Universidad Internacional de la Rioja entrega a sus estudiantes una licencia de Matlab como parte de su matrícula en el Máster Universitario de Industria 4.0
- ▶ La documentación para escribir y leer datos de los canales es amplia, incluyendo una librería en el IDE de Arduino que incluye al Arduino WiFi Rev.2, ESP32 y ESP8266.
- ▶ Los *plugins* disponibles permiten una comunicación con otras plataformas tales como *IFTTT* para desencadenar acciones automáticas cuando se cumple una condición.
- ▶ Los datos son almacenados, y se puede escribir programas en línea para crear visualizaciones adicionales.

2.6. CIBERSEGURIDAD EN LAS REDES INTELIGENTES DE ENERGÍA

La seguridad juega un rol fundamental en la confiabilidad del sistema completo de las redes eléctricas inteligentes dado que los ataques cibernéticos pueden ocasionar costes económicos, fuga de información, daños en la infraestructura, etc. Los servidores en la nube pueden ofrecer la característica de seguridad y una gran capacidad de almacenamiento de datos de los sensores (Kabalci, 2016); no obstante, se debe considerar también otras amenazas que pueden estar basadas en la conexión o en los dispositivos.

2.6.1. Amenazas basadas en la conexión

El gran número de usuarios que accede a conexiones de internet a través de dispositivos crea vulnerabilidades que pueden ser explotadas por *hackers* o atacantes quienes acceden a los datos de forma no autorizada (Culler & Burroughs, 2021), entre estos riesgos, se tiene :

- ▶ Interferencia de radiofrecuencia
- ▶ Codificación inalámbrica
- ▶ Acceso ilegal a los datos
- ▶ Modificación e inyección de mensajes
- ▶ Fallas del protocolo

2.6.2. Amenazas basadas en los dispositivos

Incluso cuando la seguridad de las conexiones es alta, los dispositivos mediante los que se conecta a las redes pueden ser vulnerados de forma interna (la mayor parte de veces) o externa en el lugar de la instalación. Entre los ataques más importantes se encuentran los siguientes:

- ▶ Ataques físicos y desastres naturales
- ▶ Puntos de acceso no autorizados
- ▶ Ataque de denegación de servicios
- ▶ Ataque de repetición
- ▶ Uso ilegítimo de servicios
- ▶ Ataque de intermediario
- ▶ Enmascaramiento de datos
- ▶ Ataque de guardia (hackeo)

2.7. PROYECTOS RELACIONADOS CON EL TEMA DEL TFM

En el presente apartado se muestra las contribuciones de proyectos específicos para la solución del problema planteado, aunque en ningún caso se ha encontrado una solución que lo resuelva tomando en cuenta los habilitadores digitales de la industria 4.0 que se ha propuesto. Adicionalmente, se muestra la importancia de varias tecnologías de interés dentro del contexto del trabajo, y su impacto a nivel global.

2.7.1. Fabricación aditiva a escala global

Tanto los países más desarrollados como los que están en desarrollo tales como China e India, están implementando rápidamente el uso de energías renovables en el proceso de fabricación; estas iniciativas pueden fomentar el crecimiento económico a través de la creación de nuevos puestos de trabajo y la mejora en la seguridad de la energía (Srivatchan & Rangarajan, 2020).

El reporte anual de Gartner Inc. de 2018 muestra en la Figura 10 el ciclo de sobre expectativa que poseen las diferentes tecnologías de impresión 3D. A escala global, las tecnologías de fabricación aditiva se han popularizado por lo que se encuentran en la rampa de consolidación.

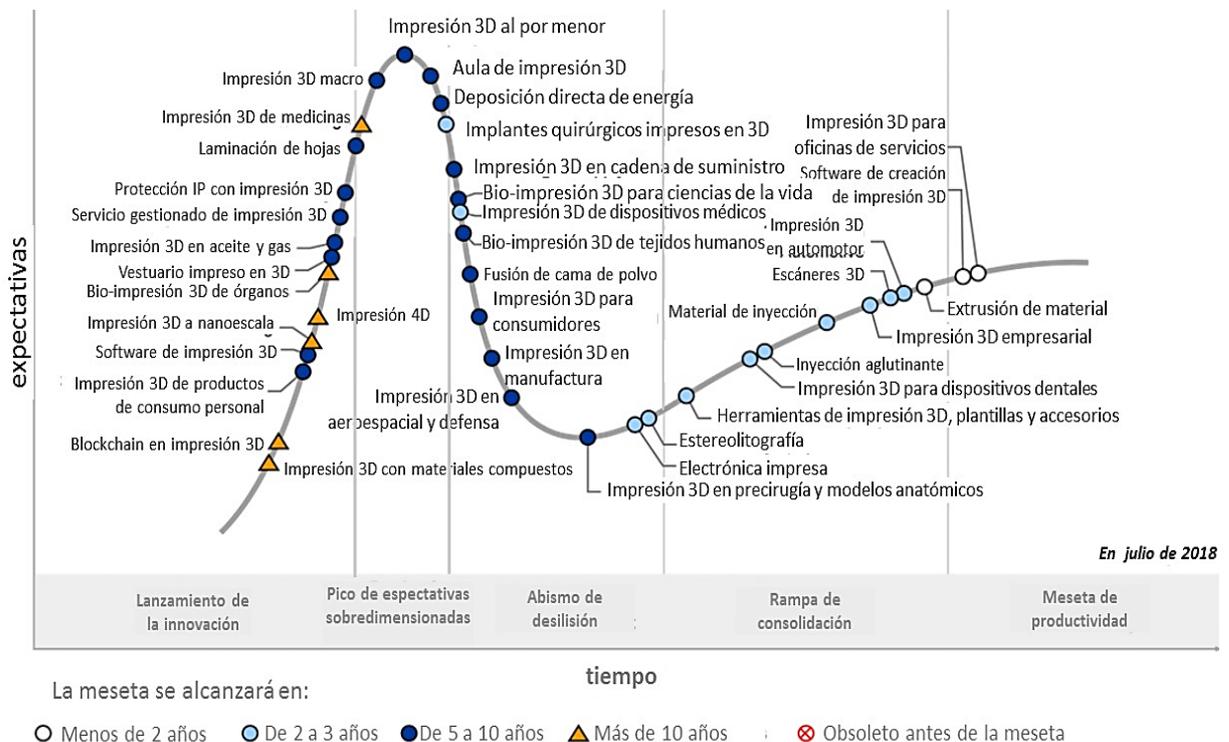


Figura 10. Curva de expectativas para la impresión 3D. (Goerke, 2019) (traducción propia)

La curva de la Figura 10 inicia con el lanzamiento de la innovación, pasa por el pico de expectativas sobredimensionadas, luego por el abismo de la desilusión, continúa hacia la rampa de consolidación, para finalmente mantenerse en la meseta de productividad. Las empresas de impresión 3D se encuentran en la meseta de productividad por lo que están consolidadas y se pueden lanzar iniciativas para mantener la competitividad e innovación en este sector de la fabricación (Goehrke, 2019).

Aunque las emisiones provenientes de la industria de la fabricación se han reducido debido a la pandemia de la COVID-19, los retos energéticos, sociales y económicos no se han solucionado, más bien se han ahondado. El camino a emisiones netas nulas de energía propuesto por la agencia internacional de la energía se basa en las soluciones energéticas limpias y la fabricación inteligente para lograr una recuperación económica sostenible (Cozzi et al., 2020).

2.7.2. Energías renovables para aplicaciones industriales

Uno de los casos de estudio más importantes en el uso de energías renovables para satisfacer la demanda industrial está en la localidad Pueblo de *Colorado* (EEUU). Su visión es cambiar la matriz energética basada en carbón, hasta ser 100% renovable.

Además de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se creará nuevos empleos, y se regulará las tasas de la electricidad; uno de los proyectos ícono es la construcción de un parque solar de 240 MW en conjunto con la empresa *Xcel Energy*. En 2018 su plan ha logrado alcanzar una nueva capacidad instalada de energía eólica de 1113 MW, nueva capacidad instalada solar de 707 MW, y almacenamiento en baterías de 275 MW (S. Furtado et al., 2019).

En su tesis doctoral, Namin (2019) discute las ventajas y desventajas de la fabricación aditiva y el uso de energías renovables. Primero, se estudia la factibilidad de utilizar FA en entornos industriales considerando la instalación de paneles solares de alta eficiencia *in-situ*. Se utilizó *System Advisory Model* SAM para simular la radiación solar, y se demostró que un 70% de algunos estados sureños podría utilizar energía solar fotovoltaica para cubrir sus necesidades energéticas en verano y primavera. El tiempo de retorno de la inversión fue de 3 a 15 años.

Como una segunda parte, Namin (2019) realizó un análisis con enfoque social sobre la instalación de fábricas que produzcan implantes de rodilla y cadera directamente en los

hospitales determinando que es factible. Se finaliza mencionando que la impresión 3D es una tecnología fundamental de fabricación dado que utiliza los materiales y energía de forma eficiente, y permite un alto nivel de personalización en los productos (Namin, 2019).

2.7.3. Medición inteligente de energía

La perspectiva de una red inteligente descrita por Kabalci (2016) se muestra en la Figura 11, aquí las redes de energía y de datos existen de forma paralela con el fin de establecer una comunicación bidireccional entre los consumidores y productores de la energía.

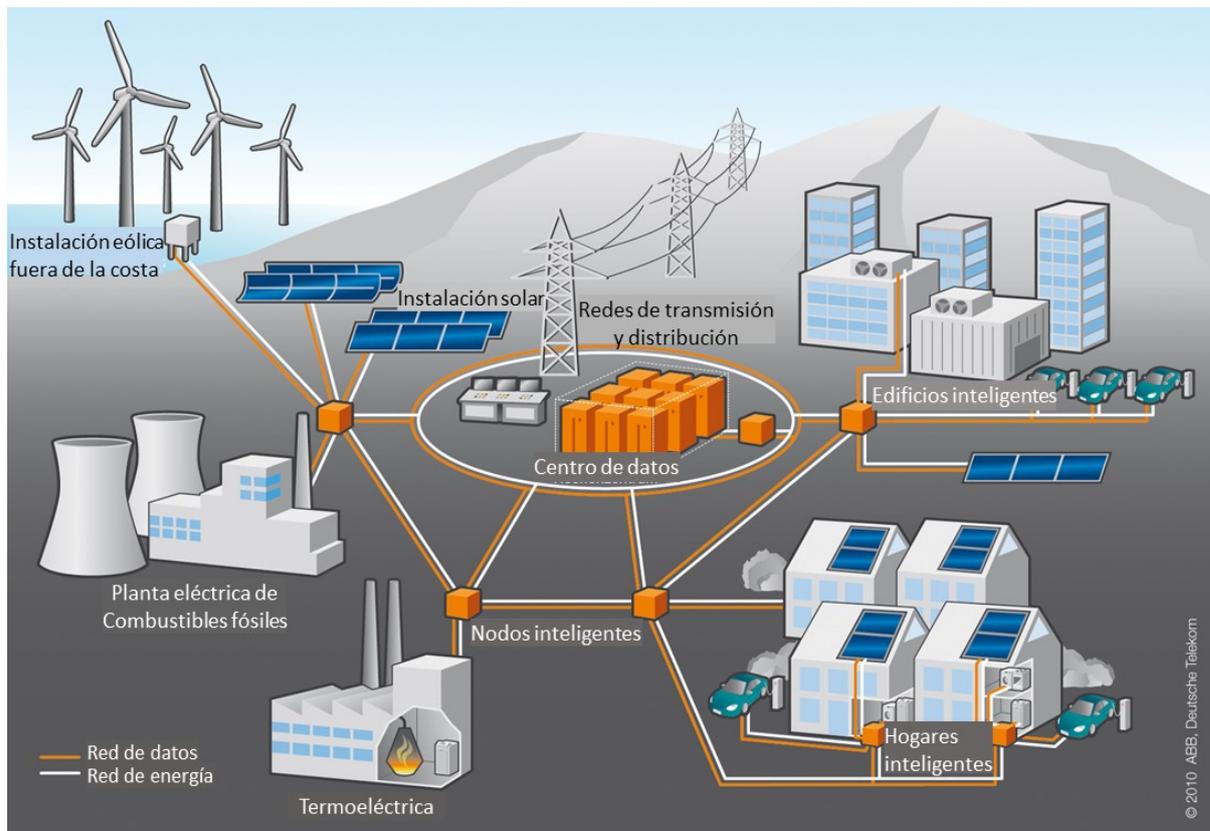


Figura 11. Red inteligente de energía (ABB, 2020) (traducción propia)

Las redes inteligentes permiten un monitoreo permanente de las fuentes de energía tales como instalaciones eólicas, plantas solares, plantas termoeléctricas, etc. (ver Figura 11). Existe también un control de la transmisión de esta energía a través de redes de distribución, y el consumo en los hogares, edificios, fábricas, etc. Toda la información es enviada a un centro de datos que compara los datos de generación y consumo de forma automatizada e inteligente con el fin de que no existan sobrecargas ni cortes de energía (Avancini et al., 2019).

Srivatchan y Rangarajan (2020) crearon un medidor inteligente de energía con características *IoT* que está basado en la tarjeta microcontroladora Arduino Uno (sin funcionalidades WiFi), sensores de voltaje (detector de paso por cero), sensores de corriente (ACS712) de bajo costo, y en la tecnología LoRa-WiFi. Los datos de cada consumidor, que pueden transmitirse sin necesidad de una conexión a internet en un radio de 10-15 km, se monitorean en tiempo real a través de una aplicación de Android.

Avancini et al. (2021) presentan una solución específica denominada *Smart Meter* que permite medir el consumo de energía en circuitos trifásicos por medio de sensores de corriente y voltaje. Los datos se toman cada 5 segundos, y luego se envían a un middleware denominado In.Iotm desarrollado por los autores mediante una tarjeta ESP8266 (las lecturas se validaron con un medidor Fluke 43). Los datos del consumo en cada fase, factor de potencia y frecuencia se observaron mediante una interfaz para el usuario. Aunque la propuesta es muy buena, el uso de dispositivos *Texas Instruments* incrementa significativamente el costo de la solución.

Jena et al. (2020) estudian la aplicación de un modelo de fabricación sostenible en una fábrica de cemento. Las dimensiones del modelo incluyen la producción inteligente, mantenimiento inteligente, consumo inteligente de energía y consumo inteligente de agua. En lo referente al consumo inteligente de energía, se eliminó todas las mediciones manuales y se las reemplazó con un sistema de medición automatizado; esto permite tener lecturas de consumo reales. Utilizando este enfoque, el uso de energía se redujo en 9,33%, lo cual es beneficioso para la fabricación sostenible.

La arquitectura básica de la industria 4.0 según estos autores contiene 5 capas:

- ▶ Capa de adquisición de datos
- ▶ Capa de flujo de datos (*data munging*)
- ▶ Capa de almacenamiento y gestión de datos
- ▶ Capa de análisis de datos
- ▶ Capa de acceso al usuario

2.8. CONCLUSIONES SOBRE EL ESTADO DEL ARTE

Luego de revisar el contexto en el que se realizará el trabajo y varios proyectos relacionados a la temática del TFM, se ha considerado dividir las conclusiones sobre el estado del arte en dos categorías: fabricación inteligente haciendo uso de energías renovables, e integración de habilitadores digitales en el contexto de la fabricación aditiva.

2.8.1. Fabricación inteligente haciendo uso de energías renovables

La impresión 3D es una tecnología de fabricación madura; por ende, los centros que ofrecen este servicio se encuentran en la meseta de producción. Las nuevas tecnologías que permitan ahorrar costos asociados a la fabricación serán vistas positivamente por este sector industrial (Stratasys, 2020). Las conclusiones sobre esta temática son las siguientes:

- ▶ Las tecnologías de FA en un contexto de industria 4.0 pueden fomentar la reactivación económica generada por la pandemia de la COVID-19.
- ▶ Existe el nicho para la automatización de sistemas de impresión 3D dado que hay una gran cantidad de clientes individuales que puede adquirirlos o los poseen.
- ▶ Las energías renovables tienen el potencial económico, técnico y ambiental de reemplazar a las energías tradicionales en los procesos de FA.

2.8.2. Integración de habilitadores digitales en el contexto de la fabricación aditiva

Los proyectos revisados muestran que es posible fabricar medidores de energía basados en tarjetas microcontroladoras, que tienen buena precisión. Sin embargo, se requiere módulos adicionales para la transmisión de datos, su visualización requiere de programas complejos, y una comunicación bidireccional tiene algunos retos. Las conclusiones alcanzadas en esta temática son las siguientes:

- ▶ Existe la oportunidad de desarrollar un medidor de energía basado en una única tarjeta microcontroladora que permita la conexión directa a una plataforma de internet de las cosas.
- ▶ La solución planteada en el TFM debe abordar los parámetros de almacenamiento, visualización, análisis de datos, comunicación bidireccional y ciberseguridad en el contexto de proyectos de la industria 4.0

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CONTRIBUCIÓN DEL TFM

En el presente capítulo se muestra los objetivos, alcance, limitaciones y componentes del TFM propuesto, de una forma resumida. Del mismo modo, se muestra la arquitectura de la solución propuesta y el diagrama de conexiones.

3.1. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El objetivo general del presente trabajo es realizar el diseño de un sistema de FA con fuentes de alimentación de energía renovable.

Los objetivos específicos son:

- ▶ Integrar dispositivos de manejo remoto, y medición inteligente de la energía en un sistema de FA.
- ▶ Visualizar los datos de energía producida y consumida mediante plataformas de internet de las cosas, que a su vez permitan la predicción de parámetros futuros.
- ▶ Establecer una comunicación bidireccional segura entre sistemas de FA.

3.2. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

El presente trabajo contó con una planificación secuencial compuesta por doce pasos que siguen un orden y metodología basadas en el estudio del estado del arte de proyectos similares. Los pasos de la metodología se enumeran a continuación:

Paso 1: Análisis de normativas para la realización del trabajo de fin de máster.

Paso 2: Revisión bibliográfica de proyectos y tecnologías asociadas al tema de investigación.

Paso 3: Estudio del consumo energético para diferentes técnicas de fabricación aditiva.

Paso 4: Determinación del problema de investigación para el trabajo, así como los objetivos y el alcance.

Paso 5. Identificación de un proyecto factible que cumpla con las metas planteadas.

Paso 6. Determinación y adquisición de materiales para la construcción del prototipo.

Paso 7. Actualización y aprendizaje del uso de nuevos sensores y dispositivos.

Paso 8. Fabricación de un modelo piloto funcional.

Paso 9. Desarrollo del código que permita la comunicación de los sensores con la plataforma *ThingSpeak*

Paso 10. Ajustes del modelo y realización de pruebas de funcionamiento.

Paso 11. Creación de tablas y figuras que resuman los resultados más importantes del trabajo.

Paso 12. Redacción de la memoria final.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES Y COMPONENTES DE LA PROPUESTA

3.3.1. Descripción general de la propuesta

La propuesta consiste en un sistema de energía solar fotovoltaica que se utiliza para energizar a una impresora 3D Ender 3 Pro y a otros componentes tales como enrutador y tarjetas microcontroladoras. Existe preferencia hacia el uso de las energías renovables, pero en caso de que la prioridad del trabajo sea alta, se utiliza la energía de la red eléctrica. El trabajo de impresión se maneja de forma remota utilizando el software *OctoPrint* instalado en una tarjeta *Raspberry Pi* cuya interfaz se observa en la Figura 12 (Häußge, 2020).

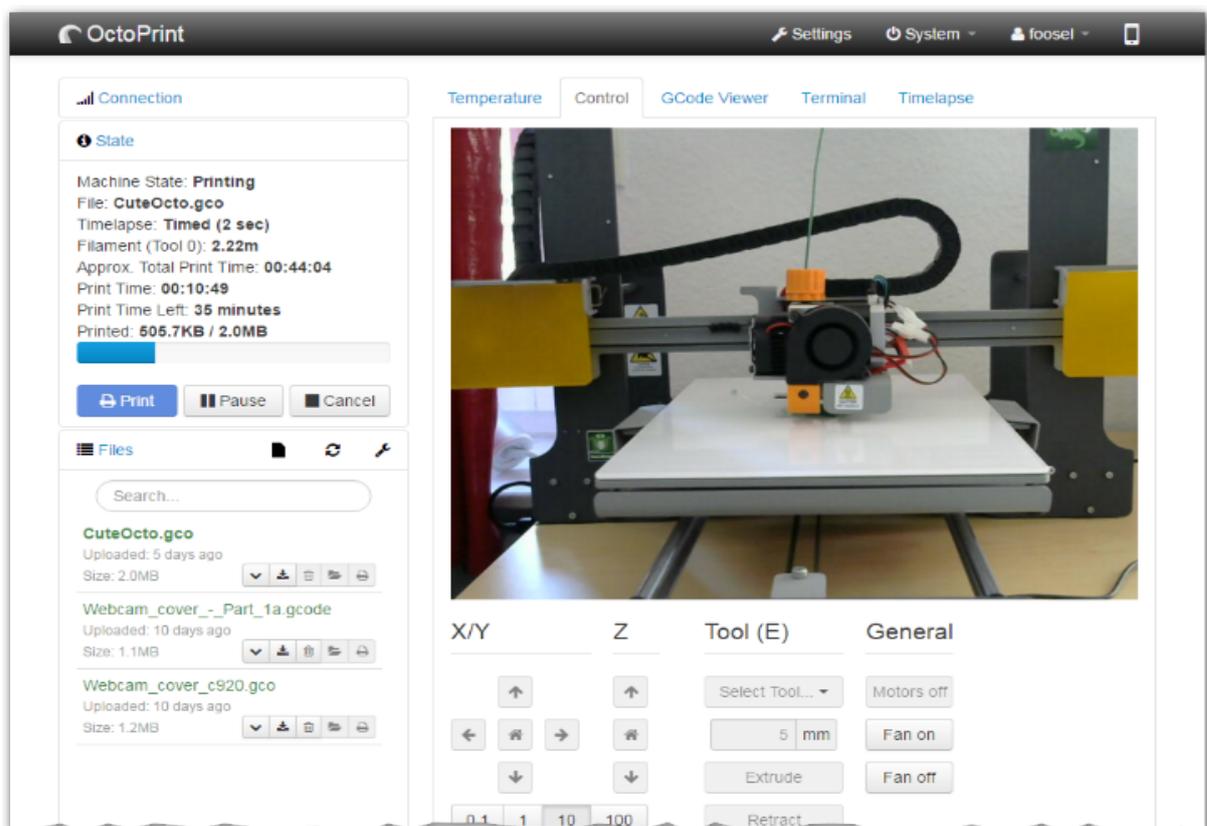


Figura 12. Interfaz de Octoprint. (Häußge, 2020)

La interfaz de *Octoprint* (ver Figura 12) permite gestionar, iniciar, pausar, cancelar y visualizar los trabajos de impresión de forma eficiente y sencilla. Se puede acceder al registro histórico de los trabajos de impresión, ver la temperatura del extrusor y la velocidad del ventilador, así como la temperatura de la base. Una de sus características más importantes es que si la impresión se pausa debido a la falta de energía para la impresora, se puede reiniciar el trabajo cuando la energía retorne, siempre que la *Raspberry Pi* se mantenga encendida.

La propuesta tendrá las siguientes características además de las ya mencionadas:

- ▶ Para evaluar el consumo energético se utilizará medidores inteligentes de energía.
- ▶ Se medirá la radiación UV y parámetros meteorológicos utilizando sensores y tarjetas microcontroladoras.
- ▶ La energía producida por el sistema se medirá directamente en el controlador de carga del sistema fotovoltaico mediante una interfaz RS 485.
- ▶ Los datos de los sensores se enviarán a la plataforma *ThingSpeak* para tener una visualización y análisis en tiempo real.
- ▶ Cuando se cumplan determinadas condiciones programadas por el usuario a través de los *plugins* de *ThingSpeak*, se ejecutará acciones de forma automática.

3.3.2. Alcance y limitaciones

Con el fin de delimitar el contenido de la propuesta realizada en el presente TFM, es necesario establecer el alcance planificado del proyecto, que es el siguiente:

- ▶ Se creará un prototipo funcional de un medidor de energía que muestre lecturas que en ningún caso difieran en más del 10% de las mostradas en multímetros digitales.
- ▶ El manejo remoto de la impresora 3D, se realizará mediante el software de acceso libre *OctoPrint*, sin realizar cambios en la tarjeta controladora del equipo.
- ▶ El prototipo de medidor inteligente de energía se probará con una instalación fotovoltaica desplegada para el efecto, y que estará en línea con la red eléctrica tradicional.
- ▶ Se utilizará un microcontrolador Arduino WiFi Rev.2 ya que es fácil de usar y con precio accesible en el mercado, además de ser versátil.

- ▶ Se usará microcontroladores ESP32 y ESP8266, que tienen características similares al Arduino Uno WiFi Rev.2 para voltajes de referencia de 3,3 V.
- ▶ El envío de datos a la nube se realizará mediante el protocolo HTTP en intervalos no menores a 15 s, que se encuentran dentro de la capa gratuita de la plataforma *ThingSpeak*.
- ▶ Se controlará la energía almacenada en las baterías y dependiendo de la prioridad del trabajo de impresión, se iniciará de forma inmediata con energía de la red eléctrica. Si la prioridad es no urgente, se preferirá el uso de la energía solar fotovoltaica.

3.3.3. Tecnologías implicadas

Las tecnologías implicadas en el presente TFM están relacionadas con los habilitadores digitales de la industria 4.0 tales como: fabricación aditiva, internet de las cosas, *big data*, analítica, y ciberseguridad.

3.3.3.1. Fabricación aditiva

La tecnología de FA que se utilizará para el presente TFM se basa en la impresora 3D Ender 3 Pro que se muestra en la Figura 13, esta tiene un diseño innovador y es muy fácil de usar; entre sus características se tiene que es liviana en comparación con otras, no hace mucho ruido y tiene un costo accesible al público.



Figura 13. Impresora 3D Creality Ender 3 PRO. (impresoras3d.com, 2021)

La impresora Ender 3 Pro que aparece en la Figura 13, tiene dos servomotores que permiten el desplazamiento de la base en el plano XY, existe un servomotor adicional que permite el desplazamiento del extrusor sobre el eje Z (hacia a arriba y hacia abajo). El material se carga en forma de rollos en la parte superior izquierda de la impresora, mientras que el control y la visualización se realiza en la pantalla localizada en la parte inferior derecha.

El voltaje de trabajo de la Ender 3 Pro es 24 VDC, por tal motivo, tiene un rectificador de voltaje en la entrada, que convierte la corriente alterna de la red eléctrica en la corriente continua que se requiere. La impresora tiene dos puertos de comunicación: un puerto micro-USB donde se conecta la *Raspberry Pi* con el software *OctoPrint*, y un puerto de entrada de tarjetas de memoria para impresiones manuales.

3.3.3.2. Internet de las cosas

Para la recolección de datos desde los paneles solares, baterías, y sensores, se utilizará las tarjetas microcontroladoras que se muestran en la Figura 14, estas son: Arduino UNO WIFI Rev.2, ESP32 y ESP8266 que tienen una interfaz amigosa, un fácil lenguaje de programación y funcionalidades WiFi. Las tarjetas mencionadas permiten la lectura de datos de los sensores y su envío hacia la plataforma digital *ThingSpeak* utilizando el protocolo HTTP, por lo que el usuario puede almacenar y visualizar la información en la nube.

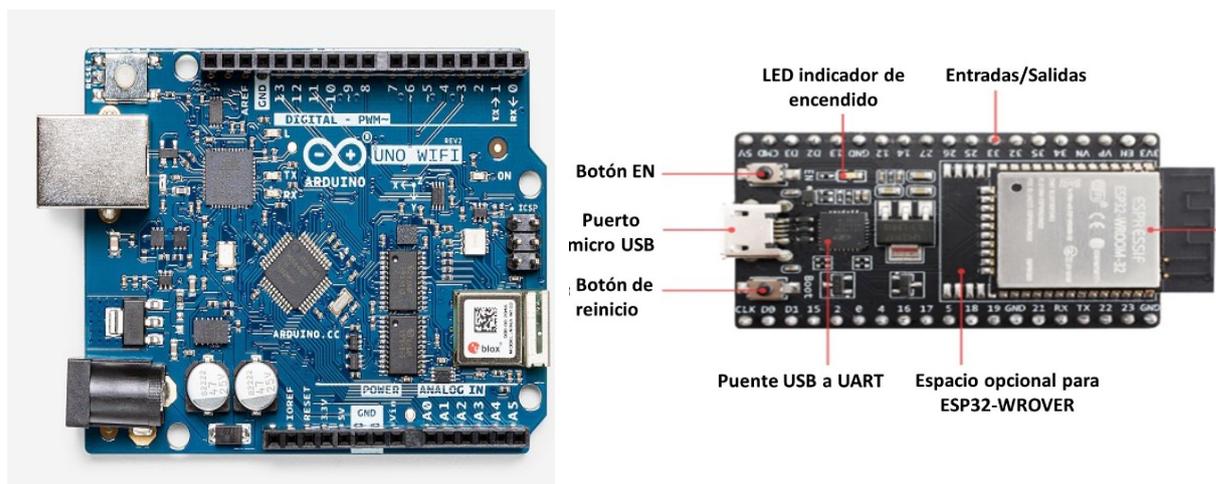


Figura 14. Arduino WiFi Rev.2 (izq) y ESP32 (der) (Arduino, 2021; ESPRESSIF, 2021)

La tarjeta Arduino WiFi Rev.2 (ver Figura 14) funciona con un voltaje de referencia de 5 V, está basada en el microcontrolador ATmega 4809, tiene de 14 entradas/salidas digitales y 6 pines de entrada analógica. La tarjeta ESP32 (ver Figura 14), es una actualización de la

ESP8266, fabricada por la empresa china ESPRESSIF, que funcionan con un voltaje de 3,3 V y está basadas en el chip WROOM32.

El sensor que permite medir la energía de forma inteligente es el PZEM-004T (AC). Se utilizó relés inteligentes del tipo *SONOFF* en calidad de actuadores, como se muestra en la Figura 15; estos dispositivos se conectan a la red de área local mediante WiFi.



Figura 15. Sensor de energía PZEM-004T (izq), y actuador (der). (Alibaba, 2021)

El sensor de energía PZEM-004T (ver Figura 15), permite la medición de parámetros eléctricos en circuitos de corriente alterna tales como voltaje, corriente, potencia, energía, y factor de potencia; la interfaz para la lectura de datos se realiza mediante una conexión serial con un voltaje de referencia de 5 V.

Los relés inteligentes *SONOFF* (ver Figura 15), se conectan directamente a las redes eléctricas monofásicas con un rango de voltaje entre 90 – 250 V, estos dispositivos se comunican con la red LAN mediante WiFi y pueden ser controlados con la aplicación *EWELINK*. Las integraciones con Alexa de *Amazon*, *IFTTT*, y el asistente de Google son posibles para encender y apagar los dispositivos que estén conectados al relé inteligente.

De forma específica, se utilizará una tarjeta ESP8266 para recuperar los datos de producción energética del controlador de carga solar. La tarjeta ESP32 se utilizará de forma conjunta con la PZEM-004T para medir el consumo eléctrico de la impresora 3D y los demás componentes del sistema. Finalmente, el Arduino UNO WIFI Rev.2 se utilizará para medir los datos meteorológicos y de radiación solar del sitio de la instalación fotovoltaica.

3.3.3.3. Big Data y Analítica

Para recolectar la gran cantidad de datos proveniente de los sensores, se utilizará la plataforma *ThingSpeak*, que a la vez permite la visualización y análisis tal como se muestra en la Figura 16.

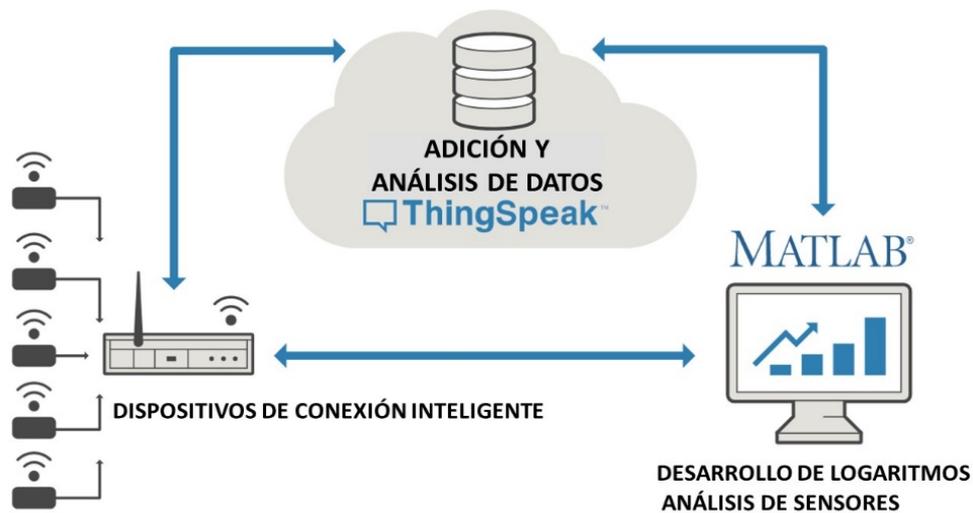


Figura 16. Flujo de información en ThingSpeak. (Mathworks, 2020) (traducción propia)

Las mediciones obtenidas por medio de sensores, se envían de forma privada a la nube por medio de las tarjetas microcontroladoras que actúan como pasarelas *IoT*, y los datos son almacenados en la nube de *ThingSpeak* (ver Figura 16). Luego, usuario puede visualizarlos de forma interactiva y en tiempo real; además, la plataforma permite realizar análisis de los datos utilizando el lenguaje de programación de Matlab o desencadenar acciones con el plugin *React* (Mathworks, 2020).

3.3.3.4. Ciberseguridad

De acuerdo con la agencia de ciberseguridad de la unión europea (ENISA), las dimensiones más importantes para las redes inteligentes de energía son la integridad, disponibilidad y confidencialidad, en el orden de prioridad que se muestra en la Figura 17.

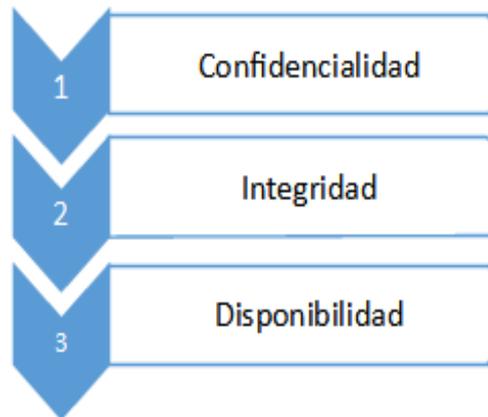


Figura 17. Metas de seguridad de las TIC en redes inteligentes. (ENISA, 2012)

De las metas de seguridad en las redes inteligentes de energía mostradas en la Figura 17, la confidencialidad se refiere a la información cuyo acceso debe ser protegido de personal no autorizado. La integridad se enfoca en identificar y prevenir la modificación de los datos sin autorización. La disponibilidad se centra en asegurar que los servicios y los datos puedan ser accedidos para propósitos específicos en el tiempo preciso.

Las dimensiones de autenticación y no repudio se pueden considerar relevantes en la automatización de redes o en servicios energéticos con valor agregado para el cliente final. Los datos de consumo de energía deben considerarse como datos personales ya que proveen detalles sobre los hábitos de la gente (Agencia de Ciberseguridad de la Unión Europea, 2012).

3.3.4. Arquitectura

En el presente apartado se presenta la arquitectura del proyecto considerando la recomendación de Jena et al. (2020) con cinco capas que fue revisada en el subcapítulo *Medición inteligente de energía* tal como se muestra en la Figura 18.

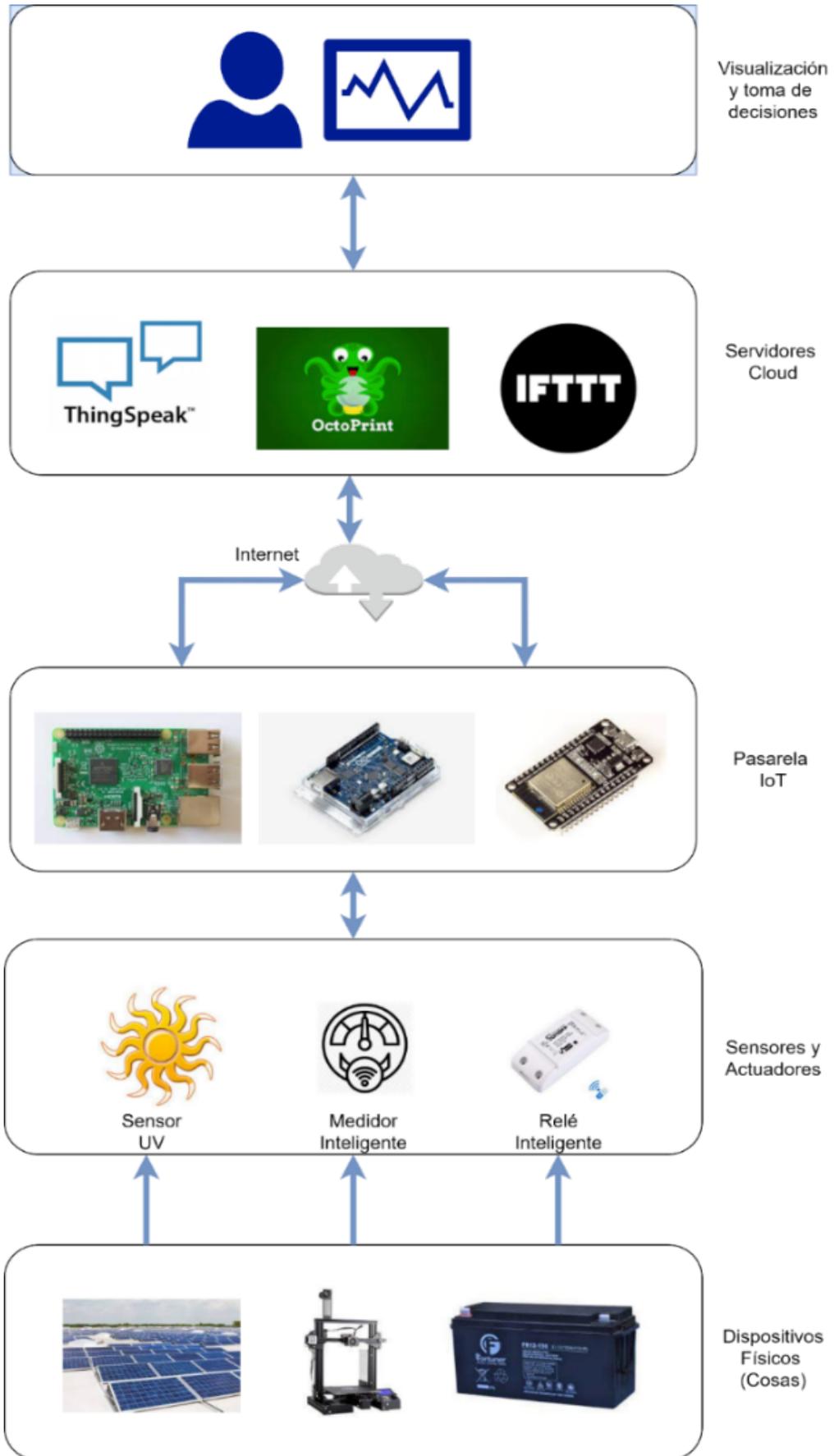


Figura 18. Arquitectura para la propuesta planteada. (Elaboración propia)

De acuerdo con la Figura 18, los datos se recogen mediante sensores y luego, se envían mediante tarjetas microcontroladoras a través de la red LAN de internet a la capa de almacenamiento y gestión de datos que está basada en las plataformas *OctoPrint*, *IFTTT*, y *ThingSpeak*.

Utilizando las plataformas digitales mencionadas, se realiza la visualización de los datos, que luego estarán a disposición del usuario. Este último podrá controlar los dispositivos físicos de forma remota y en función de sus requerimientos; el sistema tiene una programación autónoma y responde cuando se activan los desencadenantes programados.

3.3.5. Componentes e integración de tecnologías

En el presente apartado se describirá los componentes más relevantes de la propuesta que aún no han sido revisado anteriormente y la a conexión general del sistema tal como se muestra en la Figura 19.

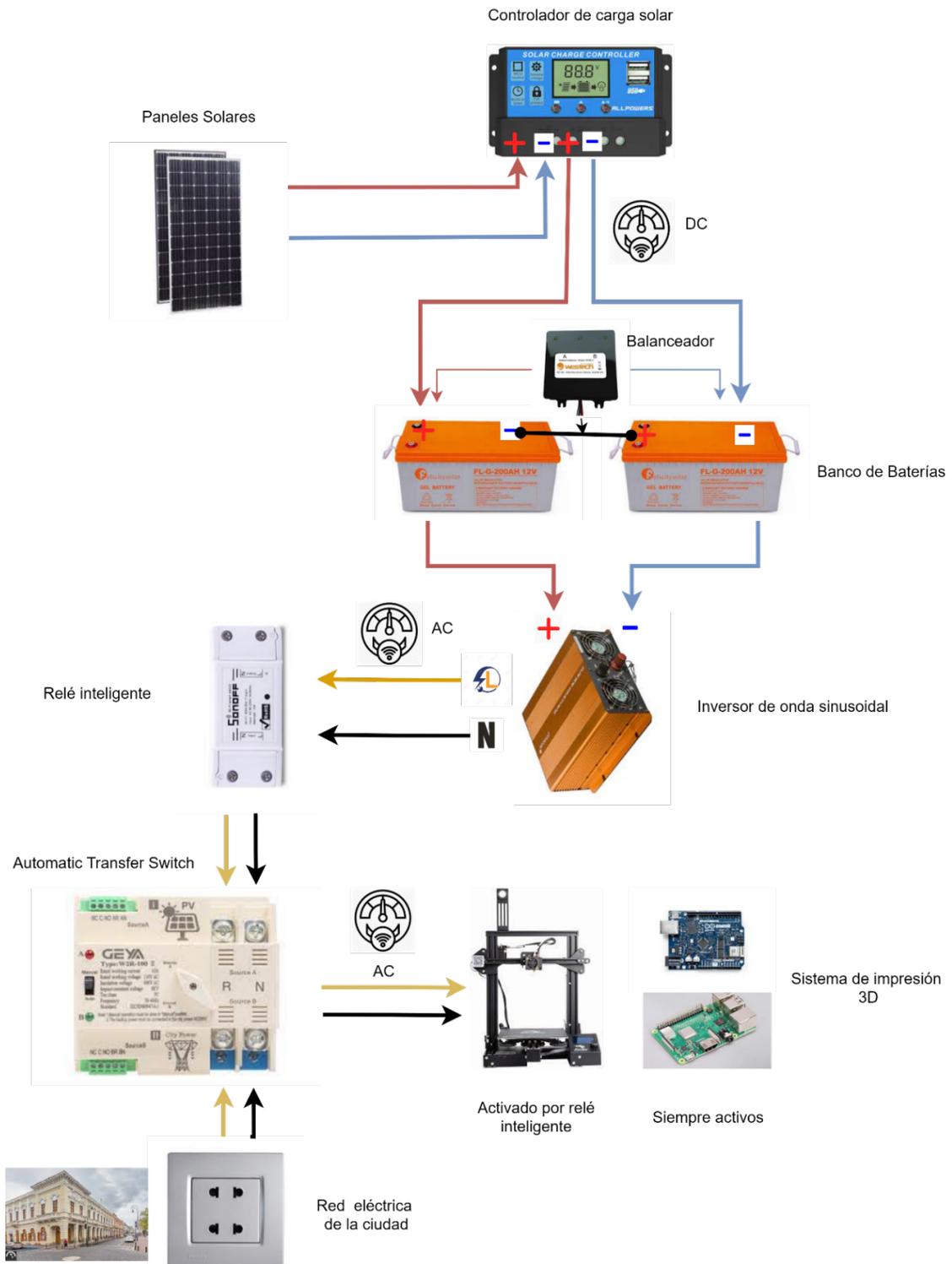


Figura 19. Componentes y conexiones del sistema propuesto. (Elaboración propia)

3.3.5.1. Paneles solares

Los módulos o paneles solares (ver Figura 19) son dispositivos que transforman de forma directa la energía solar en energía eléctrica DC por medio del efecto fotoeléctrico. Dependiendo del proceso de fabricación pueden ser policristalinos (menos eficientes y

económicos) o monocristalinos (eficientes y costosos); para aplicaciones residenciales se prefiere estos últimos.

Los parámetros que caracterizan a un panel solar son: la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente nominal ($I_{m\acute{a}x}$), el voltaje nominal ($V_{m\acute{a}x}$), tal como se presenta en la Figura 20. Los valores más altos que puede alcanzar el panel solar cuando la resistencia es cero (cortocircuito) o cuando la resistencia tiende a infinito (circuito abierto) son I_{sc} y V_{oc} .

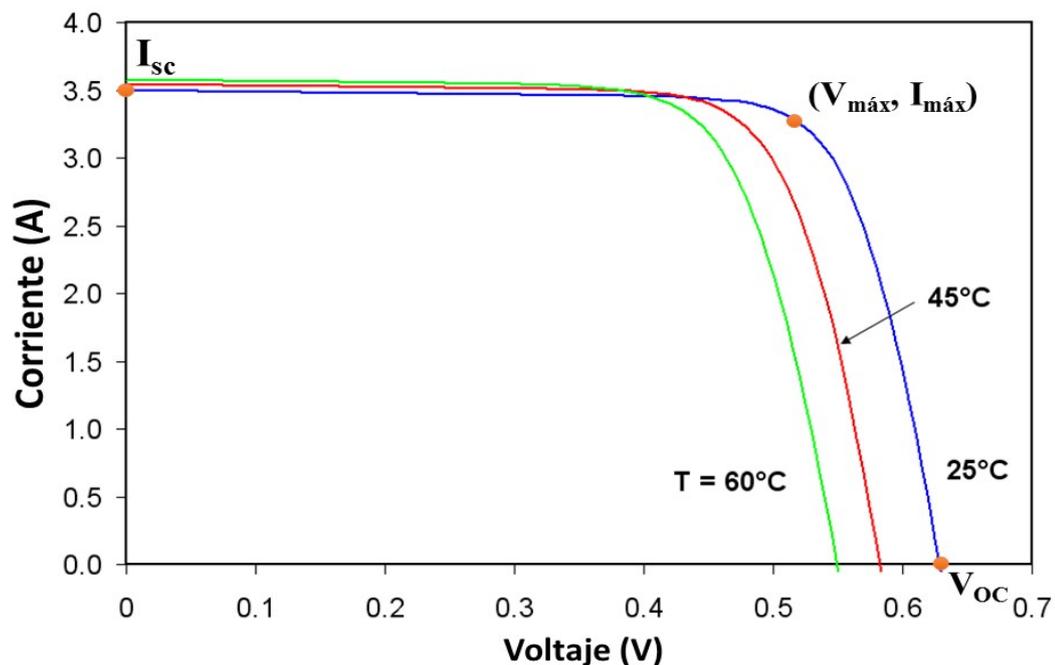


Figura 20. Curva característica $I - V$ para un panel solar. (Wikimedia.org, 2021)

En la Figura 20 se muestra las curvas características para un panel solar bajo distintas condiciones de temperatura, se observa que el rendimiento de un panel solar se ve afectado de forma inversamente proporcional a la temperatura de funcionamiento. El punto donde se puede formar el rectángulo de área máxima bajo la curva característica es el punto de potencia máxima o nominal ($I_{m\acute{a}x}$, $V_{m\acute{a}x}$).

3.3.5.2. Controlador de carga solar

Un controlador de carga solar (ver Figura 19), es un dispositivo que permite conectar los paneles solares (producción de energía), las baterías (almacenamiento) y las cargas (consumo). Siempre debe conectarse en el siguiente orden: baterías, paneles, y carga; la desconexión debe seguir el orden inverso (ZHCSOLAR, 2019).

Los controladores de carga pueden ser de dos tipos: PWM (*pulse width modulation*) o MPPT (*maximum power point tracking*). Los primeros permiten un control de carga poco eficiente, son económicos, y se utilizan cuando la diferencia entre el voltaje del panel solar y las baterías es pequeña, por ejemplo, paneles de 18 V para cargar una batería de 12 V.

Los controladores MPPT tienen una alta eficiencia y aseguran que la carga del banco de baterías ocurra siempre en el punto de máxima potencia sin importar la radiación solar incidente. En estos dispositivos, el voltaje de carga puede ser muy alto con relación al voltaje de las baterías, por ejemplo, 100 V para cargar un banco de baterías de 24 V.

3.3.5.3. Baterías solares

Las baterías solares (ver Figura 19), permiten almacenar la energía fotovoltaica, que será utilizada por el sistema o por el inversor; cada batería tiene una capacidad máxima de almacenamiento que se mide en amperios-hora (Ah). Solamente se pueden descargar hasta un cierto porcentaje que se denomina profundidad de descarga (DOD) y que generalmente es 50%, si se supera este porcentaje, el número de ciclos de funcionamiento se reduce.

Existen varios tipos de baterías dependiendo de su estructura química; las más utilizadas en aplicaciones solares son las de gel de plomo y las de litio. Las primeras son económicas, pesadas, y tienen una baja DOD; las baterías de litio tienen una alta eficiencia y una profundidad de carga de hasta 65%, pero su costo es elevado. El porcentaje de carga está directamente relacionado con el voltaje de la batería como se muestra en la Figura 21.

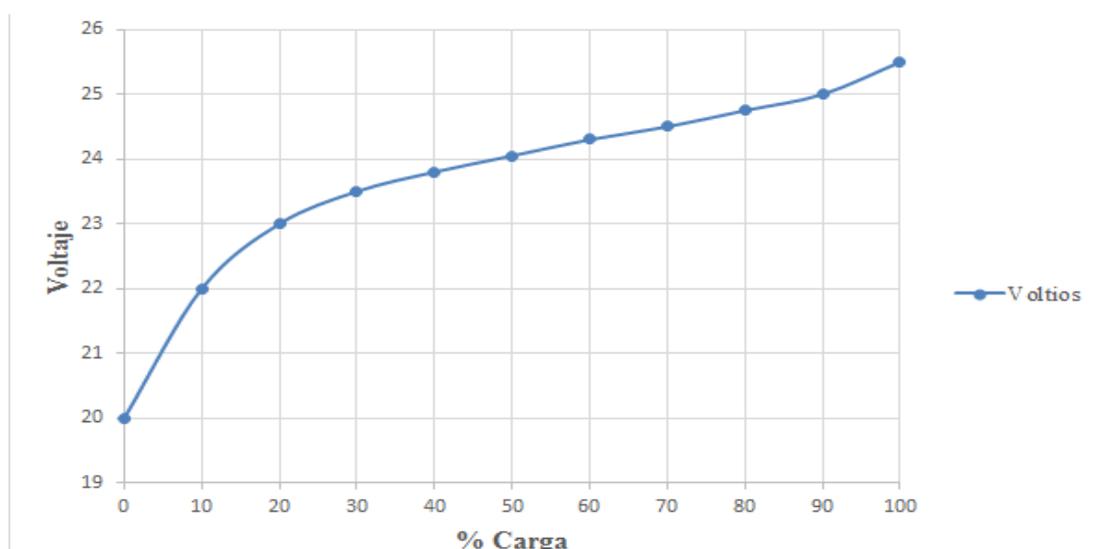


Figura 21. Voltaje en una batería vs. % de carga. (De Rooij, 2018) (traducción propia)

Cuando una batería de gel de plomo está completamente cargada, su voltaje es de 25,7 V y cuando está completamente descargada el valor cae por debajo de 21 V (ver Figura 21). La zona más estable en la que generalmente ocurren los ciclos de carga y descarga está entre 23,5 V y 24,7 V que corresponde aproximadamente a 40% y 80% de carga. La vida máxima para una batería se consigue si la profundidad de descarga es de 30% (PVEDUCATION.COM, 2021).

3.3.5.4. Balanceador de carga

En general las baterías tienen un voltaje nominal de 12 V, así que, para formar configuraciones de 24 V o 48 V, se forma bancos de baterías en serie y/o paralelo. Las baterías en serie mantienen la capacidad de carga mientras suman el voltaje nominal, y requieren el balanceador de carga (ver Figura 19) para tener una vida útil prolongada. Las baterías en paralelo mantienen el voltaje nominal del sistema y suman la capacidad de carga.

3.3.5.5. Inversor de onda senoidal

Un inversor de onda senoidal (ver Figura 19) es un dispositivo que convierte la energía DC almacenada en el banco de baterías en corriente alterna que se puede utilizar en la mayoría de los equipos. Su voltaje de funcionamiento es de 12 V o 24 V dependiendo de la potencia nominal; tiene un dispositivo de seguridad interno que se desconecta automáticamente del banco de baterías cuando el voltaje es muy alto o bajo. Para seleccionar el inversor, se debe considerar que la potencia combinada de las cargas no supere la potencia nominal del equipo.

3.3.5.6. Interruptor de cambio automático (*Automatic Transfer Switch*)

Los inversores de las empresas *ORO Power Equipment* o *Scowatt*, se pueden conectar a la red eléctrica tradicional para funcionar como un interruptor de cambio automático (*ATS*). Un *ATS* (ver Figura 19) utiliza la energía solar como la fuente principal para alimentar al sistema a través del inversor, y la energía de la red eléctrica tradicional se activa de forma secundaria cuando el recurso solar es insuficiente.

3.3.5.7. Enrutador de internet

Un enrutador de internet es un terminal que permite conectar dispositivos a la red ya sea de forma física mediante cables RJ45 o a través de conexiones WiFi de área local (LAN). Para el

presente trabajo, la velocidad de la conexión no tiene mucha importancia cuando se trata de los sensores y tarjetas microcontroladoras, pero para la visualización de video en tiempo real con una tasa de 20 fps, se requiere una velocidad de subida de al menos 1,2 Mbps (The Spaghetti Detective, 2021).

3.3.5.8. Raspberry Pi 3B

Una *Raspberry Pi* (ver Figura 19) es una computadora de bajo costo y del tamaño de una tarjeta de crédito, que tiene las conexiones para un teclado, ratón y monitor; el sistema operativo más popular que se utiliza es *Raspbian* (una distribución de *Debian – Linux*). Además, tiene 40 pines que sirven como entradas o salidas de información; estos pines tienen un voltaje de operación de 3,3 V aunque puede suministrar 5 V (Khanna et al., 2021).

En la presente contribución, la *Raspberry Pi* aloja el sistema operativo *OctoPi* que es un sistema operativo basado en *Raspbian* que ya incluye el software *OctoPrint* para manejar la impresora 3D de forma remota. Es la forma más sencilla y económica de conectar un sistema de fabricación aditiva a internet y puede descargarse de forma gratuita desde el siguiente enlace: <https://octoprint.org/download/>.

3.3.6. Resultados esperados

Al concluir este proyecto se espera obtener un prototipo que active una impresora 3D alimentada con energía fotovoltaica y que sea controlada con microcontroladores Arduino, ESP 8266, ESP32 y una Raspberry Pi 3B.

El sistema estará conectado a la plataforma de internet de las cosas *ThingSpeak* que permitirá la interacción entre el usuario y el sistema desde cualquier lugar del mundo y en tiempo real, priorizando el uso de energía solar para realizar la impresión.

Se espera que este proyecto genere ahorro energético con un enfoque amigable con el ambiente y que permita una recuperación económica sostenible de la COVID-19 para emprendedores y PYMES.

3.3.7. Presupuesto y retorno esperado de la inversión

En la Tabla 2, se muestra los materiales y equipos requeridos para poner el sistema en funcionamiento. Es importante destacar que todos los elementos han sido adquiridos e instalados de forma que se pueda ejecutar pruebas de funcionamiento.

Tabla 2. Presupuesto para el proyecto

Elemento	Cantidad	Costo unitario (€)	Costo Total (€)
Impresora 3D	1	297,50	297,50
Raspberry Pi	1	170,00	170,00
Foco	1	0,85	0,85
Router	1	12,75	12,75
Computador	1	340,00	340,00
Arduino 1 WiFi Rev.2	1	42,50	42,50
Panel solar 400 W monocristalino	1	280,50	280,50
Batería solar 100 Ah – 12 V	2	170,00	340,00
Controlador de carga MPPT	1	38,25	38,25
Inversor de 600 W onda sinusoidal	1	191,25	191,25
Equilibrador de carga para un sistema de 24 V	1	29,75	29,75
Cables de conexión kit	1	17,00	17,00
Total (€)			1760,35

Elaboración propia, 2021

Aunque el costo para una sola instalación, tomando en cuenta un valor de cambio de 0,85 euros por cada dólar de los Estados Unidos de América, supera los mil setecientos euros (ver Tabla 2), se debe considerar que el tiempo de vida útil de los paneles solares es de 25 años y de las baterías al menos 10 años, el sistema requiere poco mantenimiento, y puede funcionar de forma continua por periodos prolongados.

El retorno esperado de la inversión se evaluó utilizando Microsoft Excel y las funciones integradas para el cálculo del valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR) tal como se muestra en la Figura 22.

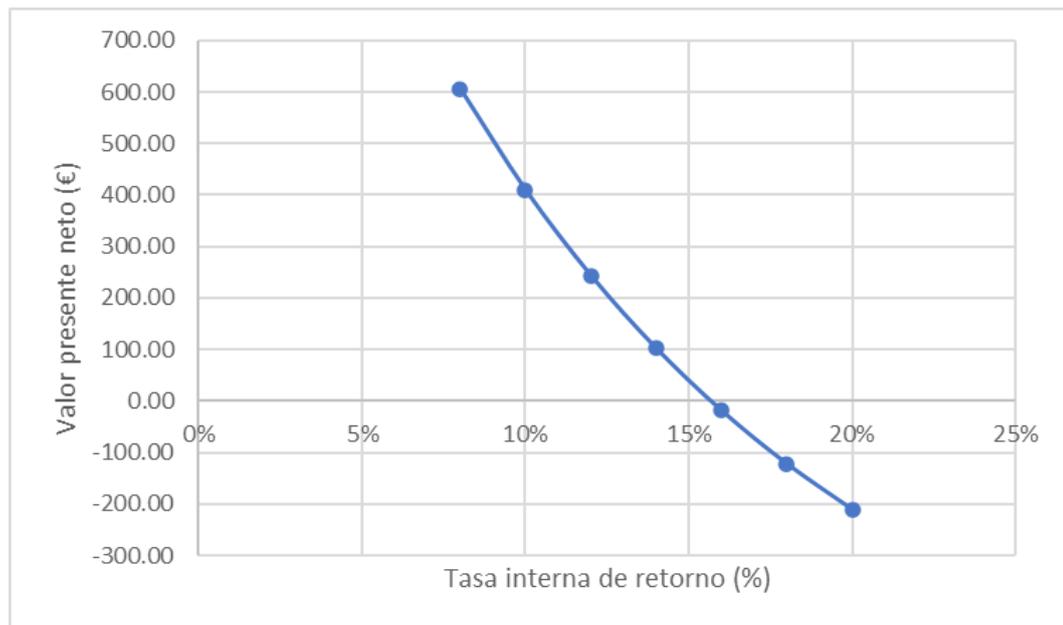


Figura 22. Análisis del retorno esperado de la inversión. (Elaboración propia)

Se ha considerado que el sistema trabajaría a potencia nominal todo el año con lo que la generación local asciende a 441 kW-h. Si se incluye el valor de la energía y las ganancias esperadas (descontando el pago a usuarios y el mantenimiento), se obtiene un valor de descuento anual de € 357 por al menos 10 años.

Por lo tanto, la tasa interna de retorno corresponde a un 16% (ver Figura 22). Si se considera que el porcentaje de interés que podría recuperar la inversión en un banco de Ecuador es de hasta el 6%, se observa que existe la factibilidad de desarrollar la propuesta.

3.3.8. Planificación general

El proyecto se ha planificado para que se cumpla dentro un espacio de cuatro meses desde marzo hasta junio de 2021. Las actividades que se cumplirá tomando en cuenta la planificación secuencial que se planteó en la *Metodología del Trabajo* se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Planificación general del proyecto

Actividades	Meses (marzo -junio 2021)			
	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Planificación de la propuesta	■			
Organización de los capítulos y subcapítulos	■	■		
Cálculo y selección de los componentes para la propuesta		■		
Compra de componentes		■	■	
Fabricación del prototipo			■	
Programación de los microcontroladores			■	
Pruebas de funcionamiento			■	■
Análisis de los resultados y redacción del TFM				■

Elaboración propia, 2021

En los dos primeros meses se planteará los elementos que contendrá la propuesta (ver Tabla 3) y los componentes requeridos para alcanzarla mientras que, en los dos meses finales se realizará la implementación de la propuesta y se redactará la memoria del trabajo.

4. DESARROLLO ESPECÍFICO DE LA CONTRIBUCIÓN DEL TFM

En este capítulo se muestra de forma ampliada los cálculos, componentes e integración de tecnologías que han permitido alcanzar los objetivos propuestos para el TFM. Adicionalmente, se muestra los resultados y visualizaciones obtenidas en las plataformas de internet de las cosas que fueron utilizadas.

4.1. DESARROLLO DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

La instalación solar fotovoltaica se desplegó en la terraza de una vivienda localizada en Riobamba, Chimborazo (Ecuador), con un área horizontal libre de sombras de 10 m x 4 m, y considerando las conexiones que se muestran en la Figura 19.

4.1.1. Análisis de la demanda energética del sistema

En un sistema eléctrico, las cargas se refieren a los dispositivos que están conectados a la fuente de energía. Para el presente trabajo, se ha considerado la potencia nominal de los elementos que conforman el sistema tal como se muestra en la Tabla 4.

Elemento	Potencia nominal (W)	Horas de uso al día (h/d)	Energía consumida (Wh/d)
Impresora 3D	270	4	1080
Raspberry Pi	6	4	72
Foco	9	12	108
Enrutador	6	12	144
Total	291		1404

Elaboración propia, 2021

Es necesario estimar el número de horas que se utilizará cada elemento diariamente tal como aparece en la tercera columna de la Tabla 4 con el fin de obtener el requerimiento de energía diario. Este valor aparece en la columna final de la Tabla 4, como el producto entre la potencia nominal y el número de horas de uso.

En total la potencia pico consumida a lo largo del día es 291 W. Si la impresora no está funcionando, al menos el foco, la *Raspberry Pi* y el enrutador deberían hacerlo (21 W). La cantidad diaria de energía requerida para que la impresora pueda funcionar de forma

autónoma durante 4 h es de 1404 Wh, por lo que se utilizará este valor para el dimensionamiento del sistema.

4.1.2. Dimensionamiento de los paneles solares

Para dimensionar los paneles de una instalación fotovoltaica, se debe conocer la irradiación solar disponible en el sitio que se muestra en la Figura 23, y la orientación recomendada. En este caso, la orientación recomendada para los paneles en la zona ecuatorial es de 0° a 30° respecto al norte con una inclinación de al menos 10° respecto a la horizontal para facilitar la limpieza (Alvarez Lozano, 2017).

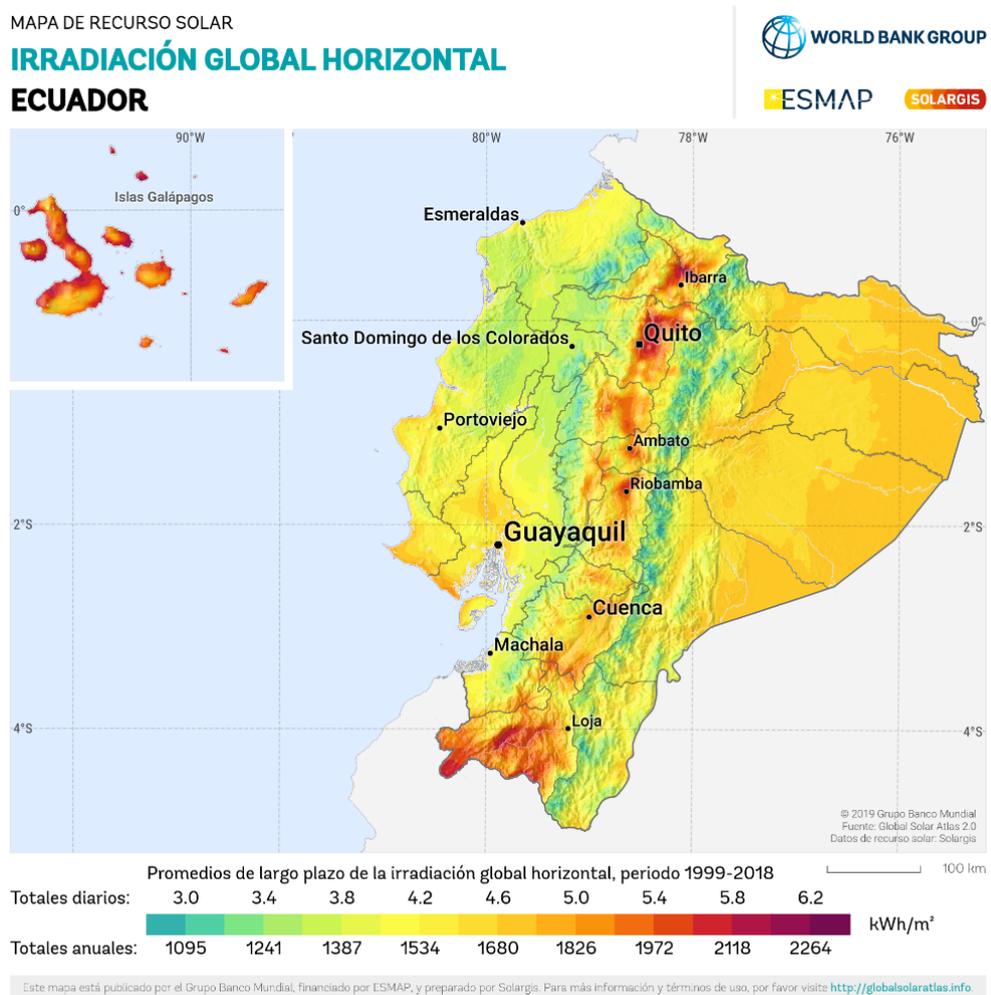


Figura 23. Irradiación global horizontal en Ecuador. (Banco Mundial, 2018)

En base al mapa de irradiación global horizontal en Ecuador (ver Figura 23), existe un gran potencial solar en el archipiélago de las Galápagos y en la cordillera de los Andes, en donde se encuentra la ciudad de Riobamba. Entonces, existe la factibilidad de realizar una

instalación fotovoltaica en el sitio de estudio, por lo que se tomará un promedio diario irradiación global horizontal para Riobamba de $5,1 \text{ kWh/m}^2$, que es equivalente a 5,1 horas solares.

Con el fin de dimensionar el sistema solar fotovoltaico, se utiliza la ecuación 1 y los requerimientos energéticos que se mostraron en la Tabla 4:

$$P_s = \frac{C}{h_s \varepsilon} \quad (1)$$

Donde:

P_s , es la potencia combinada de los paneles solares en vatios (W)

C , es el consumo diario total del sistema en vatios-hora (Wh)

h_s , es el potencial solar en el sitio de la instalación en horas solares (h)

ε , es la eficiencia del sistema que depende del cableado, ensombrecimiento de los paneles, etc. Se puede tomar un valor de 70% para sistemas estándar.

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación 1, se tiene una potencia fotovoltaica nominal total requerida de:

$$P_s = \frac{1404}{5,1 \times 0,70}$$

$$P_s = 393,3 \text{ W}$$

Por lo tanto se adquirió el panel solar monocristalino marca Yongli Solar que se muestra en la Figura 24, que tiene una potencia máxima de 400 W, voltaje máximo de 41,15 V, corriente máxima de 9,73 A, I_{sc} de 10,26 A, V_{oc} de 50 V y eficiencia de 22%.



Figura 24. Módulo solar instalado en Riobamba, Ecuador. (Elaboración propia)

El panel monocristalino mostrado en la Figura 24, tiene de 72 células, pesa 22,7 kg y mide 2 m x 1 m (4 cm de espesor) por lo que pudo ser instalado con facilidad en el área disponible. Un solo panel solar con una potencia de 400 W es suficiente para alimentar las cargas consideradas para el presente TFM.

4.1.3. Selección del controlador de carga solar

La corriente nominal del controlador de carga depende de la potencia de los paneles solares y del voltaje del sistema tal como se muestra en la ecuación 2. La corriente máxima también depende de los parámetros técnicos mostrados por el fabricante en el manual del equipo.

$$T_C = \frac{P_S}{V_S} f_s \quad (2)$$

Donde:

T_C , es la corriente nominal del controlador de carga

V_S , es el voltaje del sistema fotovoltaico en voltios (V), y es generalmente 12 V, 24 V, o 48 V.

f_s , es un factor de seguridad para no sobrepasar el amperaje permitido. Su valor es 1,3.

Para dimensionar el controlador de carga solar requerido por el sistema, se utilizó una tensión del acumulador de 24 V y una profundidad de descarga de 50 %, con esos datos se tiene:

$$T_C = \frac{393,3 \text{ W}}{24 \text{ V}} \times 1,3$$

$$T_C = 21,3 \text{ A}$$

En consecuencia, se ha adquirido un controlador de carga EPEVER Tracer 3210 AN, que puede soportar una corriente de carga de hasta 30 A y un voltaje total de entrada (circuito abierto) de 100 V, el controlador conectado se muestra en la Figura 25.



Figura 25. Controlador de carga solar EPEVER 3210 AN. (Elaboración propia)

El controlador solar Tracer 3210 AN es del tipo MPPT (ver Figura 25), por lo que tiene una eficiencia en la conversión hacia 24 V superior a 97,5 % para una potencia de 400 W. Las conexiones se realizan en la parte inferior del dispositivo, y los valores de las variables pueden ser observados en la pantalla LCD (BEIJING EPSOLAR TECHNOLOGY, 2017)

Adicionalmente, existe la interfaz de comunicación MODBUS RS485 que envía los datos de corriente, voltaje, potencia, entre otros; los detalles del protocolo se muestran en la Tabla 5. Entonces, resulta conveniente aprovechar esta opción en lugar de instalar otros sensores que midan los parámetros eléctricos del controlador de carga.

Tabla 5. Detalles del protocolo MODBUS para el controlador solar Tracer AN 3210

Color del cable	Denominación
Azul	B
Azul/blanco	A
Verde	A
Verde/blanco	B
Anaranjado	5 V
Anaranjado/blanco	5 V
Café	GND
Café/blanco	GND

Elaboración propia, 2021

Cuando se conecta un cable RJ45 en el puerto COM del controlador de carga solar, se puede apreciar 4 pares de cables que transmiten 4 señales que son: A, B, 5 V, y GND (ver Tabla 5). Por medio de un convertidor MAX 485 se puede transformar las señales desde el protocolo RS 485 a un protocolo TTL que puede ser leído por las tarjetas microcontroladoras.

4.1.4. Acumulador solar

En el presente trabajo se utilizó la ecuación 3 para calcular la capacidad del acumulador solar requerido considerando una capacidad de 1404 W-h y una profundidad de descarga (DOD) de 50% que está dentro del rango más estable para las baterías (PVEDUCATION.COM, 2021).

$$B = \frac{C}{V_s \cdot DOD} \quad (3)$$

Donde:

B, es la capacidad requerida de las baterías solares (A-h).

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación, se tiene:

$$B = \frac{1404 \text{ Wh}}{24 \text{ V} \cdot 0,50}$$

$$B = 117 \text{ Ah}$$

Debido a las restricciones del mercado, se adquirió dos baterías de gel de plomo reguladas por válvulas marca Scowatt de 100 Ah de capacidad, y se las conectó en serie por medio de un balanceador de carga como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Banco de baterías instalado. (Elaboración propia)

Las baterías se conectan en serie (ver Figura 26) para obtener el sistema de 24 V que requiere el inversor de onda senoidal. Para tal fin, se conectó el extremo positivo (rojo) de una de las baterías con el extremo negativo (negro) de la otra, y los dos extremos libres fueron conectados al controlador de carga solar.

4.1.5. Inversor de onda senoidal

El inversor solar seleccionado se muestra en la Figura 27, este tiene una capacidad de 600 W que es mayor a la potencia máxima requerida por el sistema. Aunque la instalación solar tiene un voltaje nominal de 24 V, el voltaje en las baterías varía entre 21 VDC (voltaje mínimo de trabajo) y 29 VDC (voltaje máximo de trabajo), por lo tanto, se requiere del inversor que tiene un voltaje de salida constante de 120 V @60 Hz.



Figura 27. Inversor solar instalado. (Elaboración propia)

El inversor de onda senoidal (ver Figura 27) se conecta directamente al banco de baterías, tiene dos modos de operación: operación constante (*boot*) y modo de ahorro de energía (*power saver*) en el cual, si la carga es menor de 30 W, se desconecta de forma automática. Adicionalmente, el inversor tiene un *dip switch* que permite seleccionar la frecuencia de salida (50 Hz o 60 Hz) y el modo preferido de operación (AC o DC).

4.2. INTEGRACIÓN DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS CON IMPRESORAS 3D

Las impresoras 3D utilizan corriente continua (DC) para funcionar; en el caso de este trabajo, la impresora Ender 3 Pro utiliza un voltaje de 24 VDC. Dado que el banco de baterías tiene el mismo voltaje nominal que el de la impresora, una conexión directa puede resultar obvia.

Sin embargo, el voltaje de la batería cambia a medida que se producen los ciclos de carga/descarga por lo que, en el escenario de una conexión directa, la velocidad de los motores variaría continuamente y no se podría mantener la geometría de las partes a fabricar.

Por otra parte, mientras mayor sea el voltaje que se desea transportar a través de conductores eléctricos, las pérdidas son menores; los sistemas fotovoltaicos generalmente se encuentran alejados de las áreas donde se instalan los equipos, porque las fuentes de energía renovable son aprovechables principalmente en espacios abiertos. Entonces transportar energía con un voltaje de 120 V resulta más eficiente que hacerlo con 24 V.

Aunque a nivel industrial el estándar de trabajo es 24 VDC, la popularización de la corriente alterna ha logrado que la mayoría de los equipos tales como ordenadores, tarjetas microcontroladoras, celulares, etc. cuenten con rectificadores eficientes que convierten la corriente alterna en corriente continua estabilizada. Las necesidades de corriente continua son muy variadas por ejemplo: 5 V para los cargadores de celulares, 12 o 24 V para control industrial, 19,5 V para ordenadores portátiles, etc; los adaptadores de AC entregan de forma precisa las corrientes DC requeridas.

Por lo expuesto, la integración de la instalación solar presentada en el trabajo, con la impresora 3D se ha ejecutado utilizando corriente alterna con un voltaje de 120 V y una frecuencia de 60 Hz (estándar de Ecuador). Existe un interruptor *SONOFF*, que activa o desactiva el sistema dependiendo de las necesidades del usuario, y una *Raspberry Pi* que almacena el sistema *Octoprint*.

4.2.1. *Plugin The Spaghetti Detective de Octoprint*

Inicialmente el control de *Octoprint* para impresoras se podía realizar únicamente dentro de la red de área local (LAN), pero actualmente existen *plugins* tales como *The Spaghetti Detective* que crean canales seguros para acceder a *Octoprint* desde cualquier lugar del mundo, la interfaz se muestra en la Figura 28.

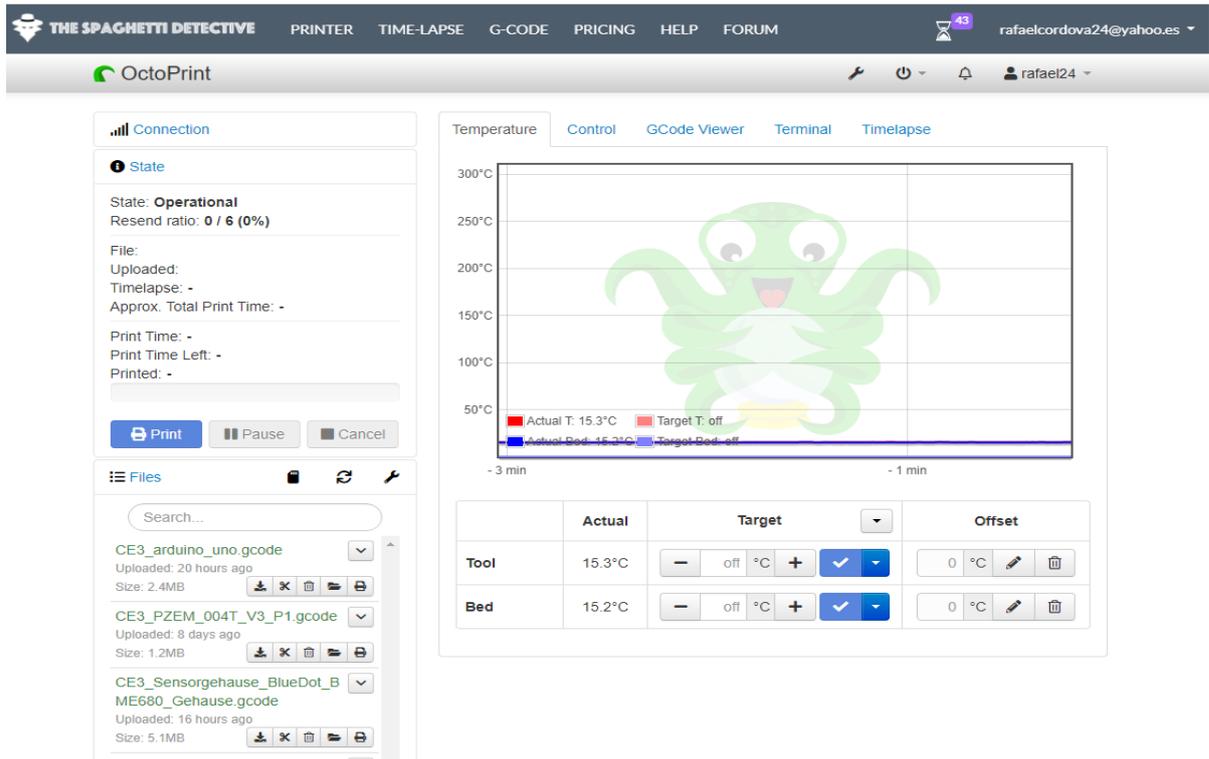


Figura 28. Interfaz de Octoprint a través de TheSpaghettiDetective. (Elaboración propia)

Entre las acciones que se pueden realizar en la interfaz de *TheSpaghettiDetective* están: subir archivos, iniciar, pausar, reanudar y cancelar una impresión, revisar el proceso en tiempo real, revisar el código G de la impresora, entre otros (ver Figura 28). Este *plugin* utiliza algoritmos de inteligencia artificial para detener la máquina automáticamente, si una impresión es defectuosa y mantener informado al usuario de forma continua (Coward, 2019).

4.3. ENVÍO Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS DE LOS SENSORES EN LA NUBE

En este apartado se muestra las conexiones y la visualización de los datos solares transmitidos mediante la tarjeta ESP8266, de los datos de consumo eléctrico transmitidos mediante la tarjeta ESP32, y de los datos meteorológicos enviados mediante la tarjeta Arduino Uno WiFi Rev.2.

4.3.1. Datos del sistema solar fotovoltaico

Los datos del controlador de carga solar fueron leídos con una tarjeta ESP8266 utilizando el protocolo Modbus y un chip MAX485 para obtener una comunicación TTL, las conexiones realizadas se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Conexiones entre el chip MAX485 y la tarjeta ESP8266

MAX485	ESP8266
DI	TX
DE	D2
RE	D1
RO	RX
VCC	3V3
GND	GND

Elaboración propia en base a glitterkitty (2019 y paulca (2018)

Las señales A, B, 5 V y GND que son enviadas desde el controlador de carga solar ingresan al chip MAX485, que tiene como salidas los pines de la primera columna de la Tabla 6. Finalmente, se debe conectar los pines mostrados en la primera columna con aquellos de la segunda columna, y de esa forma se establece la comunicación serial.

En la Figura 29 se muestra las conexiones realizadas, entre el controlador de carga, y la tarjeta ESP32, mientras que en el anexo A, se muestra el código utilizado para publicar los datos en *ThingSpeak*, utilizando un protocolo de comunicación HTTP (Mathworks, 2020).

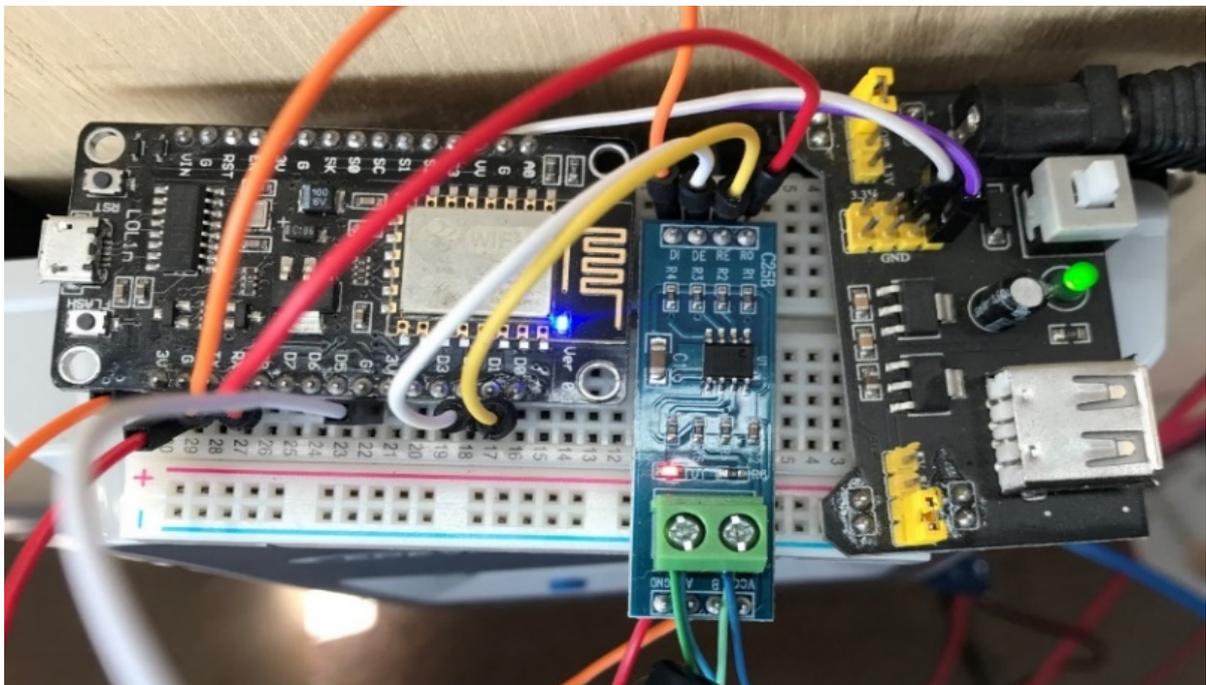


Figura 29. Conexión para el lector de datos del sistema fotovoltaico. (Elaboración propia)

Además de las conexiones descritas, se tiene un módulo reductor de voltaje LM2596 (ver Figura 29) que se conecta directamente al banco de baterías, y reduce el voltaje hasta 10 V para que pueda ingresar al regulador del módulo de entrada que tiene una salida de 5V.

Los datos de corriente y voltaje tanto en el panel solar como en la batería se envían cada 5 minutos al canal denominado "Datos del controlador de carga solar" que se encuentra alojado en *ThingSpeak* con el ID: 1415434 (privado) como se presenta en la Figura 30.



Figura 30. Parámetros del sistema fotovoltaico en ThingSpeak. (Elaboración propia)

El voltaje del panel solar que se muestra en el campo *Field 1* está directamente relacionado con la cantidad de luminosidad y la hora del día, desde la salida del sol el valor supera los 25 V, acercándose al voltaje de circuito abierto al medio día, pero en la noche, el voltaje es cero. La corriente del panel (*Field 2*) es máxima mientras existan cargas en el sistema o se recarguen las baterías, luego su valor tiende a cero.

El voltaje en la batería (*Field 3*) sufre ciclos de carga y descarga, el valor máximo que alcanza de 28,6 V se denomina *boost* y se entrega por una hora al día, luego el voltaje se mantiene constante en 27,2 V lo que permite mantener las baterías completamente cargadas sin dañarlas; finalmente, en la noche cuando existe el ciclo de máximo de consumo, el voltaje se

reduce a medida que la energía se consume. La corriente en las baterías (*Field 4*) varía dependiendo de la carga que se esté recibiendo.

4.3.2. Consumo de energía durante la impresión 3D

Se utilizó un medidor de parámetros eléctricos AC denominado PZEM-004T v3.0 fabricado por la empresa China Peacefair para medir el consumo energético del sistema de FA; este dispositivo puede medir voltajes de entre 80-230 V y corrientes de hasta 100 A (convertidor externo). El medidor se conectó a una tarjeta ESP32 mediante comunicación serial, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Conexiones entre la PZEM-004T v3.0 y la tarjeta ESP32

PZEM-004T	ESP32
VCC	3V3
GND	GND
TX	RX2
RX	TX2

Elaboración propia

Debido a que el voltaje de trabajo de la PZEM-004T es 5 V, pero el voltaje de funcionamiento de la ESP32 es 3,3 V, se debió incluir una resistencia de 1 k Ω en el optoacoplador de la tarjeta PZEM-004T, las demás conexiones se muestran en la Tabla 7.

Las conexiones para el medidor de energía se muestran en la Figura 31, a la derecha se conecta los pines que permiten la comunicación serial con la tarjeta ESP32 y en la izquierda se conecta el convertidor externo de corriente, el cable de línea, y el cable de neutro.



Figura 31. Conexión del sistema medidor de energía a la nube. (Elaboración propia)

Para que el medidor de energía se encuentre aislado, se lo ha ubicado dentro de una carcasa impresa en 3D (ver Figura 31). El programa escrito en Arduino que permite el envío de datos eléctricos a la nube (*ThingSpeak*), se muestra en el anexo B.

Los datos de corriente, voltaje, potencia y energía consumida por el sistema se envían al canal privado “Energía consumida en la fábrica” que fue creado en *ThingSpeak* como se muestra en la Figura 32.



Figura 32. Valores eléctricos consumidos por el sistema. (Elaboración propia)

Para las pruebas de impresión, se utilizó modelos obtenidos de *Thingiverse*, que es un repositorio en línea de modelos 3D, las que sirvieron como carcasas de los elementos electrónicos del sistema; se imprimieron en PLA con una temperatura de la plancha de 50 °C y de 180 °C en el extrusor.

Se determinó que existen picos de consumo de energía (corriente y voltaje) cuando se imprime la pieza; el voltaje se mantiene alrededor de 122 V, pero la corriente alcanza valores máximos de 3,3 A con una potencia de 292 W, y mínimos de 0,77 A (66,5 W).

Cuando la impresora no está realizando ningún trabajo, el sistema consume una potencia de 24,2 W con la corriente constante; aunque el trabajo se desarrolló durante la noche y

madrugada, la energía de las baterías fue suficiente toda vez que la potencia con la que se dimensionó el sistema es de 291 W.

4.3.2.1. Energía consumida por el sistema en función del tiempo

La energía consumida en la fábrica describe un comportamiento lineal con una pendiente mayor cuando el sistema está trabajando, y una pendiente menor cuando el sistema ha terminado su trabajo (ver Figura 32). Aplicando la ecuación de la recta para ambos casos, se obtiene las ecuaciones 4 y 5, donde los puntos utilizados para obtener la ecuación 4 fueron: P1 (25-jun-2021 23:28:51, 2,063 kW-h), P2 (25-jun-2021 23:47:28, 2,097 kWh). El punto P2 se considera inicial para obtener la ecuación 5, siendo el punto final P3 (26-jun-2021 05:33:15, 2,238 kWh).

$$E_T - E_1 = 0,0857(t_T - t_1) \quad (4)$$

$$E_F - E_1 = 0,0249(t_F - t_1) \quad (5)$$

Donde:

E_T , E_F , son las energías consumidas durante el trabajo y durante la espera respectivamente en kW-h.

t_T , t_F , son los tiempos en los que se realizó el trabajo y durante la espera respectivamente, en h.

E_1 , t_1 , son la energía y el tiempo iniciales de medición (en caso de existir).

La potencia eléctrica se define como la relación entre el trabajo realizado por un sistema (o energía consumida) y el tiempo, por ende, aplicando esta definición en las ecuaciones 4 y 5, se tiene las ecuaciones 6 y 7

$$\frac{E_T - E_1}{(t_T - t_1)} = P_T = 0,0857 \text{ kW} \quad (6)$$

$$\frac{E_F - E_1}{(t_F - t_1)} = P_F = 0,0249 \text{ kW} \quad (7)$$

Por lo tanto, se puede determinar la potencia promedio del sistema cuando se encuentra en funcionamiento (P_T) es 85,7 W, y la potencia promedio cuando se encuentra en espera solamente con el foco y la *Raspberry Pi* activados es 24,9 W.

Reemplazando los valores de la potencia promedio del sistema tanto en funcionamiento como en espera de las ecuaciones 6 y 7 en la ecuación 3, se puede determinar el tiempo promedio de trabajo autónomo del sistema de FA. Es necesario considerar que el consumo del sistema es el producto entre la potencia de los artefactos y su tiempo de uso, las ecuaciones 8 y 9 muestran los parámetros descritos.

$$t_{TP} = \frac{DOD \cdot V_s \cdot B}{0,0857 \cdot 1000} \quad (8)$$

$$t_{FP} = \frac{DOD \cdot V_s \cdot B}{0,0249 \cdot 1000} \quad (9)$$

Donde,

t_{TP} , es el tiempo promedio de funcionamiento del sistema cuando está trabajando, en horas

t_{FP} , es el tiempo promedio de funcionamiento del sistema cuando está en espera

El multiplicador de 1000 se utiliza para convertir los valores en kW a W

Con base a las ecuaciones 8 y 9, en teoría se puede utilizar el sistema de FA de forma autónoma con la energía del banco de baterías hasta por 14 horas consecutivas y podría mantenerse en modo de espera hasta por dos días sin depender de la energía solar. Estos cálculos pueden variar, puesto que la potencia consumida por el sistema no es exactamente constante sino que varía como se muestra en el campo (*Field*) 3 de la Figura 32.

En Ecuador, existe un promedio diario de 12 horas de luz solar durante todo el año que concuerda con los datos de la Figura 30; es decir, el sistema puede funcionar de forma independiente de la red eléctrica, siempre y cuando no exista alguna situación extrema que impida la recepción de luz en el sitio de la instalación.

4.3.3. Parámetros meteorológicos de la instalación solar

Los parámetros meteorológicos de la instalación solar se midieron utilizando dos sensores ambientales: el BME 680 y el GYML 8511 conectados a la tarjeta Arduino Uno WiFi Rev.2, las conexiones se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Conexiones entre los sensores ambientales y la tarjeta Arduino Uno WiFi Rev.2

GYML 8511	Arduino Uno	BME680	Arduino Uno
3V3	3,3	VCC	5V
GND	GND	GND	GND
OUT	A0	SCL	SCL
EN	A1	SDA	SDA
3V3	A1		

Elaboración propia

Las conexiones entre el sensor de radiación solar y la tarjeta microcontroladora se realizan utilizando las entradas analógicas, y el puerto de 3,3 V del Arduino (ver Tabla 8), que es altamente estable. La comunicación entre el sensor ambiental BME680 y el Arduino, se realiza mediante el protocolo I²C; por lo tanto, es necesario conectar los pines de voltaje, GND, SCL y SDA.

Las conexiones entre los sensores ambiental y de radiación solar se muestran en la Figura 33, el sensor de radiación solar se ubicó en una mini *proto-board* dado que requiere estar expuesto a la radiación solar directa, mientras que el sensor ambiental se instaló en una carcasa que permite una buena ventilación, pero no la radiación directa.

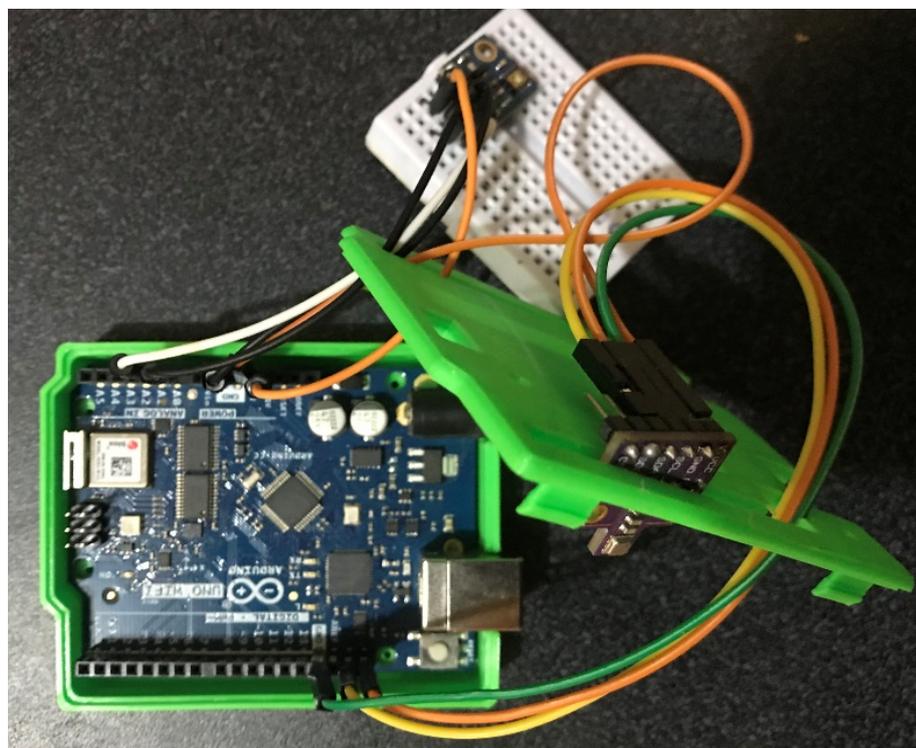


Figura 33. Conexión del sistema de medición ambiental y solar (Elaboración propia)

Como se muestra en la Figura 33, el sensor BME680 es un sensor utilizado para medir la temperatura ambiente, presión barométrica, humedad relativa, y concentración de gases en el sitio de la instalación. EL sensor GYML 8511, es un sensor de radiación solar que permite medir la intensidad UV en mW/cm^2 .

En la Figura 34, se muestra los parámetros meteorológicos medidos en el sitio de la instalación, existe una relación directa entre la temperatura ambiente y la intensidad de radiación solar, así como entre la humedad ambiental y la presión atmosférica.



Figura 34. Parámetros meteorológicos del sitio de instalación. (Elaboración propia)

De acuerdo con la Figura 34, la presión barométrica tiene un promedio de 738 hPa que corresponde a 2593 m.s.n.m, los valores de temperatura bajan en la noche hasta 5 °C (en noches de helada) pero durante el día oscilan entre 20 °C. El medidor de radiación solar envía lecturas máximas de $8 \text{ mW}/\text{cm}^2$ al medio día, pero durante la noche las mediciones son cero debido a que no existe radiación.

4.4. ACTIVACIÓN REMOTA DEL SISTEMA DE FABRICACIÓN ADITIVA

En este apartado se describirá la integración de los elementos del sistema de fabricación aditiva con *plugins*, servidores e inclusive redes sociales, entre los cuales se encuentran *EWELINK*, *Alexa de Amazon*, y *Telegram*.

4.4.1. Integración de *EWELINK* y *Alexa de Amazon*

Para activar la impresora 3D de forma remota, se utilizó el software *Octoprint* e interruptores inteligentes *SONOFF* que controlan un foco, la *Raspberry Pi*, y la impresora 3D respectivamente. El registro de estos interruptores se muestra en la Figura 35.

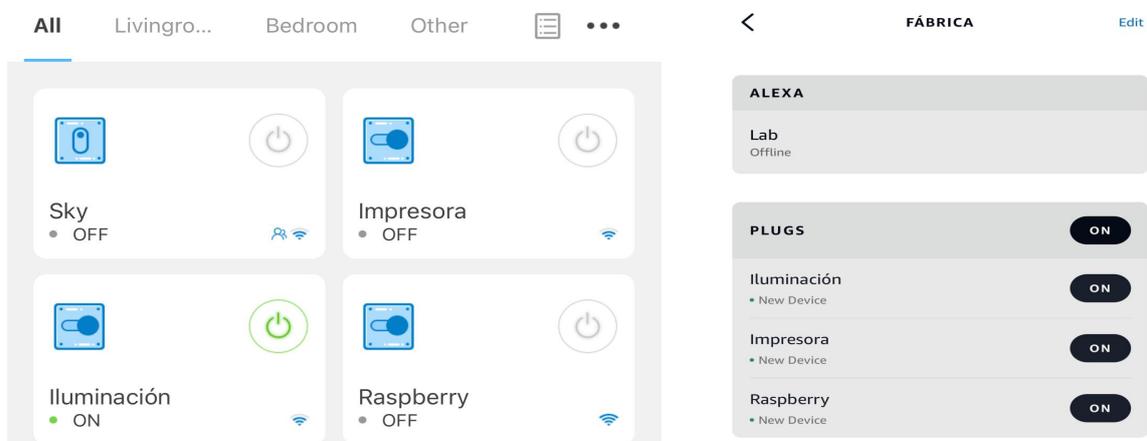


Figura 35. Registro de dispositivos del sistema en *EWELINK* y *Alexa*. (Elaboración propia)

Los dispositivos fueron registrados en la plataforma *EWELINK* e interconectados con la aplicación *Alexa de Amazon* bajo la agrupación “Fábrica” (ver Figura 35). Las aplicaciones permiten encender o apagar los interruptores de forma remota desde un celular, o simplemente con un comando de voz.

4.4.2. Integración de *Octoprint* y *Telegram*

El *plugin* de *Telegram* disponible en *Octoprint* permite manejar el sistema de impresión 3D de forma remota. La configuración se realiza siguiendo las indicaciones de Fabianonline (2019), y los mensajes se reciben en un chat de *Telegram* como se muestra en la Figura 36.

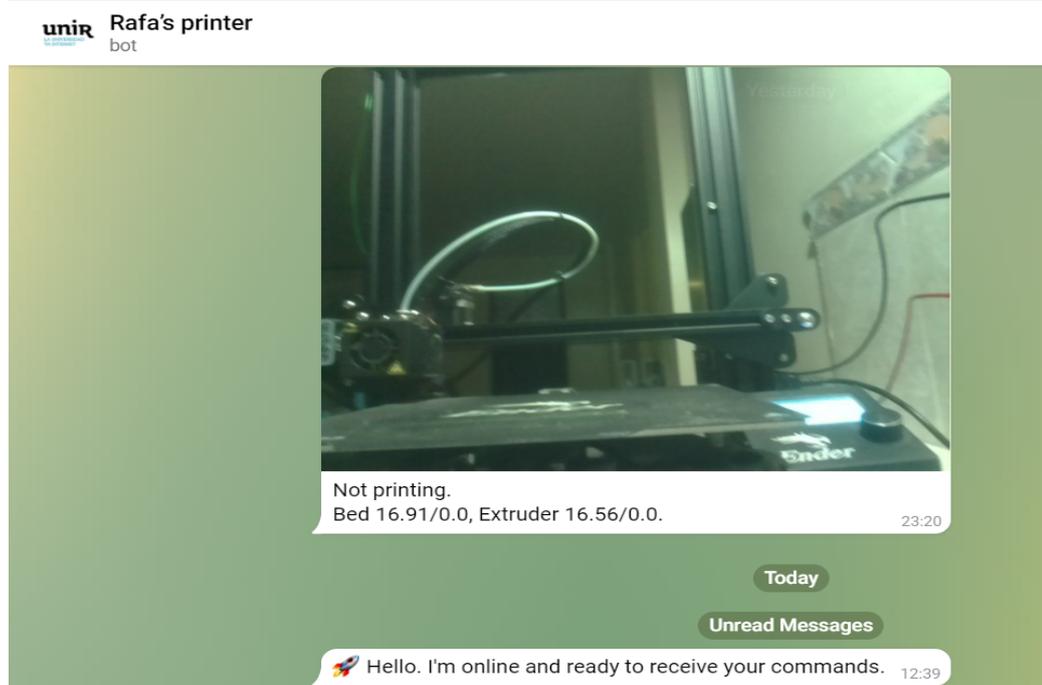


Figura 36. Interfaz de control para el sistema de FA en Telegram. (Elaboración propia)

El idioma de las notificaciones en la conversación con el *bot* denominado *Rafa's printer*, es el inglés (ver Figura 36). Una vez que el trabajo de impresión ha iniciado, se puede elegir pausarlo, cancelarlo, obtener el estado actual junto con una imagen, entre otros.

4.5. PROTOCOLO DE FUNCIONAMIENTO PARA SITUACIONES EN QUE LA ENERGÍA SOLAR ALMACENADA ES MENOR A LA ENERGÍA DE TRABAJO DE LA MÁQUINA.

El controlador de transferencia automático integrado en el inversor solar, activa la energía de la red eléctrica inmediatamente cuando se ha llegado al límite inferior de descarga del banco de baterías que es 24 VDC. Cuando el voltaje en las baterías se recupera, el inversor vuelve a funcionar, y envía la energía proveniente del panel solar hacia el sistema.

Con el fin de ahorrar la energía al máximo en todo momento, el banco de baterías se utiliza únicamente en el momento de la impresión, evitando tener tiempos de espera entre trabajos. Esto se ha logrado mediante la utilización del plugin *OctoPrint-IFTTT*, que permite enviar un desencadenante cada vez que una impresión inicia, termina o falla (Tjffvi, 2020). El flujo de acciones en *IFTTT*, se muestra en la Figura 37.

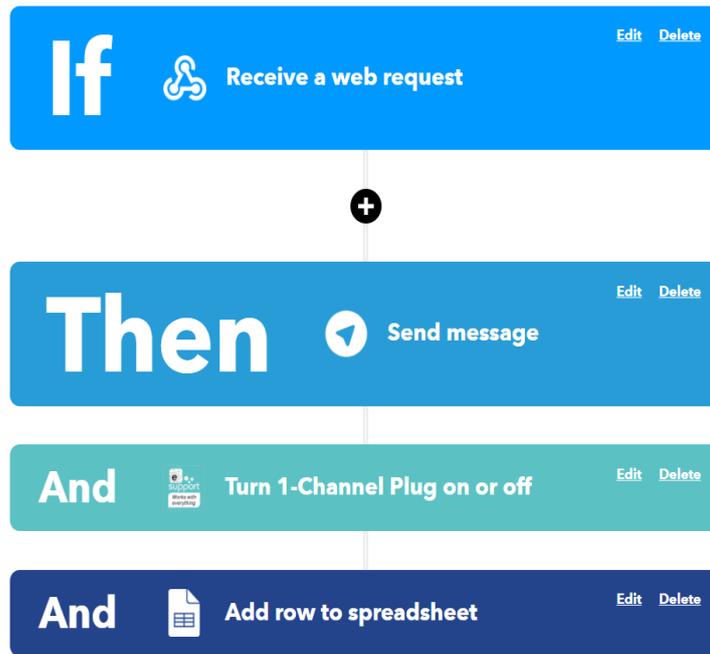


Figura 37. Flujo en IFTTT para el apagado automático del sistema. (Elaboración propia)

Luego de que se recibe la notificación a través de la herramienta *Webhooks*, se desencadena el apagado del sistema de impresión (ver Figura 37), y además se guarda el histórico del nombre del archivo, el tiempo de impresión y el origen en una hoja de Excel de Google Drive.

4.6. RECOMENDACIONES DE CIBERSEGURIDAD PARA EL SISTEMA

La ciberseguridad en todos los sistemas que estén conectados a la internet es de vital importancia, dado que recientemente, incluso grandes empresas de países desarrollados han sido afectadas por ataques de secuestro o denegación de servicios.

En el caso de la instalación descrita en el TFM, existe una única persona que conoce la clave de acceso al *Software OctoPrint* y a los dispositivos *SONOFF*. Incluso si existiese una vulneración de la red WiFi, el enrutador *Eero* de *Amazon* informaría que existe un dispositivo nuevo conectado con la posibilidad de suspender el acceso desde cualquier lugar como se muestra en la Figura 38.

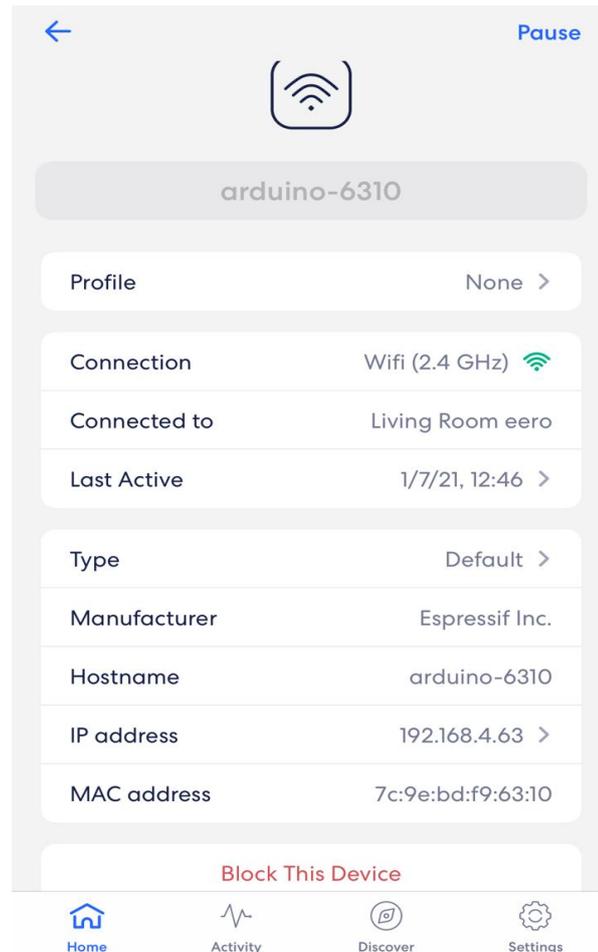


Figura 38. Interfaz de Eero para pausar o bloquear la señal WiFi. (Elaboración propia)

La aplicación del enrutador *Eero* de Amazon (ver Figura 38) permite determinar el tipo de conexión de los dispositivos, su actividad, el fabricante, el nombre con el cual está conectado, la dirección MAC, entre otros. Si se identifica un comportamiento sospechoso por parte de un dispositivo, bloquear su acceso a la red LAN, o pausarlo requiere únicamente pulsar el botón *Block This Device*.

Los accesos externos a la red se realizan siempre por conexiones HTTPS seguras tanto en el caso de *ThingSpeak* como en el caso de *TheSpaghetti Detective*. En el caso extremo de una vulneración, existe siempre un control manual y el sistema puede ser apagado o reiniciado físicamente desde el lugar de la instalación.

Si existiesen desastres naturales que provoquen la suspensión del servicio eléctrico tradicional, la energía principal es la energía fotovoltaica y el servicio de internet no depende de la energía externa, por lo que los trabajos podrían mantenerse.

4.7. RESULTADO DE UNA IMPRESIÓN EN EL SISTEMA 3D DESARROLLADO

En la Figura 39, se muestra el resultado del trabajo de impresión 3D para el cual se presentó los datos en los apartados anteriores, el material utilizado fue PLA de color verde con una duración de 3 h 17 min 30 s.

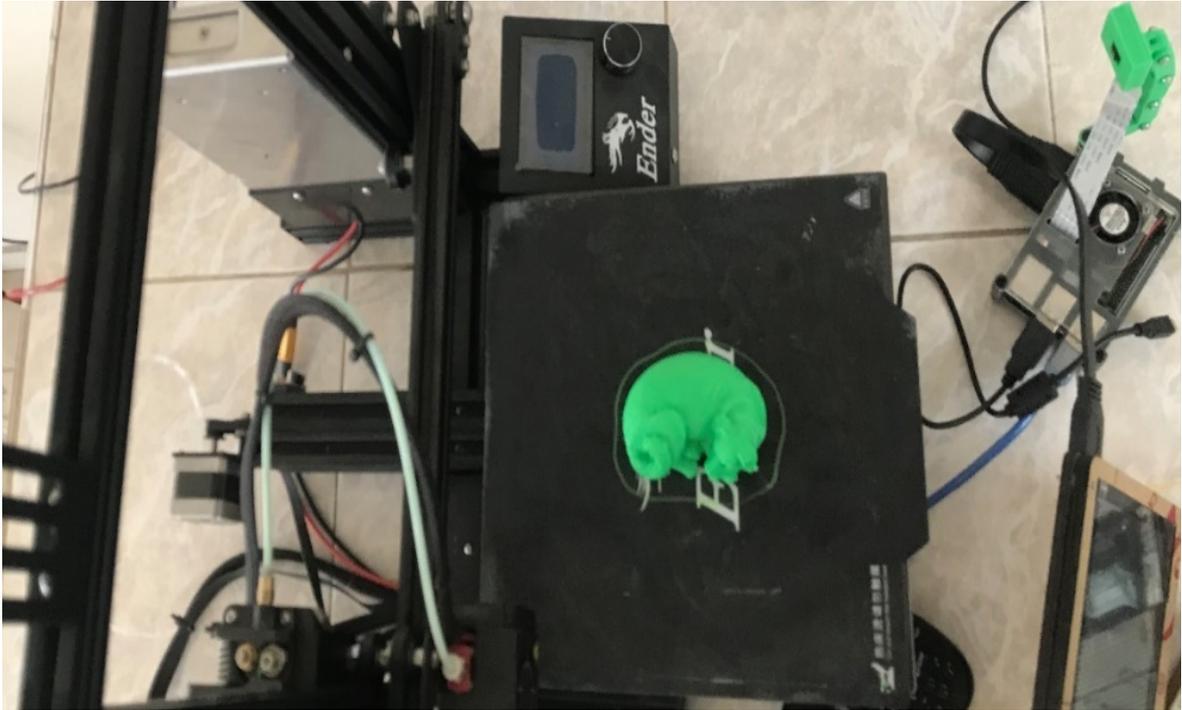


Figura 39. Trabajo de impresión terminado. (Elaboración propia)

Cuando el trabajo terminó, la impresora se apagó automáticamente (ver Figura 39) mediante el interruptor *SONOFF*, dejando al usuario la tarea de remover la pieza terminada de la base de la impresora, y enviar un nuevo trabajo. La notificación de que el trabajo fue exitoso se recibió mediante un correo electrónico desde *TheSpaghettiDetective*, y mediante un mensaje de *Telegram* a través del *bot Rafa's printer*.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado un sistema de FA que es capaz de usar energía solar fotovoltaica con el objeto de disminuir el gasto de energía de red, que hace cara la técnica de FA.

A continuación se muestran las conclusiones alcanzadas durante y tras el desarrollo del TFM:

1. Se ha logrado integrar la fabricación aditiva, internet de las cosas, *big data*, analítica y ciberseguridad que son habilitadores digitales de la industria 4.0, para crear un sistema de FA alimentado por energías renovables.

2. Se puede ejercer un manejo completamente remoto del sistema de FA utilizando plataformas digitales que utilizan protocolos de comunicación seguros (HTTPS). El envío de trabajos de impresión y el control en tiempo real del proceso se realiza utilizando sensores y actuadores que se comunican mediante WiFi.

3. Los parámetros meteorológicos en el sitio de la instalación, la energía solar producida, y la energía consumida por el sistema de FA, se pueden visualizar en la plataforma de internet de las cosas *ThingSpeak*. En el caso del consumo energético, se observó que existen picos de potencia máxima durante la impresión que ascienden a 292 W, mientras que la potencia mínima es de 66,5 W; sin embargo, el promedio de consumo durante el trabajo de impresión con PLA es de 86 W.

4. La arquitectura del sistema permite obtener notificaciones del proceso de fabricación mediante la interfaz de *OctoPrint* o mensajes de *Telegram*. De forma complementaria, la activación del sistema puede llevarse a cabo mediante comandos de voz a través de Alexa de *Amazon*. El sistema funciona de forma automática, y cuando el voltaje en el banco de baterías es menor del umbral de 23,5 V, se utiliza la energía de la red eléctrica tradicional.

En base a los resultados que se han obtenido, también se puede comprobar que han sido alcanzados los objetivos específicos que se plantearon en el presente TFM:

Objetivo específico 1. Integrar dispositivos de manejo remoto, y medición inteligente de la energía en un sistema de FA. Este objetivo se alcanzó dado que se ha logrado manejar una

impresora 3D de forma remota por medio de dispositivos *SONOFF* y medir el consumo de energía con un medidor PZEM-004T.

Objetivo específico 2. Visualizar los datos de energía producida y consumida mediante plataformas de internet de las cosas, que a su vez permitan la predicción de parámetros futuros. Se alcanzó este objetivo toda vez que se ha establecido canales y campos en la plataforma *ThingSpeak* que permiten almacenar los datos de los sensores y visualizar los valores en tiempo real y desde cualquier locación en el mundo. Por otra parte, se han obtenido ecuaciones lineales que permiten calcular la energía consumida en el proceso como una función del tiempo de impresión.

Objetivo específico 3. Establecer una comunicación bidireccional segura entre sistemas de FA. Este objetivo se alcanzó debido a que la comunicación entre los sensores y la plataforma *ThingSpeak* se desarrolla dentro de un canal privado. Por otra parte, todas las comunicaciones con la impresora 3D (a través de *OctoPrint*) se realizan mediante un enrutador que mantiene actualizado el registro de conexiones y permite deshabilitar las conexiones no autorizadas. Finalmente, el acceso remoto a *OctoPrint* está protegido mediante un protocolo HTTPS ofrecido por el *plugin TheSphaghetiDetective*, que a su vez monitorea todo el proceso de impresión y la detiene automáticamente si existen defectos.

Por lo expuesto, se puede concluir que el objetivo principal: “Realizar el diseño de un sistema de FA con fuentes de alimentación de energía renovable”, ha sido alcanzado con el desarrollo del presente TFM.

5.2. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro, se propone la integración de varias fuentes de energía renovable en el mismo sistema tales como energía fotovoltaica, eólica o pilas de combustible de hidrógeno con el fin de incrementar la cantidad de energía aprovechable y escalar el sistema de FA.

Otra línea de trabajo futuro se centra en la minería de las grandes cantidades de datos que se obtienen de los sensores. Si se cuenta con los datos de al menos un año, se podría establecer relaciones entre los niveles de radiación, energía almacenada, energía consumida, etc. en un periodo de tiempo.

Referencias bibliográficas

- Administración de la información energética. (2019). *EIA projects nearly 50% increase in world energy usage by 2050, led by growth in Asia*. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41433#>
- Agencia de Ciberseguridad de la Unión Europea. (2012). *Annex II. Smart Grid Security*. April, 71.
- Ahmed Abdulkadir, A., & Al-Turjman, F. (2021). Smart-grid and solar energy harvesting in the IoT era: An overview. *Concurrency Computation*, 33(4), 1–10. <https://doi.org/10.1002/cpe.4896>
- Ajay, J., Song, C., Rathore, A. S., Zhou, C., & Xu, W. (2017). 3DGates: An instruction-level energy analysis and optimization of 3D printers. *ACM SIGPLAN Notices*, 52(4), 419–433. <https://doi.org/10.1145/3037697.3037752>
- Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899–919. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>
- Alvarez Lozano, D. A. (2017). *Evaluación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimo de una superficie plana para maximizar la captación de irradiación solar en Cuenca-Ecuador*. 7, 74–77.
- Avancini, D. B., Rodrigues, J. J. P. C., Martins, S. G. B., Rabêlo, R. A. L., Al-Muhtadi, J., & Solic, P. (2019). Energy meters evolution in smart grids: A review. *Journal of Cleaner Production*, 217, 702–715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.229>
- Balogun, V. A., Kirkwood, N. D., & Mativenga, P. T. (2014). Direct electrical energy demand in fused deposition modelling. *Procedia CIRP*, 15, 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.029>
- Baumers, M., Tuck, C., Bourell, D. L., Sreenivasan, R., & Hague, R. (2011). Sustainability of additive manufacturing: Measuring the energy consumption of the laser sintering process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(12), 2228–2239. <https://doi.org/10.1177/0954405411406044>
- Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., & Hague, R. (2011). Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter? *22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011, January 2015*, 30–40.

- BEIJING EPSOLAR TECHNOLOGY. (2017). *Manual de usuario EPEVER Series Tracer-AN*.
<https://www.epsolarpv.com/upload/cert/file/1811/Tracer-AN-SMS-EL-V1.0.pdf>
- bp p.l.c. (2021). *Energy consumption grows across all sectors of the economy, although slower than in the past*.
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-sector.html>
- Coward, C. (2019). *The Spaghetti Detective Monitors Your 3D Printer for Failures*.
<https://www.hackster.io/news/the-spaghetti-detective-monitors-your-3d-printer-for-failures-eec0e926fb03>
- Cozzi, L., Gould, T., Bouckart, S., Crow, D., Kim, T.-Y., McGlade, C., Olejarnik, P., Wanner, B., & Wetzel, D. (2020). *World Energy Outlook 2020*. 2050(October), 1–461.
- Culler, M., & Burroughs, H. (2021). Cybersecurity considerations for grid-connected batteries with hardware demonstrations. *Energies*, 14(11), 1–20.
<https://doi.org/10.3390/en14113067>
- Daú, G., Scavarda, A., Scavarda, L. F., & Portugal, V. J. T. (2019). The healthcare sustainable supply chain 4.0: The circular economy transition conceptual framework with the corporate social responsibility mirror. *Sustainability (Switzerland)*, 11(12).
<https://doi.org/10.3390/su11123259>
- Deloitte Insights. (2019). *Tendencias globales de las energías renovables*.
<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/energy-resources/2019/Tendencias-Globales-Energias-Renovables.pdf>
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11(June), 545–554.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
- Elsisi, M., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2021). Reliable industry 4.0 based on machine learning and IOT for analyzing, monitoring, and securing smart meters. *Sensors (Switzerland)*, 21(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/s21020487>
- Energy News Weekly. (2020, February 28). *Energy; Investigators from Federal University Have Reported New Data on Energy (A New Iot- based Smart Energy Meter for Smart Grids)*. 1–3. <http://www.espaciotv.es:2048/referer/secretcode/docview/2363984872?accountid=142712>
- Fabianonline. (2019). *Octoprint-Telegram*. GitHub.
- FlossManuals. (n.d.). *Arduino - Exemples d'usages*. Recuperado el 16 de abril de 2020 desde <https://fr.flossmanuals.net/arduino/exemples-dusages/>
- glitterkitty. (2019). *EpEverSolarMonitor*. <https://github.com/glitterkitty/EpEverSolarMonitor>

- Goehrke, S. (2019). *A Look Ahead in 3D Printing with Gartner's Pete Basiliere*. Fabbaloo. <https://www.fabbaloo.com/blog/2019/1/10/a-look-ahead-in-3d-printing-with-gartners-pete-basiliere>
- Häußge, G. (2020). *Octoprint*. <https://octoprint.org/>
- Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J., & Masanet, E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, *135*, 1559–1570. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.109>
- ISO 52900. (2017). *Fabricación aditiva, principios generales, terminología*.
- Jang-Jaccard, J., & Nepal, S. (2014). A survey of emerging threats in cybersecurity. *Journal of Computer and System Sciences*, *80*(5), 973–993. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2014.02.005>
- Jena, M. C., Mishra, S. K., & Moharana, H. S. (2020). Application of Industry 4.0 to enhance sustainable manufacturing. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, *39*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1002/ep.13360>
- Kabalci, Y. (2016). A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *57*, 302–318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.114>
- Khanna, P. R., Howells, G., & Lazaridis, P. I. (2021). Design and Implementation of Low-Cost Real-Time Energy Logger for Industrial and Home Applications. *Wireless Personal Communications*, *0123456789*. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08350-1>
- Lea, P. (2020). *IoT and Edge Computing for Architects* (Second). Packt.
- Mathworks. (2020). *ThingSpeak Communication Library for Arduino, ESP8266 and ESP32*. <https://github.com/mathworks/thingspeak-arduino>
- Namin, A. (2019). *Assessment of Sustainability Tradeoffs in Renewable Energy Generation and Additive Manufacturing* [Northeastern University]. <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:m044wp68v/fulltext.pdf>
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *31*(1), 127–182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- paulca. (2018). *NodeMCU ESP8266 RS485 EPEver Solar monitor DIY*. <https://www.eevblog.com/forum/projects/nodemcu-esp8266-rs485-epever-solar-monitor-diy/>

- Peng, T., Kellens, K., Tang, R., Chen, C., & Chen, G. (2018). Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing*, 21(April), 694–704. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022>
- PVEDUCATION.COM. (2021). *Battery State of Charge vs Open Circuit Battery Voltage*. <https://pveducation.com/solar-concepts/battery-state-of-charge-vs-open-circuit-battery-voltage/>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *Renewable Energy*. <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- S. Furtado, L., Bazilian, M., & Markuson, C. (2019). Case study of the energy transition: Pueblo, Colorado. *Electricity Journal*, 32(8), 106631. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.106631>
- Srivatchan, N. S., & Rangarajan, P. (2020). A novel low-cost smart energy meter based on IoT for developing countries' micro grids. *Concurrency Computation*, 32(4), 1–10. <https://doi.org/10.1002/cpe.5042>
- Stratasys. (2020). *Locations*. <https://www.stratasysdirect.com/company/locations>
- The Spaghetti Detective. (2021). *Webcam Streaming*. <https://help.thespaghettidetector.com/kb/en/webcam-streaming-49642>
- Tjifvi. (2020). *Octoprint-IFTTT*. GitHub.
- Vicente Martínez, J. J. (2013). *Diseño de sistema de fabricación aditiva y caracterización del proceso de fotocurado de resina mediante tecnología DLP*. Universidad de Zaragoza.
- Yi, L., Glatt, M., Sridhar, P., de Payrebrune, K., Linke, B. S., Ravani, B., & Aurich, J. C. (2020). An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment. *Additive Manufacturing*, 33(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101120>
- Yoon, H. S., Lee, J. Y., Kim, H. S., Kim, M. S., Kim, E. S., Shin, Y. J., Chu, W. S., & Ahn, S. H. (2014). A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 1(3), 261–279. <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0033-0>
- ZHCSOLAR. (2019). *Solar Panel Charge Controller Wiring Diagram & Steps*. <https://zhcsolar.com/solar-panel-charge-controller-wiring-diagram/>

Anexo A. Código de la tarjeta ESP8266 conectado al controlador de carga solar

```
/* Conexiones
```

MAX485	NodeMCU
DI	TX
DE	D2
RE	D1
RO	RX
VCC	3V3 !!!
GND	GND

```
*/
```

```
#include <ModbusMaster.h>
```

```
#include <ESP8266WiFi.h>
```

```
#include "secrets.h" // Este archivo incluye la información de la red WiFi, contraseña, y la clave de Thingspeak para escribir.
```

```
#include "ThingSpeak.h" // siempre debe incluir el archivo de encabezado de thingspeak después de otros archivos de encabezado y macros personalizados.
```

```
char ssid[] = SECRET_SSID; // SSID de su red (nombre).
```

```
char pass[] = SECRET_PASS; // contraseña de su red.
```

```
int keyIndex = 0; // Número de índice de su clave de red (necesario solo para WEP).
```

```
WiFiClient client;
```

```
unsigned long myChannelNumber = SECRET_CH_ID;
```

```
const char * myWriteAPIKey = SECRET_WRITE_APIKEY;
```

```
#define MAX485_DE D2
```

```
#define MAX485_RE D1
```

```
#define PANEL_VOLTS 0x00

#define PANEL_AMPS 0x01

#define PANEL_POWER_L 0x02

#define PANEL_POWER_H 0x03

#define BATT_VOLTS 0x04

#define BATT_AMPS 0x05

#define BATT_POWER_L 0x06

#define BATT_POWER_H 0x07

#define LOAD_VOLTS 0x0C

#define LOAD_AMPS 0x0D

#define LOAD_POWER_L 0x0E

#define LOAD_POWER_H 0x0F

#define HB D4 // Definir el LED integrado en la tarjeta.

// instanciar el objeto ModbusMaster

ModbusMaster node;

// Inicializar nuestros valores

String myStatus = "";

void setup() {

  //WiFi.begin(ssid, password);

  Serial.begin(115200);

  while (!Serial) { ; }

  Serial.println("Estoy vivo! Soy el monitor EpEVER de Rafa");

  pinMode(MAX485_RE, OUTPUT);

  pinMode(MAX485_DE, OUTPUT);

  // Inicializar en modo de recepción
```

```
digitalWrite(MAX485_RE, 0);

digitalWrite(MAX485_DE, 0);

// Modbus at 115200 baud

//mySerial.begin(115200);

// EPEver Device ID 1

node.begin(1, Serial);

// Callbacks

node.preTransmission(preTransmission);

node.postTransmission(postTransmission);

pinMode(HB, OUTPUT); // Inicializar el pin LED_BUILTIN como salida.

WiFi.mode(WIFI_STA);

ThingSpeak.begin(client); // InicializarThingSpeak

}

void loop() {

  uint8_t result;

  // Leer 16 registros de inicio en la dirección 0x3100)

  node.clearResponseBuffer();

  result = node.readInputRegisters(0x3100, 16);

  if (result == node.ku8MBSuccess) {

    float pV = node.getResponseBuffer(PANEL_VOLTS)/100.0f;

    float pI = node.getResponseBuffer(PANEL_AMPS)/100.0f;

    float pP = (node.getResponseBuffer(PANEL_POWER_L) |

                (node.getResponseBuffer(PANEL_POWER_H) << 8))/100.0f;

    float bV = node.getResponseBuffer(BATT_VOLTS)/100.0f;

    float bI = node.getResponseBuffer(BATT_AMPS)/100.0f;
```

```
float bP = (node.getResponseBuffer(BATT_POWER_L) |
           (node.getResponseBuffer(BATT_POWER_H) << 8))/100.0f;

float IV = node.getResponseBuffer(LOAD_VOLTS)/100.0f;

float II = node.getResponseBuffer(LOAD_AMPS)/100.0f;

float IP = (node.getResponseBuffer(LOAD_POWER_L) |
           (node.getResponseBuffer(LOAD_POWER_H) << 8))/100.0f;

Serial.print("VPanel: ");

Serial.println(node.getResponseBuffer(PANEL_VOLTS)/100.0f);

Serial.print("IPanel: ");

Serial.println(node.getResponseBuffer(PANEL_AMPS)/100.0f);

Serial.print("PPanel: ");

Serial.println((node.getResponseBuffer(PANEL_POWER_L) |
               (node.getResponseBuffer(PANEL_POWER_H) << 8))/100.0f);

Serial.println();

Serial.print("VBatt: ");

Serial.println(node.getResponseBuffer(BATT_VOLTS)/100.0f);

Serial.print("IBatt: ");

Serial.println(node.getResponseBuffer(BATT_AMPS)/100.0f);

Serial.print("PBatt: ");

Serial.println((node.getResponseBuffer(BATT_POWER_L) |
               (node.getResponseBuffer(BATT_POWER_H) << 8))/100.0f);

Serial.println();

Serial.print("VLoad: ");

Serial.println(node.getResponseBuffer(LOAD_VOLTS)/100.0f);

Serial.print("ILoad: ");
```

```

Serial.println(node.getResponseBuffer(LOAD_AMPS)/100.0f);

Serial.print("PLoad: ");

Serial.println((node.getResponseBuffer(LOAD_POWER_L) |
                (node.getResponseBuffer(LOAD_POWER_H) << 8))/100.0f);

Serial.println();

Serial.println();

if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){ Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");

Serial.println(SECRET_SSID);

while(WiFi.status() != WL_CONNECTED){

    WiFi.begin(ssid, pass); // Conectar a la red WPA/WPA2.

    Serial.print(".");

    delay(5000); }

Serial.println("\nConnected."); }

// establecer los archivos con los valores.

ThingSpeak.setField(1, pV);

ThingSpeak.setField(2, pI);

ThingSpeak.setField(3, bV);

ThingSpeak.setField(4, bI);

ThingSpeak.setField(4, IP);

// averiguar el mensaje de estado.

if(bV >= 28){

    myStatus = String("bateria cargada");

}

else if(bV < 22){

    myStatus = String("batería descargada"); }

```

```
else{  }

// establecer el estado.

ThingSpeak.setStatus(myStatus);

// escribir al canal ThingSpeak.

int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);

if(x == 200){

    Serial.println("Channel update successful.");

    digitalWrite(HB, HIGH);

    delay(200);

    digitalWrite(HB, LOW);

    delay(200);

}

else { Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " + String(x)); }

} else { Serial.print("Miss read, ret val:");

    Serial.println(result, HEX); }

delay(300000); }

void preTransmission() {

    digitalWrite(MAX485_RE, 1);

    digitalWrite(MAX485_DE, 1); }

void postTransmission() {

    digitalWrite(MAX485_RE, 0);

    digitalWrite(MAX485_DE, 0); }
```

Anexo B. Código del medidor de energía PZEM-004T v3.0

```
#include <WiFi.h>

#include <PZEM004Tv30.h>

#include "secrets.h"

#include "ThingSpeak.h" // siempre debe incluir el archivo de encabezado de thingspeak
después de otros archivos de encabezado y macros personalizados.

char ssid[] = SECRET_SSID; // SSID de su red (nombre).

char pass[] = SECRET_PASS; // contraseña de su red.

int keyIndex = 0; // Número índice de la clave de su red (necesario solo para WEP)

WiFiClient client;

unsigned long myChannelNumber = SECRET_CH_ID;

const char * myWriteAPIKey = SECRET_WRITE_APIKEY;

String myStatus = "";

PZEM004Tv30 pzem(&Serial2);

void setup() {

  Serial.begin(115200); //Inicializar la comunicación serial.

  WiFi.mode(WIFI_STA);

  ThingSpeak.begin(client); // Inicializar ThingSpeak
}

void loop() {

  // Conectar o reconectar al WiFi

  if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){

    Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");

    Serial.println(SECRET_SSID);

    while(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
```

WiFi.begin(ssid, pass); // Conectar a la red WPA/WPA2. Cambiar esta línea si usa red abierta o WEP.

```
Serial.print(".");  
  
delay(5000);  }  
  
Serial.println("\nConnected."); }  
  
// establecer los campos con los valores.  
  
float voltage = pzem.voltage();  
  
if(!isnan(voltage)){  
    Serial.print("Voltage: "); Serial.print(voltage); Serial.println("V");  
    ThingSpeak.setField(2, voltage);  
} else {  
    Serial.println("Error reading voltage");  
    ThingSpeak.setField(2, 0); }  
  
float current = pzem.current();  
  
if(!isnan(current)){  
    Serial.print("Current: "); Serial.print(current); Serial.println("A");  
    ThingSpeak.setField(1, current);  
} else {  
    Serial.println("Error reading current");  
    ThingSpeak.setField(1, 0);  
    myStatus = String("The factory is off");  
    ThingSpeak.setStatus(myStatus);  }  
  
float power = pzem.power();  
  
if(!isnan(power)){  
    Serial.print("Power: "); Serial.print(power); Serial.println("W");
```

```

    ThingSpeak.setField(3, power);

} else {

    Serial.println("Error reading power");

    ThingSpeak.setField(3, 0);  }

float energy = pzem.energy();

if(!isnan(energy)){

    Serial.print("Energy: "); Serial.print(energy,3); Serial.println("kWh");

    ThingSpeak.setField(4, energy); } else {

    Serial.println("Error reading energy");

    ThingSpeak.setField(4, energy);  }

float frequency = pzem.frequency();

if(!isnan(frequency)){

    Serial.print("Frequency: "); Serial.print(frequency, 1); Serial.println("Hz");

} else { Serial.println("Error reading frequency");  }

float pf = pzem.pf();

if(!isnan(pf)){

    Serial.print("PF: "); Serial.println(pf);

} else { Serial.println("Error reading power factor"); }

Serial.println();

// escribir al canal ThingSpeak.

int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);

if(x == 200){

    Serial.println("Channel update successful.");  }

else{ Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " + String(x));  }

delay(30000); // Esperar 30 segundos para actualizar nuevamente el canal. }

```

Anexo C. Código del medidor de parámetros meteorológicos

```
#include <WiFiNINA.h>

#include <utility/wifi_drv.h>

#include "secrets.h"

#include "ThingSpeak.h" // siempre debe incluir el archivo de encabezado de thingspeak
después de otros archivos de encabezado y macros personalizados.

#include <Wire.h>

#include <SPI.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>

#include "Adafruit_BME680.h"

char ssid[] = SECRET_SSID; // SSID de su red (nombre)

char pass[] = SECRET_PASS; // su contraseña de red.

int keyIndex = 0; // Número de índice de su clave de red (necesario solo para WEP)

WiFiClient client;

unsigned long myChannelNumber = SECRET_CH_ID;

const char * myWriteAPIKey = SECRET_WRITE_APIKEY;

// Timer variables

unsigned long lastTime = 0;

unsigned long timerDelay = 300000; // enviar el temporizador de las lecturas.

// Inicializar nuestros valores del sensor solar.

int UVOUT = A0; //Salida del sensor

int REF_3V3 = A1; //terminal de 3.3V en la tarjeta Arduino.

int uvIntensity;

int outputVoltage;

int uvLevel;
```

```
int refLevel;

#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)

Adafruit_BME680 bme; // para la comunicación I2C conecte el Arduino Uno WiFi Rev.2 a
SDA y SCL.

float temperatureC;

float humidity;

float pressure;

float gasResistance;

String myStatus = "";

void setup() {

  Serial.begin(9600); // Inicializar el serial

  WiFiDrv::pinMode(25, OUTPUT); //ROJO – encender si hay un problema enviando la
información.

  WiFiDrv::pinMode(26, OUTPUT); //VERDE – encender si todo se envía correctamente.

  WiFiDrv::pinMode(27, OUTPUT); //AZUL – encender cuando la tarjeta se conecte al WiFi.

  if (!bme.begin()) {

    Serial.println(F("Could not find a valid BME680 sensor, check wiring!"));

    while (1); }

  ThingSpeak.begin(client); // Inicializar ThingSpeak

  // comprobar el módulo WiFi:

  if (WiFi.status() == WL_NO_MODULE) {

    Serial.println("Communication with WiFi module failed!");

    // no continuar

    while (true); }
```

```
// Código del sensor de radiación solar GYML 8511.

pinMode(UVOUT, INPUT);

pinMode(REF_3V3, INPUT);

// Configurar el sobremuestreo y la inicialización del filtro.

bme.setTemperatureOversampling(BME680_OS_8X);

bme.setHumidityOversampling(BME680_OS_2X);

bme.setPressureOversampling(BME680_OS_4X);

bme.setIIRFilterSize(BME680_FILTER_SIZE_3);

bme.setGasHeater(320, 150); // 320*C for 150 ms

}

void getBME680Readings(){

// Dígame al BME680 que comience la medición.

unsigned long endTime = bme.beginReading();

if (endTime == 0) {

    Serial.println(F("Failed to begin reading :("));

    return; }

if (!bme.endReading()) {

    Serial.println(F("Failed to complete reading :("));

    return; }

temperatureC = bme.temperature;

pressure = bme.pressure / 100.0;

humidity = bme.humidity;

gasResistance = bme.gas_resistance / 1000.0; }

void loop() {

if ((millis() - lastTime) > timerDelay) {
```

```

// Conectar o reconectar al WiFi

if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){

Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");

Serial.println(SECRET_SSID);

while(WiFi.status() != WL_CONNECTED){

    WiFi.begin(ssid, pass); // Conectar a la red WPA/WPA2. Cambiar esta línea si usa red
abierta o WEP.

    Serial.print(".");

    WiFiDrv::digitalWrite(25, LOW); // para brillo cero.

    WiFiDrv::digitalWrite(26, LOW); // para brillo cero.

    WiFiDrv::digitalWrite(27, LOW); // para brillo cero.

    delay(500);

    WiFiDrv::digitalWrite(25, HIGH); // para brillo total.

    delay(500);

    WiFiDrv::digitalWrite(25, LOW); // para brillo cero.

    delay(500);

    WiFiDrv::digitalWrite(25, HIGH); // para brillo total

    delay(500);

    WiFiDrv::digitalWrite(25, LOW); // para brillo cero.

    delay(500); }

    Serial.println("\nConnected");

    WiFiDrv::analogWrite(27, 128); } // para brillo medio.

getBME680Readings();

Serial.print("Temperature = ");

Serial.print(temperatureC);

```

```
Serial.println(" °C");

Serial.print("Pressure = ");
Serial.print(pressure);
Serial.println(" hPa");
Serial.print("Humidity = ");
Serial.print(humidity);
Serial.println(" %");
Serial.print("Gas = ");
Serial.print(gasResistance);
Serial.println(" KOhms");
Serial.print("Approx. Altitude = ");
Serial.print(bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA));
Serial.println(" m");
Serial.println("ML8511 example");

  uvLevel = averageAnalogRead(UVOUT);
  refLevel = averageAnalogRead(REF_3V3);

  // Utilice el pin de alimentación de 3,3 V como referencia para obtener un valor de salida
  muy preciso del sensor.

  outputVoltage = 3.3 / refLevel * uvLevel;

  uvIntensity = mapfloat(outputVoltage, 1.0, 2.8, 0.0, 15.0); //Convertir el voltaje a un nivel
  de radiación UV.

Serial.print("output: ");
Serial.print(refLevel);
Serial.print("ML8511 output: ");
```

```
Serial.print(uvLevel);

Serial.print(" / ML8511 voltage: ");

Serial.print(outputVoltage);

Serial.print(" / UV Intensity (mW/cm^2): ");

Serial.print(uvIntensity);

Serial.println();

// establecer los campos con los valores en ThingSpeak.

ThingSpeak.setField(1, temperatureC);

ThingSpeak.setField(2, pressure);

ThingSpeak.setField(3, humidity);

ThingSpeak.setField(4, gasResistance);

ThingSpeak.setField(5, uvIntensity);

if(uvIntensity < 5 ){

    myStatus = String("la radiación UV es baja"); }

else if (uvIntensity < 8) {

    myStatus = String("la radiación UV es moderada"); }

else { myStatus = String("la radiación UV es muy alta"); }

// establecer el estado.

ThingSpeak.setStatus(myStatus);

// escribir al canal ThingSpeak.

int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);

if(x == 200){

    WiFiDrv::analogWrite(27, 0); // para brillo cero.

    WiFiDrv::digitalWrite(26, HIGH); // para brillo total.

    delay(1000);
```

```

WiFiDrv::digitalWrite(26, LOW); // para brillo cero.

WiFiDrv::analogWrite(27, 128); // para brillo medio.

Serial.println("Channel update successful."); }

else{

Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " + String(x));

WiFiDrv::analogWrite(27, 0); // para brillo cero.

WiFiDrv::digitalWrite(25, HIGH); // para brillo total.

delay(1000);

WiFiDrv::digitalWrite(25, LOW); // para brillo total.

WiFiDrv::analogWrite(27, 128); } // para brillo total.

lastTime = millis(); }

}

// Función para tomar un promedio de lecturas en un pin dado

int averageAnalogRead(int pinToRead)

{ byte numberOfReadings = 8;

unsigned int runningValue = 0;

for(int x = 0 ; x < numberOfReadings ; x++)

runningValue += analogRead(pinToRead);

runningValue /= numberOfReadings;

return(runningValue); }

// La función Arduino Map pero para flotadores

//From: http://forum.arduino.cc/index.php?topic=3922.0

float mapfloat(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max)

{ return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min; }

```

Anexo D. Archivo *secrets* con los datos de conexión WiFi

// Utilice este archivo para almacenar todas las credenciales privadas.

// y detalles de conexión.

```
#define SECRET_SSID "EXXX" // reemplazar con el nombre de su red WiFi.
```

```
#define SECRET_PASS "RAFAEL6342corXXXX" // reemplazar con la contraseña de su WiFi.
```

```
#define SECRET_CH_ID 0000000 // reemplazar 0000000 con su número de canal
```

```
#define SECRET_WRITE_APIKEY "4N8AS8MVXL" // reemplazar con su clave de API de escritura de canal.
```