

LI3D: LABORATORIO REMOTO DE IMPRESIÓN 3D

Joaquín Cubillo¹, Sergio Martín² y Manuel Castro²

¹UNED. Montelatorre 11, 09400, Aranda de Duero, Burgos (Spain). Tfno: +34 670 716844. jcubilloarr@educa.jcyl.es.

²UNED. Juan del Rosal 12, 28040, Madrid (Spain). Tfno. +34 913 987623.

Recibido: 20/ene/2016 - Aceptado: 26/abr/2016 - DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7941>

1. INTRODUCCIÓN

La posibilidad de plasmar, realizar y construir objetos tridimensionales de una forma sencilla y abierta al público en general, ha convertido la impresión 3D, en una tecnología que ha experimentado una gran evolución y expectación en los últimos años [1,2,3,4,5], y a pesar de que aún no está presente en todos los ámbitos [6], ese día se acerca rápidamente. Sin embargo, la Fabricación Aditiva (FA) [7, 8], no resulta sencilla para un usuario medio que no esté familiarizado con la tecnología, ya que el software y hardware necesario para la impresión 3D, así como la configuración del mismo depende en gran medida del fabricante o del modelo de impresora escogido.

El presente artículo tiene como objeto, favorecer la creación de futuros proyectos de impresión 3D, sirviendo de guía para la configuración y funcionamiento de un laboratorio de impresión 3D autónomo, remoto y open source (LI3D), de forma que cualquier usuario pueda hacer uso de esta tecnología, desde cualquier ubicación obteniendo el control de la misma y el monitorizado del trabajo que está llevando a cabo.

El hecho de crear un laboratorio remoto [9], proporciona una serie de ventajas frente a los sistemas in-situ [10, 11, 12, 13]:

- La impresora 3D puede estar ubicada lejos del área de trabajo del operador, lo que reduce los ruidos y olores generados por todas las impresoras 3D.
- Reducir el cableado y centralizarlo en un único equipo, ofrece un mantenimiento más sencillo y una configuración más cuidada.
- La impresora 3D puede ser controlada y monitorizada con un dispositivo móvil, esto permite que prácticamente cualquier usuario pueda hacer uso de ella.
- Compartir una impresora 3D resulta sencillo. El proceso estará guiado por un servidor web de impresión.
- La impresora 3D puede ser controlada desde cualquier parte del mundo en internet.
- Se mejoran los tiempos de uso de la impresión 3D, ya que no está condicionada a horarios, es posible imprimir en cualquier momento y desde cualquier lugar.
- Facilidad en el manejo por cualquier tipo de usuario, el usuario es capaz de imprimir sin necesidad de establecer nuevos parámetros de configuración de impresión.

El sistema LI3D no consiste únicamente en un servicio de impresión remoto, sino que es el usuario el que gestiona de forma remota y autónoma la impresión 3D, frente a otros sistemas [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] en los que, el usuario deposita en la nube su fichero de impresión y obtiene el resultado, sin control del proceso de impresión. En este caso el LI3D ofrece a los usuarios un control total de estos equipos de forma remota, equipos que por diversas circunstancias (complejidad en ajustes, coste, espacio...etc.), no están aún al alcance de todos los usuarios, otorgando a éstos, la posibilidad de emplearlos como si fuesen propios.

2. HERRAMIENTAS Y MÉTODOS

2.1. HARDWARE

2.1.1. Servidor de impresión remoto

El laboratorio remoto debe ser controlado por un equipo que ejecutará el software necesario para la impresión, control y monitorizado. En este caso, se ha empleado un dispositivo de bajo coste, que incorpora los elementos necesarios para dotar al sistema de la funcionalidad y versatilidad que se han especificado con anterioridad [21]. Este dispositivo debe ser lo suficientemente potente para ejecutar todas las funciones necesarias. Existen multitud de alternativas para la elección de este dispositivo, de bajo coste como son:

Raspberry© Pi 2, HummingBoard©, Banana© Pi, BeagleBone© Black, Odroid© U3, PINE© A64...etc. Sin embargo, Raspberry© Pi ha destacado sobre el resto, permitiendo ofrecer además de una calidad/precio excelente, muchas más posibilidades debido a la gran comunidad de usuarios que dan soporte, publican guías de uso e instalación. Atendiendo a estas premisas, Raspberry© PI 2, ha sido el mini-pc escogido como servidor para LI3D.

2.1.2. Impresora 3D

En la actualidad existen diversas tecnologías de impresión 3D, algunas de las más empleadas son: la impresión 3D por estereolitografía (SLA), que basa su funcionamiento en aplicar un haz de luz ultravioleta a una resina líquida sensible a la luz, la impresión basada en la Sinterización Selectiva por Láser (SLS) [22], en este caso, se hace uso de un láser, para solidificar un polvo de plástico, o la impresión basada en la deposición de material plástico, Fusion Deposition Modeling (FDM), inventada y patentada a finales de los años 80 por Scott Crump [23]. A partir de ella nació la tecnología Fused Filament Fabrication (FFF), ésta es la que emplean la gran mayoría de las impresoras 3D personales [24]. Para las pruebas del laboratorio LI3D se han empleado impresoras RepRaps [24], concretamente la Prusa Mendel© i3, y una evolución de la misma, la Prusa i3 Hephestos©. Ambas disponen de una extensa comunidad de usuarios lo que facilita en gran medida la resolución de posibles problemas, así como actualizaciones constantes del software y hardware de control.

A parte de estos dos elementos hardware fundamentales, servidor e impresoras, es necesario otro tipo de equipamiento: (1) router que de acceso a internet a la impresora y que permita el acceso a la misma desde internet, (2) cámara web que facilite el visionado en tiempo real de lo que se está imprimiendo, (3) tarjeta de relés que facilite el conexionado y desconexión automática de la impresora 3D.

2.2. SOFTWARE

El sistema LI3D debe constar tanto de un servidor de impresión, como de un servidor de video streaming que proporcione imágenes en tiempo real de la impresión y del estado del sistema. El sistema se basa en hardware open source o free, por lo que se ha optado por buscar servidores de impresión remota, también open source o free, compatibles con este tipo de hardware. En este ámbito, los más destacados son: PrintToPeer®, PrinterOS®, OctoPrint® y AstroPrint®. La opción escogida es OctoPrint®, el cual proporciona una interfaz web que permite controlar la impresora de forma remota desde cualquier lugar, además de ofrecer las mismas opciones de respuesta y retroalimentación disponibles en las aplicaciones host nativas del software de impresión 3D.

Permite la visualización del sistema en tiempo real, la interacción con el sistema a través de dispositivos móviles, y dispone de un elevado número de opciones de configuración. Admite, la instalación de plugins adicionales, así como una configuración manual de los distintos servicios. Esto facilita la adaptación del sistema, para cubrir los requisitos especificados en este artículo. OctoPrint®, junto con el hardware necesario, constituye la base de un laboratorio remoto de impresión de bajo coste, contando con un servidor remoto de impresión y control, así como de un servidor de monitorización a través de video streaming en tiempo real, todo ello, soportado por el mini-PC Raspberry® PI 2.

3. EL SISTEMA LI3D. LABORATORIO REMOTO DE IMPRESIÓN 3D

3.1. FUNCIONALIDADES DEL SISTEMA LI3D

LI3D es un servidor remoto de impresión y de monitorizado, que actúa directamente sobre las impresoras 3D. Se trata de utilizar las impresoras en un entorno controlado, favoreciendo el aprendizaje y manejo de esta tecnología, eliminando el temor de los usuarios a causar averías o provocar posibles fallos. Para llevar a cabo este control y monitorizado, el sistema cuenta con:

- Control de usuarios. Existen tres tipos de usuarios: (1) usuarios invitados, aquellos que únicamente observan lo que se está realizando en el laboratorio, (2) usuarios registrados, capaces de realizar un control de los distintos elementos de la impresora, así como la gestión de los trabajos de impresión, (3) usuario administrador, dispone del control total del sistema, capaz de encender y apagar el servidor de impresión, así como las impresoras asociadas al sistema, también podrá dar de alta a nuevos usuarios o eliminar los ya existentes. Corresponde a este usuario la gestión y el mantenimiento del sistema.
- Gestión de ficheros de impresión. Conversión de archivos STL (Standard Tessellation Language, [25]) al formato GCODE de impresión RS-274 (lenguaje de programación de control numérico (NC). El proceso consiste en tomar el archivo STL genérico de objetos 3D y adaptarlo a la configuración y preferencias de cada impresora 3D.
- Control remoto del sistema de impresión. El sistema debe ser accesible desde cualquier ubicación, tanto interna como externa (Internet), por lo tanto, deberán habilitarse los mecanismos que proporcionen un acceso fiable y seguro.
- Monitorización en tiempo real. Debe obtener datos sobre los factores determinantes a la hora de realizar la impresión 3D, como son la temperatura de la punta caliente (hot end), estadísticas de uso de la impresora, tiempos de utilización, consumos...etc. Además, debe soportar la posibilidad de observar aquello que se está imprimiendo, y esto deberá poder realizarse en tiempo real.
- Conexión y Desconexión automática de la/s impresora/s 3D. Como medida de seguridad, el sistema deberá poder conectarse y desconectarse remotamente, esta gestión corresponderá al administrador del sistema.
- Escalabilidad. El sistema debe ofrecer la posibilidad de conexión de múltiples impresoras y la monitorización de cada una de ellas.

3.2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA LI3D

En la figura 1 se muestra el esquema hardware del laboratorio. Como se puede observar se conectan las impresoras 3D a la Raspberry Pi por un lado a través de los puertos USB y por otro a través de relés que permiten el control automático de la alimentación de la impresora. Al mismo tiempo también se conecta una cámara a la Raspberry a través del conector CSI para permitir así monitorización remota.

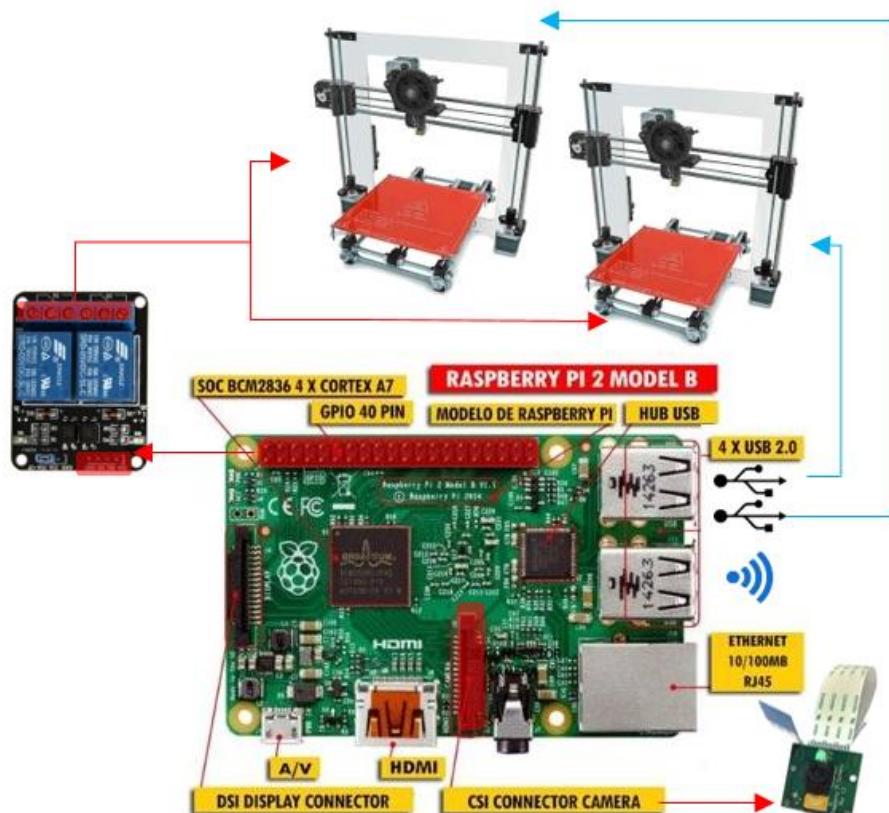


Fig. 1. Esquema Hardware del laboratorio remoto de impresión 3D. Imagen generada a partir de www.raspberryshop.es

En la figura 2, se muestra el esquema de funcionamiento del laboratorio LI3D. Básicamente lo primero que tiene que hacer el usuario es realizar el login contra el servidor. Una vez identificado según los permisos de los que disponga podrá acceder a una serie de funcionalidades u otras.

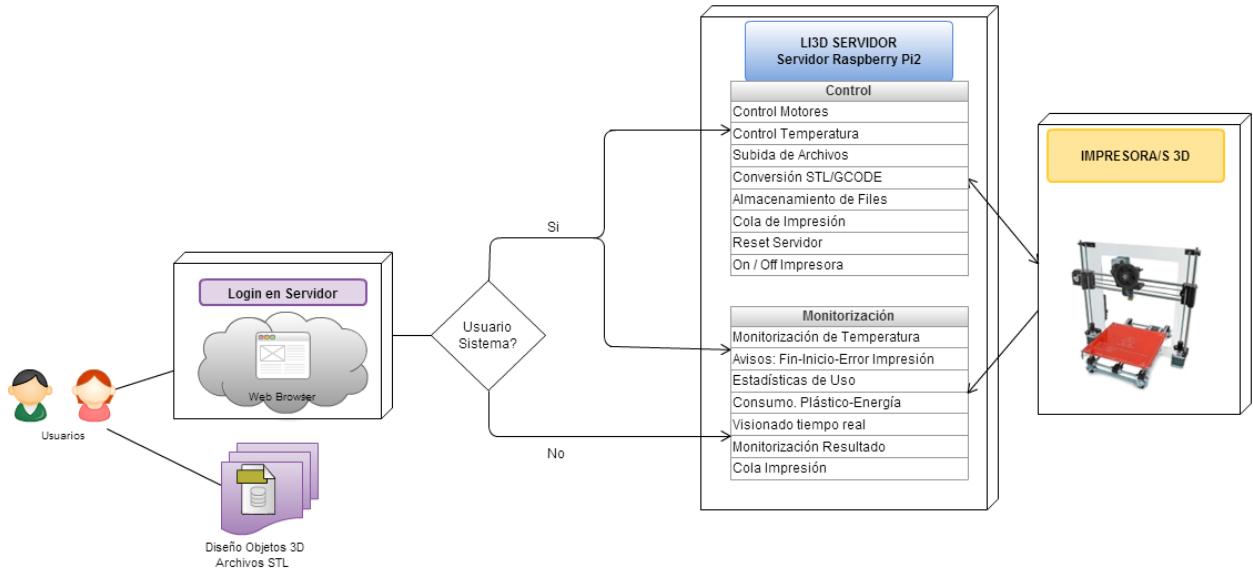


Fig. 2. Esquema abstracto del funcionamiento de LI3D

3.3. COMPONENTES HARDWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA LI3D

La figura 3, presenta la ventana principal del servidor, a través de la cual se realizan y llevan a cabo las distintas opciones de impresión.

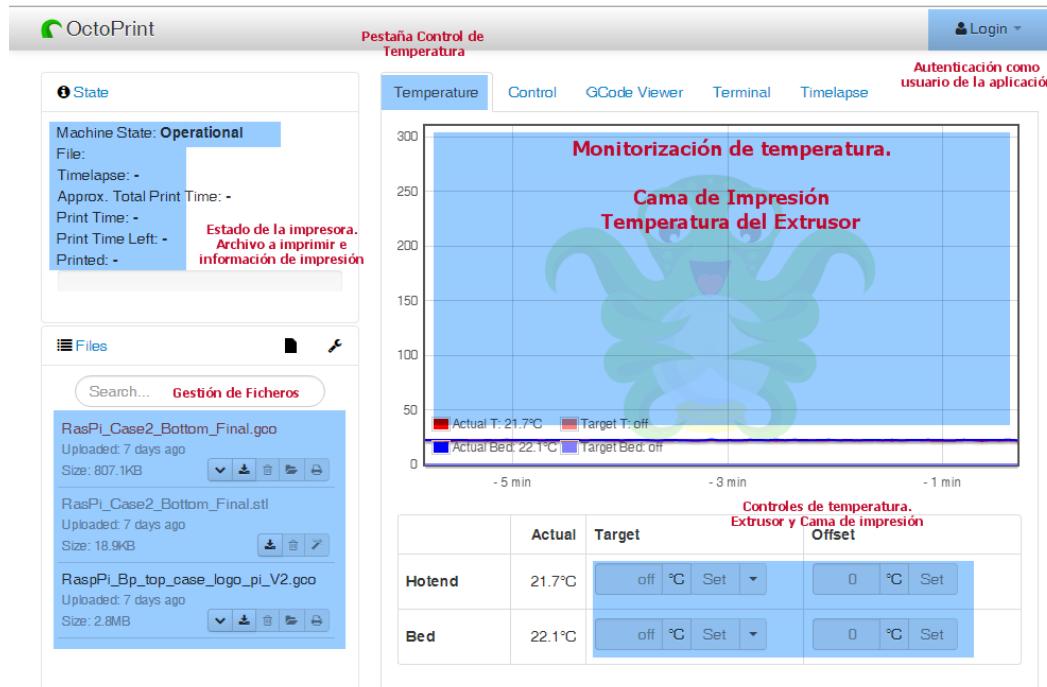


Fig. 3. Pantalla de inicio del sistema OctoPrint©

El *software* base OctoPrint©, proporciona una serie de características fundamentales para el control y monitorizado, sin embargo, es necesario dotar al sistema de características adicionales que proporcionen una mayor información sobre el proceso de impresión. Para dotar al sistema de las propiedades del LI3D planteadas, se llevan a cabo una serie de modificaciones consistentes en:

1. Conversión GCODE. Los parámetros para convertir el archivo STL, al formato GCODE propio de cada impresora, se realiza a través de la configuración de un plugin adicional [26] instalado sobre el software base. Este *plugin* establece los parámetros adecuados para cada impresora temperatura, dimensiones, velocidad de impresión...etc. Esta opción facilita el trabajo a aquellas personas que no disponen de conocimientos de impresión 3D.
2. Monitorización. Este apartado está subdividido en:
 - (a) Video *Streaming*. En la configuración del sistema es necesario habilitar esta opción para disponer del visionado en tiempo real de lo que está sucediendo en la impresora 3D.
 - (b) Estadísticas e Historial de impresión. Se instalan dos plugins adicionales al software base, estos son: OctoPrint-Stats© y Plugin OctoPrint-PrintHistory© respectivamente. El primero de ellos ofrece información sobre las estadísticas de uso de las impresoras 3D, indicando tiempo de conexión, impresiones completas, impresiones erróneas...etc. El segundo de ellos permite al administrador del laboratorio conocer cuáles son los archivos que se han impreso, el tiempo empleado, así como la cantidad de filamento utilizado. Además, ofrece información relativa al consumo energético que ha sido necesario para llevar a cabo dichas impresiones, siendo útil esta información para llevar a cabo una posible fabricación sostenible [27]. Esta información es de especial relevancia para realizar un mantenimiento adecuado del laboratorio, estableciendo los tiempos necesarios para reemplazar materiales o ajustar los distintos elementos de impresión como motores, correas, finales de carrera...etc.
 - (c) Notificaciones. El proceso de impresión por deposición de filamento es un proceso lento que conlleva un tiempo considerable (horas) para la impresión de objetos grandes o complejos. La posibilidad de que un usuario disponga de un mecanismo de notificación, que indique cuándo ha finalizado un trabajo de impresión y por lo tanto cuándo la impresora vuelve a estar disponible, conlleva un ahorro en tiempo y un aumento de la utilización del sistema. LI3D, proporciona un aviso al usuario a través de su dispositivo móvil indicando distintos eventos del servidor, como, por ejemplo, la subida de un nuevo archivo de impresión (útil para trabajos colaborativos), la finalización de un trabajo de impresión, la cancelación o error en el proceso de impresión...etc. Estas notificaciones están disponibles para los usuarios mediante la instalación en sus dispositivos móviles, de la aplicación gratuita PushBullet© de Android.
3. Encendido y apagado automático de la impresora 3D. Es imprescindible poder desconectar la impresora de la alimentación eléctrica en cualquier momento, esto previene problemas mayores en caso de un fallo en la impresión, o en cualquier otro componente de la impresora. Este control se obtiene mediante:
 - (a) *Hardware*. Raspberry© cuenta con un bus GPIO (General Purpose Input/Output) que proporciona la posibilidad de controlar distintos componentes electrónicos a través de la programación. Para el control automático de la alimentación de la impresora, se ha utilizado una tarjeta de relés alimentada y conectada a las salidas de control de la Raspberry© (figura 4). La impresora conectada a la fuente de alimentación, recibirá tensión sólo cuando el relé correspondiente esté activo.

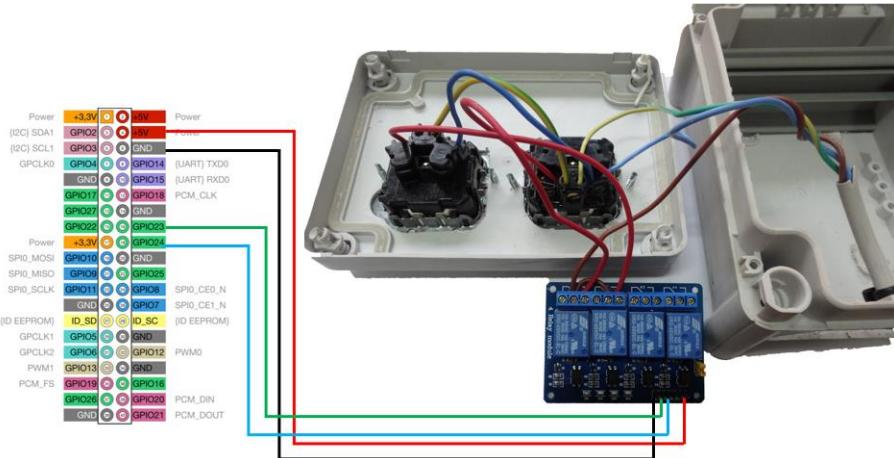


Figura 4 Esquema de conexión del puerto GPIO de Raspberry® con la tarjeta de Relés para el control de la alimentación de la impresora

- (b) *Software.* Una vez programados los distintos pines del mini-ordenador, es necesario añadir dos controles adicionales al sistema que permitan el encendido y el apagado de la impresora 3D, al usuario. Para realizar esta función, se realiza la modificación del software base, creando y programando dichos controles.
4. Conexión de múltiples impresoras al sistema y monitorización de cada una de ellas. Poder controlar más de una impresora 3D, aumenta el uso de los recursos y por lo tanto la utilización del laboratorio. Para llevar a cabo este punto no se emplean elementos hardware adicionales, ya que el sistema ha sido diseñado para poder controlar varias impresoras, mediante una única Raspberry® Pi 2. El software que efectúa las operaciones de servidor de impresión, permite crear varias instancias de él mismo, por lo que resulta posible disponer de servidores de impresión autónomos controlados por un único equipo.

4. EXPERIMENTACIÓN

4.1. CONDICIÓN DE PARTIDA

La experimentación se ha realizado en un Centro Integrado de Formación Profesional, siendo el perfil de los usuarios del sistema, estudiantes de grado superior del Ciclo de Mantenimiento Electrónico, quienes compaginan estudios con trabajo. El LI3D se ha empleado en un contexto educativo, donde lo primordial es la comprensión del trabajo realizado y el prototipado rápido de objetos tridimensionales que sirvan de apoyo al desarrollo de proyectos en otras disciplinas.

El LI3D surge tras comprobar que el tiempo de impresión de los objetos es elevado, resultando el horario de mañana de los alumnos, insuficiente, para imprimir las piezas necesarias para su proyecto: la construcción de un mini-brazo robótico UARM, el cual consta de 36 piezas, con una media de 1 hora de impresión por pieza., y cumplir con los plazos estimados para las evaluaciones. El LI3D posibilita a los alumnos, aprovechar las horas de tarde para realizar sus impresiones, sin tener que desplazarse de nuevo hasta el Centro.

La experiencia se ha realizado con 2 impresoras 3D, en un primer momento la impresora Prusa i3 Mendel®, y posteriormente se añadió la Prusa i3 Hephestos®, ambas son impresoras en formato kit, ensambladas por los alumnos (figura 5).



Fig. 5. Montaje de los kits de impresión realizado por los alumnos del CIFP de Aranda de Duero

4.2. EXPERIMENTACIÓN

Los alumnos proceden al montaje de las impresoras 3D bajo la supervisión de los tutores. En este momento surgen distintas dificultades que han de superar por sí mismos, entre ellas destacan, el ajuste de las piezas del extrusor, la modificación de la posición de los interruptores de final de carrera, además de los problemas electrónicos que pudieran detectarse. Con la puesta en marcha de la impresora es el momento de configurar el laboratorio LI3D.

Para el monitorizado se dispone del control de la temperatura de impresión (cama caliente y hot end), y la visualización de la pieza impresa a través de la cámara web. Esta monitorización es suficiente para este contexto ya que las piezas a imprimir, son piezas sencillas en las que no existen detalles significativos de impresión a tener en cuenta (figura 6), como puede ocurrir con figuras de arte, bustos...etc.

Debido a que el espacio de la cama de impresión es limitado, es necesario optimizar este tamaño, y para ello, se ha realizado una distribución de dicho espacio.



Fig. 6. Piezas impresas en 3D y montaje del brazo robótico UARM

Esta distribución permite obtener un mayor rendimiento de la impresora 3D, ya que el hecho de que una pieza esté impresa sobre la cama no impide la impresión de una nueva pieza por otro usuario. Para ello se realiza la división de la cama de impresión por filas (figura 7).

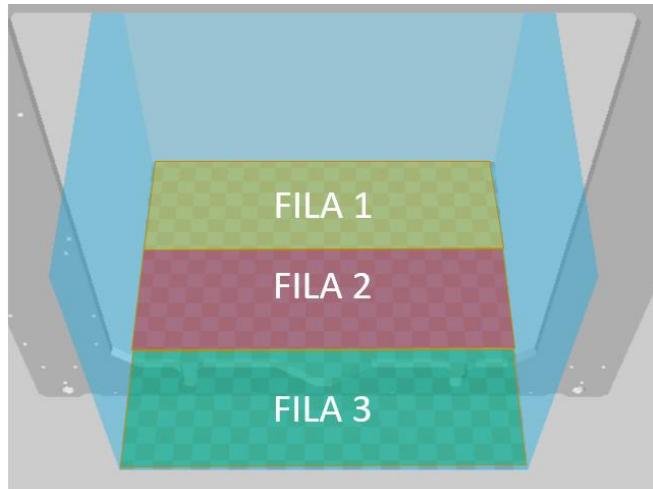


Fig. 7. División por filas de la cama de impresión. Imagen generada a partir del software CURA®

Los objetos se comienzan a imprimir desde el fondo de la cama según el orden indicado, aquellas piezas que requieran un espacio mayor, podrán ocupar 2 filas, por ejemplo, la fila 1 y 2, o la fila 2 y 3. Cada usuario es capaz de visualizar las filas disponibles, y el orden en el que debe imprimir, gracias a la cámara web, que controla el laboratorio. Una vez completada la cama de impresión, el responsable del laboratorio retira el cristal con las piezas impresas y coloca un nuevo cristal, ya preparado para comenzar la impresión.

El LI3D, dispone de una cola de impresión que determina qué pieza se imprimirá en cada momento, por orden cronológico de envío. Los trabajos impresos son marcados en color verde, de forma que cada usuario es capaz de conocer en todo momento qué trabajos han sido realizados, cuál es el turno de impresión, y qué filas hay aún libres en la cama de impresión antes de limpiar dicha cama.

Tras la puesta en marcha del laboratorio, el administrador, emplea las estadísticas de uso del LI3D, para obtener información en tiempo real relativas a cuáles son los días y horas de mayor impresión, de este modo es posible aprovechar aquellas franjas horarias en las que la impresora es menos utilizada para realizar el mantenimiento o para enviar aquellos trabajos que requieran mayor tamaño y por lo tanto mayor tiempo de impresión.

El administrador también es el único usuario que dispone de los permisos necesarios para llevar a cabo el control del encendido y apagado del sistema. Éste será capaz de activar y desactivar las impresoras sin más que actuar sobre los botones que han sido programados para tal efecto. Así, es posible prevenir fallos en el sistema debidos a un mal funcionamiento de las impresoras o del servidor.

Una vez implantado el sistema, se establecen las normas de empleo del laboratorio. Estas deben ser respetadas por todos los usuarios para asegurar la disponibilidad y funcionalidad del LI3D. Estas normas son:

- 1) Comprobar que el diseño cumple con las medidas y parámetros de la impresora
- 2) Respetar los turnos de impresión. No saturar la impresora por un mismo usuario
- 3) Respetar la distribución y orden de las filas de impresión en la cama
- 4) En caso de monitorizar un error de temperatura o de alguno de los ejes, avisar al responsable del laboratorio
- 5) Siempre que sea posible, ajustar los parámetros de impresión para un prototipado rápido. Esto permitirá aumentar el número de piezas impresas

- 6) Siempre que sea posible, la densidad de las piezas se ajustará a un 20%. Esto ahorrará material para realizar más impresiones
- 7) Tras finalizar un trabajo de impresión, eliminar el archivo de la impresora
- 8) Las piezas impresas deben recogerse por su usuario lo antes posible
- 9) Ser respetuoso con el medio ambiente, hacer buen uso de los materiales plásticos

5. RESULTADOS

El hecho de trabajar con impresoras 3D en formato kit, ha permitido a los alumnos, manejar distintos componentes mecánicos y electrónicos, comprobando la importancia y el funcionamiento de los disipadores de potencia, drivers, motores, finales de carrera...etc. Al profundizar en el funcionamiento de las impresoras 3D, los alumnos, adquieren otra serie de destrezas, como la capacidad para analizar los problemas técnicos planteados por los distintos componentes, la capacidad para encontrar soluciones a dichos problemas, no sólo de forma individual, sino también de forma conjunta, fomentando un trabajo colaborativo.

La puesta en marcha del laboratorio remoto de impresión LI3D, ha permitido aumentar la utilización de las impresoras en el horario no lectivo de los estudiantes del Centro. Hasta el momento de su implantación, la mayor parte de impresiones se desarrollaban en el horario de mañana, durante las clases de los alumnos, sin embargo, gracias al LI3D, estas impresiones se repartieron a lo largo del día, extendiendo el uso de las impresoras al horario vespertino, desde las 14:00h hasta las 21:00h, horario de cierre del Centro. Durante ese tiempo ha existido un responsable del Centro, encargado de retirar el cristal con las piezas impresas y preparar la cama de impresión para su siguiente uso.

Teniendo en cuenta que, en el proyecto encargado a los alumnos (construcción de un mini-brazo robótico UARM), el tiempo medio de impresión de las piezas es de 1 hora, el LI3D, ha permitido aumentar el número de piezas impresas, de 6 a 11 piezas al día, (aumento de un 180%, debido a los retardos que se establecen para limpiar la cama de impresión y establecer de nuevo los parámetros adecuados). Este rendimiento, ha favorecido la construcción de los distintos brazos robóticos (un total de 4), en un tiempo mucho menor, dedicando un mayor tiempo a otras tareas, como la programación de los dispositivos, o el estudio de otros aspectos de la electrónica industrial.

La autonomía del sistema, está limitada por la necesidad de eliminar las piezas impresas de la cama, una vez que ésta, está completa, es necesario establecer un responsable del LI3D, que recibirá un aviso de finalización de impresión para comprobar el estado de la superficie de impresión.

En cuanto a las impresoras 3D empleadas, es preciso realizar los ajustes necesarios en la impresora 3D para obtener piezas de calidad, esta tarea puede desanimar a aquellos usuarios no experimentados que busquen soluciones “*plug & play*” (enchufar y usar) puesto que no sólo se trata de un ajuste mecánico y/o electrónico, también es necesario tener en consideración la temperatura de los distintos componentes como la punta del extrusor o la cama, temperaturas que vienen condicionadas por el tipo de plástico a emplear ya sea PLA (poliácido láctico), o ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). En ocasiones y dependiendo del objeto de impresión, el emplear un tipo de ajuste u otro viene determinado por prueba y error. La figura 8 muestra un ejemplo del cambio obtenido en las impresiones 3D al realizar distintos ajustes en la impresora 3D. Los ajustes necesarios para obtener una mejor calidad de impresión fueron: (1) Establecer la utilización de una cama caliente de impresión, que favorezca la adhesión de la pieza a la cama, (2) Ajustar el eje Z de la impresora para minimizar la distancia entre la punta caliente y la cama en el momento de impresión, reduciendo la separación entre las líneas que forman cada capa de impresión, (3) disminuir la velocidad de impresión (mm/s) para favorecer el depósito del filamento en cada capa.



Fig. 8. Ejemplo de impresión 3D. A la izquierda la primera impresión obtenida, a la derecha la pieza obtenida tras los ajustes necesarios en la impresora 3D

6. CONCLUSIONES

Las impresoras 3D son herramientas, que deben facilitar la creación y/o el desarrollo de nuevos proyectos, por lo que limitar su uso a las horas de disponibilidad horaria de las aulas o talleres alarga el desarrollo de los proyectos para los que están siendo empleadas. La impresión 3D mediante FFF, implica unos tiempos de impresión elevados, esto conlleva la necesidad de maximizar en lo posible la disponibilidad del sistema de impresión, evitando tiempos de latencia en los que la impresora se encuentra en modo ocioso. Este es uno de los motivos fundamentales para la puesta en marcha del sistema LI3D. Desde la puesta en marcha del laboratorio, se han mejorado estos tiempos de latencia maximizando el funcionamiento de las impresoras y su disponibilidad, y por lo tanto aumentando el número de piezas impresas.

Los costes para llevar a cabo el laboratorio LI3D, son reducidos, puesto que el hardware empleado es de bajo coste y el software es gratuito y *open source*. Esto ha favorecido, su implantación en un breve periodo de tiempo empleando unos recursos mínimos, ofreciendo versatilidad al sistema, portabilidad y escalabilidad con un mayor número de impresoras y servicios.

El laboratorio remoto ha abierto esta tecnología a aquellos usuarios que no disponen del tiempo necesario para estar *in situ*, pero necesitan controlar las impresoras como si estuvieran presentes, estableciendo los parámetros necesarios para la impresión, y convirtiendo esta tecnología en una experiencia natural. Uno de los puntos a destacar es que la impresión 3D ha fomentado la creatividad de los usuarios, proporcionando un mecanismo para plasmar de forma tridimensional aquellos objetos que tienen en mente. Por otro lado, el LI3D ofrece una mejora en la obtención de las piezas impresas, esto no quiere decir que se imprima más deprisa, sino que la impresión está disponible durante el horario no lectivo de los alumnos, lo que aumenta el número de piezas impresas y por lo tanto mejora los tiempos de elaboración de proyectos relacionados con esta tecnología.

Es importante señalar, que el rendimiento y funcionalidad del laboratorio, viene marcado por un buen uso y respeto de las normas de utilización, siendo necesario respetar los turnos de impresión, así como la distribución de la cama de impresión, fomentando el trabajo en grupo y la colaboración entre los distintos usuarios.

Por último, y debido al funcionamiento continuado de las impresoras, las labores de mantenimiento deben realizarse de forma exhaustiva, para asegurar su disponibilidad, fiabilidad y precisión. En este sentido es necesario realizar un calendario de mantenimiento que permita optimizar estas labores (engrase de las barras de deslizamiento, limpieza de ventiladores y motores, revisión de disipadores de potencia de los drivers de impresión, limpieza de la punta caliente...etc.) y realizarlas en el menor tiempo posible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dimitrov D., Schreve K., de Beer N. "Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives", *Rapid Prototyping Journal*, 2006, Vol. 12 Iss: 3, pp.136 – 147. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540610670717>
- [2] Lipson H., Kurman M. *Fabricated. The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons, 2013. ISBN: 978-1-118-35063-8
- [3] Pham D. T., Gault R. S. "A comparison of rapid prototyping technologies". *International Journal of machine tools and manufacture*, 1998, vol. 38, nº 10, pp. 1257-1287. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5)
- [4] Bak D. "Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter". *Assembly Automation*, 2003, vol. 23, nº 4, pp. 340-345. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/01445150310501190>
- [5] Berman B. "3-D printing: The new industrial revolution". *Business horizons*, 2012, vol. 55, nº 2, pp. 155-162. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- [6] Ratto M, Ree R. "Materializing information: 3D printing and social change". *First Monday*, 2012, vol. 17, no 7.
- [7] Cazon-Martin A, Matey-Muñoz L.M., Rodriguez-Ferradas M. I. et al. "Direct Digital Manufacturing For Sports And Medical Sciences: Three Practical Cases". *Dyna*, noviembre 2015, vol. 90, nº 6, pp.622-628. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7690>.
- [8] Kruth, J.-P., Leu, Ming-Chuan; Nakagawa, T. "Progress in additive manufacturing and rapid prototyping". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1998, vol. 47, nº 2, pp. 525-540. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)
- [9] Nedic Z, Machotka J, Nafalski A. "Remote laboratories versus virtual and real laboratories," *Frontiers in Education*, 2003. *FIE* 2003 33rd Annual, 2003, vol.1, pp. T3E-1-T3E-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/FIE.2003.1263343>
- [10] AstroPrint Blog. [Online: 16 noviembre 2015]. Disponible en: https://blog.astroprint.com/octoprint_vs_astroprint/
- [11] Sicker D. C., Lookabaugh T., Santos J. and Barnes F. "Assessing the Effectiveness of Remote Networking Laboratories," *Frontiers in Education*, 2005. *FIE* '05. Proceedings 35th Annual Conference, Indianapolis, IN, 2005, pp. S3F-S3F. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/FIE.2005.1612279>.
- [12] Young-wook Ko, Duman T. M. and Spanias A., "On-line laboratory for communication systems using J-DSP," *Frontiers in Education*, 2003. *FIE* 2003 33rd Annual, 2003, vol.1, pp. T3E-13-T3E-18. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/FIE.2003.1263346>
- [13] Cubillo J., Martín S., Castro M. and Meier R., "Control of a remote laboratory by augmented reality," *Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*, 2012 IEEE International Conference on, Hong Kong, 2012, pp. W2B-11-W2B-15. DOI: [10.1109/TALE.2012.6360297](http://dx.doi.org/10.1109/TALE.2012.6360297)
- [14] Baumann F, Roller D. 3D "Printing Process Pipeline on the Internet". *Proceedings of the 8th ZEUS Workshop*, Vienna, Austria, January 27-28, 2016, pp. 29-36.
- [15] Rayna T., Striukova L. and Darlington, J. (2015). "Co-creation and user innovation: The role of online 3D printing platforms". *Journal of Engineering and Technology Management*, 37, pp.90-102. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jengtecman.2015.07.002>
- [16] Pryor S. "Implementing a 3D Printing Service in an Academic Library". *Journal of Library Administration*, vol. 54, Iss. 1, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01930826.2014.893110>
- [17] Nowlan G.A. "Developing and implementing 3D printing services in an academic library", *Library Hi Tech*, 2015, vol. 33 Iss: 4, pp.472 – 479. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/LHT-05-2015-0049>
- [18] Gonzalez S.R., Bennett D. B. "Planning and Implementing a 3D Printing Service in an Academic Library" – Issues in Science and Technology Librarianship, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5062/F4M043CC>
- [19] Mai J, Zhang L, Tao F, et al. "Customized production based on distributed 3D printing services in cloud manufacturing". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015: 1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/S00170-015-7871-Y>
- [20] He L., C. B. Liu, H. D. Lu, Y. Peng. "Study and Application on 3D Printing Cloud Service Platform", *Advanced Materials Research*, vol. 940, pp. 445-448, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.940.445>
- [21] Soriano A., et al. "Low Cost Platform for Automatic Control Education Based on Open Hardware". 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), At Cape Town International Convention Centre, Cape Town, South Africa, vol. 19, part 1. 2014. pp. 9044-9050. DOI: <http://dx.doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01909>
- [22] Chua, C. K.; Chou, S. M.; Wong, T. S. "A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1998, vol. 14, nº 2, pp. 146-152. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01322222>.
- [23] Crump S. Scott. "Apparatus and method for creating three-dimensional objects". U.S. Patent No 5,121,329, 9 Jun. 1992. DOI: [lens.org/014-646-390-621-460](http://dx.doi.org/10.1007/BF01322222).
- [24] Evans B. *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing*. Apress, Berkely, CA, USA, 1st edition, 2012. ISBN 1430243929, 9781430243922.
- [25] Wong Kaufui V., Hernández A. "A review of additive manufacturing." *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, vol. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5402/2012/208760>
- [26] Ultimaker. Cura and 3d printing made for each other. Online: 20 septiembre 2015. Disponible en: <https://ultimaker.com/en/products/cura-software>
- [27] Peng T. "Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes". 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Decoupling Growth from Resource Use. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 40, pp. 62–67. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.055>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto Gutenberg3D y sus miembros, por todas las experiencias realizadas y por su puesta en común. A Francisco Javier Zanfano, profesor de Sistemas Electrónicos, él ha aportado sus conocimientos en la impresión 3D y en el montaje y mantenimiento de estos equipos. También el soporte prestado por la Escuela de Ingenieros Industriales de la UNED en el proyecto 2016-IEE10 (AVANCES EN EL INTERNET DE LAS COSAS), así como los proyectos eMadrid (S2013/ICE-2715), IN-CLOUD (2015-1-IT01-KA202-00473), y Go-Lab (FP7-ICT-2011-8/317601).