





Evaluación de la carga de trabajo mental para la nivelación de cama en impresoras de filamento

Evaluation of the mental workload in the leveling of the bed in filament printers

Pablo Antonio Muñoz Gutiérrez^{1a} , Juan Luis Hernández Arellano^{1b} , Aidé Aracely Maldonado-Macías^{1b} , David Cortés Sáenz^{1a} 

^{1a}Doctorado en Diseño; Departamento de Diseño; Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte; ^{1b}Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Avanzada, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México

RESUMEN

El uso de tecnologías como las impresoras 3D de filamento ayuda a afrontar un mercado abierto donde el conocimiento, desarrollo e innovación se convierten en los pilares de competitividad, facilitando el desarrollo e innovación de los productos. Por lo tanto, resulta necesario investigar la carga de trabajo que representa la puesta a punto de estos equipos. La presente investigación tiene como objetivo evaluar la carga de trabajo percibida durante la calibración de la mesa de impresión, que es uno de los pasos para la puesta a punto de una impresora 3D. La carga de trabajo se determinó mediante la aplicación NASA-TLX, la cual proporciona el nivel individual de seis dimensiones (exigencia mental, exigencia física, exigencia temporal, esfuerzo, rendimiento y frustración) y el nivel global. Como resultado, se obtuvieron niveles altos de carga de trabajo. Las conclusiones derivadas del estudio ayudan a identificar posibles áreas de mejora y a entender los principales problemas que se pueden presentar durante esta actividad.

PALABRAS CLAVE: NASA-TLX; impresora 3D; evaluación; carga de trabajo.

ABSTRACT

The use of technologies such as filament 3D printers helps to face an open market where knowledge, development and innovation become the pillars of competitiveness, facilitating the development and innovation of products. Therefore, it is necessary to investigate the workload represented by the tuning of this equipment. The objective of this research is to evaluate the perceived workload during the calibration of the printing table, which is one of the steps for fine-tuning a 3D printer. The workload was determined using the NASA-TLX application, which provides the individual level of six dimensions (mental demands, physical demands, temporal demands, own performance, effort, and frustration) and the global level. As a result, high levels of workload were obtained. The conclusions derived from the study help to identify possible areas of improvement and understand the main problems that may arise during this activity.

KEYWORDS: NASA-TLX; 3D printer; evaluation; workload.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Pablo Antonio Muñoz Gutiérrez
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: al229150@alumnos.uacj.mx

Fecha de recepción: 9 de enero de 2024. **Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2024. **Fecha de publicación:** 28 de junio de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

La aplicación de tecnologías como las impresoras 3D ayuda a enfrentar un mercado abierto en el que el conocimiento, el desarrollo e innovación se convierten en los pilares de competitividad [1], [2]. La impresión 3D presenta una nueva forma de elaborar productos con diferentes métodos, como la estereolitografía, sinterización selectiva por láser, fotopolimerización por luz UV, fusión láser y modelado por deposición fundida [2], [3], [4], [5], y ofrece nuevos horizontes para el desarrollo de prototipos y productos, lo que genera nuevas oportunidades de investigación para la ergonomía en el campo de la interacción humano-producto.

Este trabajo se enfoca en el modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés), ya que representa una de las principales técnicas para el prototipado rápido en impresión 3D [1], [6] y su principal ventaja es la facilidad para encontrar recursos entre investigadores, así como del público en general, pues constituye una alternativa rápida y de bajo costo frente a otras técnicas de manufactura [6]. No obstante, los equipos más económicos tienen algunas características, como la elaboración del código de impresión (laminado), el cambio de filamento, el nivelado de la cama y otros detalles, que constituyen áreas de oportunidad para implementar mejoras.

Las investigaciones recientes se han enfocado en la aplicación del método NASA-TLX, el cual contribuye a evaluar la carga de trabajo, es utilizado ampliamente en diversas investigaciones [7], [8], [9] y se ha convertido en un punto de referencia para mejorar la toma de decisiones en un largo periodo de ejecución y diseño de la tarea [10].

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El modelo de deposición fundida se puede destacar como una de las tecnologías de fabricación aditiva más populares, principalmente debido a su costo asequible y los materiales de bajo costo utilizados [11], ayudando a que muchas empresas la tomen como base para iniciar el prototipado y una producción más económica. A pesar de sus ventajas, esta tecnología tiene una serie de limitaciones, como la baja precisión dimensional y geométrica [12], así como factores que afectan la estabilidad propia de la máquina, tales como velocidad de impresión, velocidad de extrusión, temperatura del lecho y ángulo de trama [13].

Estos problemas afectan la mayoría de las impresoras de bajo costo, siendo el principal efecto la pérdida de tiempo en la configuración para la puesta a punto de la máquina. La dificultad para configurar los parámetros de construcción y la fuerte influencia de estas variables en la calidad dimensional de las piezas [11], propicia la aplicación de métodos que permitan identificar los factores clave de la puesta a punto de la impresora, así como a mantener estas configuraciones por mayor tiempo para evitar que se detenga la producción. La nivelación de la cama de impresión es un subproceso de la puesta a punto de impresoras 3D de bajo costo. A pesar de la relevancia, poco o nada se ha explorado en la literatura el nivel de carga mental que demanda esta tarea, siendo el proceso de nivelación de la cama de impresión uno de los aspectos más críticos para tener éxito en la impresión de cualquier diseño.

OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación es evaluar la carga de trabajo percibida durante la calibración de la mesa de impresión, uno de los pasos fundamentales para la puesta a punto de una impresora 3D de deposición fundida. Además, se buscó identificar las actividades que componen la configuración necesaria para la puesta a punto de una impresora 3D de deposición fundida, con el fin de evaluar la carga mental generada por estas tareas utilizando el método NASA-TLX. Se utilizó el método NASA-TLX para evaluar la carga de trabajo, proporcionando niveles individuales de las seis dimensiones (exigencia mental, exigencia física, exigencia temporal, esfuerzo, rendimiento y frustración) y un nivel global. Se planteó que los resultados obtenidos posibiliten identificar áreas de mejora y comprender los principales desafíos asociados a esta actividad.

II. METODOLOGÍA

El diseño de esta investigación es transversal, exploratorio y descriptivo. La evaluación de la puesta a punto de la impresora se realizó en tres etapas, las cuales se describen a continuación:

- a) Etapa 1. El estudio se realizó con el apoyo de 3 técnicos en impresión 3D, seleccionados a conveniencia cumpliendo los siguientes criterios de inclusión: contar con al menos 6 meses de experiencia en impresión 3D, manejo de impresoras de bajo costo que requieran nivelación de cama de impresión,

estar laborando en algún centro de impresión 3D (público o privado) en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Los técnicos seleccionados brindaron la información necesaria para realizar el análisis jerárquico de tareas [11] para la puesta a punto de una impresora.

- b) Etapa 2. Se efectuó un análisis para identificar el error humano partiendo del Análisis Jerárquico de Tareas (AJT), dentro del cual se examinan todos los posibles estados de interacción hombre-máquina para conformar los diagramas de estado-espacio (SSD, por sus siglas en inglés). Los estados expresados en el SSD son representaciones gráficas del comportamiento del dispositivo o producto en interacción con el usuario y cada uno de ellos representa uno de los posibles estados de la interacción humano-dispositivo durante la tarea [12].

Una vez que se obtuvieron los SSD, estos se analizaron dentro de una matriz de transición, en la cual se estudian las transacciones entre estados, y se les asignó uno de los estados siguientes: *legal*, *ilegal* e *imposible*. Si la transición dada fue imposible, quedó un guion (-), si fue legal y deseada se puso una letra L y, por último, si fue ilegal y no deseada se colocó una I.

Tras ser analizadas todas las transacciones posibles, se evaluaron los casos donde se presentó una transición ilegal e imposible, lo cual ayudó a desarrollar

soluciones de diseño con el fin de eliminar o reducir el error humano.

- c) Etapa 3. Con la ejecución del método NASA-TLX se obtuvo la carga de trabajo mental y física, definida esta como la cantidad de esfuerzo mental que se debe desarrollar para lograr un resultado concreto. La aplicación se divide en dos fases: la primera de ponderación, en la cual se genera una evaluación individual de las seis subescalas y se usa para definir la fuente de carga, y la segunda consiste en la evaluación de las seis escalas relacionadas con el trabajo, a fin de obtener el promedio de carga mental, el cual se compara entre los trabajadores para evaluar la carga mental de una tarea.

Todas las etapas fueron realizadas con el apoyo y la colaboración directa de los técnicos en impresión 3D, lo cual dio certeza a los resultados obtenidos que se presentan en la siguiente sección.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de cada una de las etapas de la metodología propuesta se muestran a continuación:

- a) Con el AJT se evaluó la puesta a punto de la impresora, siendo el objetivo general nivelar la cama, y posteriormente, los subobjetivos fueron desglosados en tareas más simples explicadas en la [Figura 1](#).

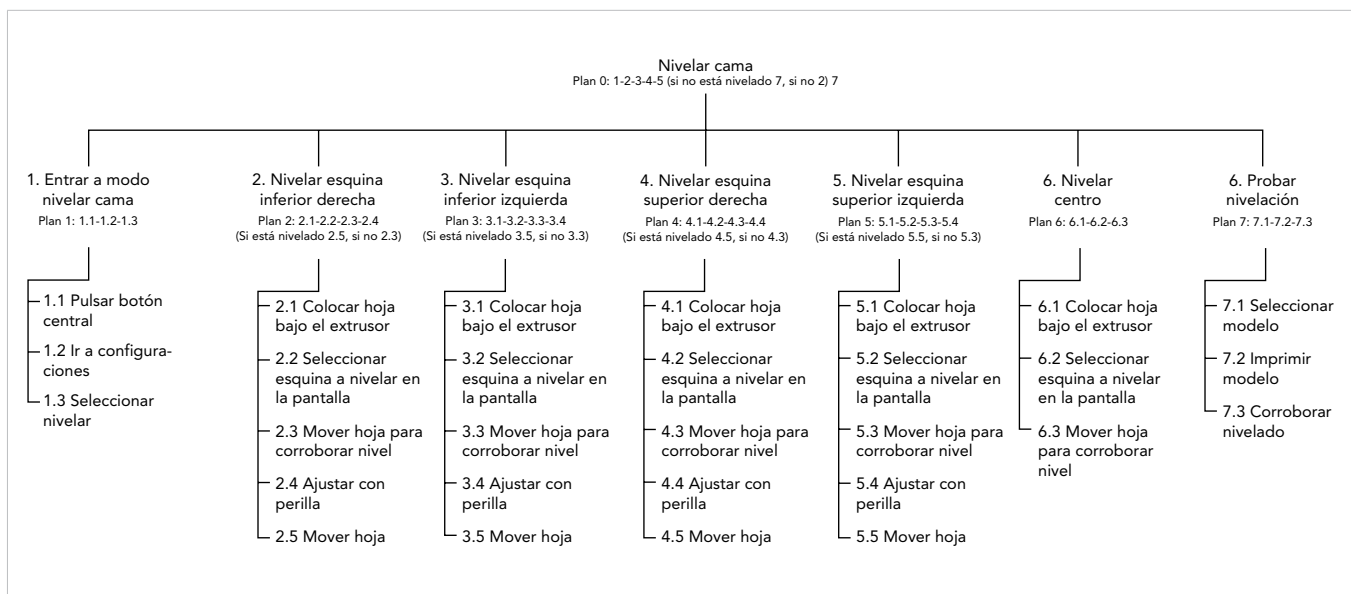


Figura 1. Análisis Jerárquico de Tareas.

b) Para el análisis de identificación del error humano se partió del AJT con el fin de desarrollar los SSD (Figura 2) y se obtuvieron siete estados, partiendo de 0: impresora apagada, nivelado de esquina superior izquierda (ESI), nivelado de esquina supe-

rior derecha (ESD), nivelado de esquina inferior izquierda (EII), nivelado esquina inferior derecha (EID), nivelado centro (C), prueba de nivelado y evaluación de nivelado. La transición entre tareas se da en 1, 2, 6 y 7 (representado por una línea azul).

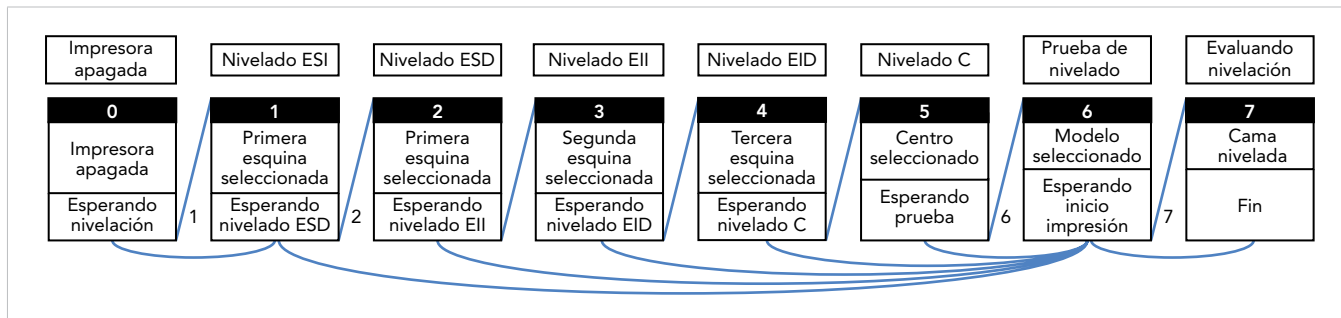


Figura 2. Diagramas de estado-espacio.

Al obtener el SSD, se realizó una matriz de transición (Tabla 1), donde se halló que las acciones ilegales están relacionadas con el estado 0: apagado, lo cual es lógico pues el dispositivo no está funcionando. Los demás problemas se presentaron en las fases finales en las que se debe seleccionar un modelo para evaluar el nivelado. A pesar de no contar con un estado posible que permita preevaluar la cama de manera fácil sin la selección de un modelo, se puede observar que la evaluación del nivelado se encontró incompatible con la evaluación del centro de la cama. No obstante, el centro no es un elemento fiable para evaluar la nivelación de la cama, por lo que los usuarios prefieren colocar las piezas en áreas más cercanas a los tonillos de ajuste en lugar del centro, que puede ser el área más difícil de nivelación, ya que depende de que las cuatro orillas estén bien niveladas.

TABLA 1
MATRIZ DE TRANSICIÓN

		Al estado							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Desde el estado	0	-	L	I	I	I	I	I	I
	1		-	L	L	L	I	I	I
	2			-	L	L	I	I	I
	3				-	L	I	I	I
	4					-	L	I	I
	5						-	L	I
	6							-	L
	7								-

c) Los resultados de la aplicación NASA-TLX y de los tres participantes se muestran en las Tablas 2, 3 y 4. El promedio obtenido de 67.32 puntos se interpreta como un nivel de dificultad alto. No obstante, los tres análisis realizados, además de mostrar la media ponderada, no expusieron el nivel de experiencia con las impresoras 3D de las personas a quienes se les aplicó el NASA-TLX, por lo que es importante observar cómo repartieron los pesos en los tres técnicos (Tabla 5).

La dimensión *exigencia temporal* fue la variable que tuvo mayor peso, debido a que el proceso de nivelado suele ser lento y si se cometen errores en el nivelado, se termina por reiniciar toda la tarea. La segunda variable que ganó mayor peso fue *frustración*, que se reflejó en el reinicio de la tarea y en la imposibilidad de ver de una manera clara la buena nivelación de la cama hasta el lanzamiento de una prueba, lo cual toma tiempo. La tercera variable con mayor impacto resultó ser *exigencia mental*.

TABLA 2
MEDIA PONDERADA APLICACIÓN 1

VARIABLE	PESO	PUNTUACIÓN	PUNTUACIÓN CONVERTIDA	PUNTUACIÓN PONDERADA
Exigencia mental	1	2	2	2
Exigencia física	2	4	8	16
Exigencia temporal	3	12	36	108
Esfuerzo	1	3	3	3
Rendimiento	4	8	32	128
Frustración	2	8	16	32
Total				289
Media ponderada global: 48.16				

TABLA 3
MEDIA PONDERADA APLICACIÓN 2

VARIABLE	PESO	PUNTUACIÓN	PUNTUACIÓN CONVERTIDA	PUNTUACIÓN PONDERADA
Exigencia mental	2	4	8	4
Exigencia física	0	2	0	0
Exigencia temporal	5	12	60	300
Esfuerzo	2	6	12	24
Rendimiento	3	2	6	18
Frustración	3	8	24	72
Total				418
Media ponderada global: 69.66				

TABLA 4
MEDIA PONDERADA DE LA APLICACIÓN 3

VARIABLE	PESO	PUNTUACIÓN	PUNTUACIÓN CONVERTIDA	PUNTUACIÓN PONDERADA
Exigencia mental	2	4	8	16
Exigencia física	0	2	0	0
Exigencia temporal	5	12	60	300
Esfuerzo	0	2	0	0
Rendimiento	4	4	16	64
Frustración	4	8	32	128
Total				508
Media ponderada global: 84.16				

TABLA 5
PESOS DE APLICACIONES

VARIABLE	PESOS		
	TÉCNICO 1	TÉCNICO 2	TÉCNICO 3
Exigencia mental	4	3	3
Exigencia física	3	4	4
Exigencia temporal	2	1	1
Esfuerzo	4	3	4
Rendimiento	1	2	2
Frustración	3	2	2

IV. CONCLUSIONES

La aplicación del método NASA-TLX resultó ser de gran relevancia para detectar oportunidades de mejoras durante la nivelación de la cama en impresoras de filamento. El AJT permitió una visualización de cómo se realiza la tarea, mientras que con el SSD se observaron las interacciones de la matriz de transición que dejó ver cómo se genera un bloque de procesos ilegales relacionados con la prueba final de la impresora, la cual bien podría ser implementada por el fabricante como un paso inicial ayudando al usuario a acelerar la nivelación de la cama para dar un inicio rápido al proceso de impresión

La aplicación del NASA-TLX mostró una calificación global de 67.32, lo que significa que es una tarea difícil de realizar. No obstante, en las aplicaciones se puede apreciar que entre los participantes los que tuvieron una carga mental más moderada son aquellos que estaban más familiarizados con la impresora y su puesta a punto. Los pesos otorgados por los participantes indican que el orden de dificultades es el mismo, siendo el más alto el *esfuerzo temporal* seguido de *frustración*, *rendimiento*, *exigencia mental* y *exigencia física*. En consecuencia, se puede establecer un orden de relevancia para los aspectos a abordar en la posible mejora o rediseño.

Para esto se recomienda trabajar en lo anteriormente mencionado, un patrón de preimpresión rápido que permita evaluar el nivelado de la cama antes de iniciar una nueva nivelación entre impresiones, pues de esta forma se pueden reiniciar más rápido los ciclos de trabajo.

REFERENCIAS

- [1] T. Meneses, Y. González, A. L. Bautista y J. M. Reyes, "Proceso de manufactura aditiva para prototipado rápido de prótesis de extremidades inferiores de bajo costo", en *Avances de Investigación en Ingeniería Aplicada*, F. Pech, N. Tass, B. Domínguez, J. J. Guzmán, R. E. Coop y C. I. Rejón, eds., Balancán, Tabasco, México: Instituto Tecnológico Superior de los Ríos, 2022, cap. 2, pp. 283-298.
- [2] J. Velasquez Costa, "Procesos de Manufactura con tecnología 3D", *CTScafe*, vol. III, n.º 7, mar. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/338817261>
- [3] M. León-Calero, Á. Marcos-Fernández y J. Rodríguez-Hernández, "Impresión 3D con materiales elastoméricos", *Revista de Plásticos Modernos*, vol. 118, n.º 747, pp. 5-15, jul. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/203003/1/777537.pdf>
- [4] I. Valls y D. Blay, "Impresora 3D de Resina por Estereolitografía", trabajo de grado, Escola d'Enginyeria de Barcelona Est, Universitat Politècnica de Catalunya, 2018.
- [5] J. V. González-Sosa y S. M. García-Carranco, "Análisis de varianza en manufactura aditiva con impresión

- 3D”, *DYNA*, vol. 90, n.º 227, pp. 167-175, 2023, doi: [10.15446/dyna.v90n227.107364](https://doi.org/10.15446/dyna.v90n227.107364).
- [6] S. V. Lopaczek y A. Raffin, “Pielas Arquitectónicas Dinámicas. Prototipos a escala mediante prototipado rápido, microcontroladores y patrones plegados”, *Actas de Diseño*, vol. 43, pp. 116-120, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.palermo.edu/ojs/index.php/actas/article/view/9680/16311>
- [7] S. G. Hart, “NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later”, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 50, n.º 9, pp. 904-908, 2006, doi: [10.1177/154193120605000909](https://doi.org/10.1177/154193120605000909).
- [8] K. Virtanen, H. Mansikka, H. Kontio y D. Harris, “Weight watchers: NASA-TLX weights revisited”, *Theor Issues Ergon Sci*, vol. 23, n.º 6, pp. 725-748, 2022, doi: [10.1080/1463922X.2021.2000667](https://doi.org/10.1080/1463922X.2021.2000667).
- [9] S. Rubio, E. Díaz, J. Martín y J. M. Puente, “Evaluation of Subjective Mental Workload: A Comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile Methods”, *Applied Psychology*, vol. 53, n.º 1, pp. 61-86, en. 2004, doi: [10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x](https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x).
- [10] J. I. Aguilar-Duque, J. L. Hernández-Arellano, A. Y. Tovar-Hernández, J. H. Restrepo-Correa y Á. F. Campoya-Morales, “Human error reduction in setting up fused filament fabrication equipment”, en *Ergonomía Ocupacional Investigaciones y Soluciones*, C. Espejo, E. Chacón, E. de la Vega y F. O. López, eds., México: Sociedad de Ergonomistas de México, 2019, vol. 12, pp. 69-80.
- [11] J. L. Varela-Aldás, “Impresión 3D y COVID-19”, *CienciAmérica*, vol. 9, n.º 2, pp. 51-57, may. 2020, doi: [10.33210/ca.v9i2.292](https://doi.org/10.33210/ca.v9i2.292).
- [12] M. S. Marín y J. E. Vargas, “Fabricación de Prótesis Ocular Mediante Impresión 3D Artículo de Revisión”, Universidad Antonio Nariño, Medellín, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uan.edu.co/items/27838f03-ca22-4754-a333-603966e6ff71>
- [13] B. Martí, “Estudio Sobre la Optimización de los Parámetros de Fabricación en una Impresora 3D con Tecnología FDM”, trabajo de fin de grado, Escola d’Enginyeria de Barcelona Est, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106056/TFG_Volumen_I_Memoria.pdf

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no hay conflicto de interés en la publicación del presente trabajo.