

FABRICACIÓN DE MANIQUÍES BIOMIMÉTICOS AL TEJIDO DURO Y BLANDO MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

Rebeca Franco Reyes^a, Eduardo Moreno Barbosa^a, Ricardo Agustín Serrano^a, Alonso Antonio Collantes Gutiérrez^c, Fernando Moreno Barbosa^d, Marco Antonio Morales Sánchez^b.

^aFacultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. fr224570124@alm.buap.mx, emoreno@fcfm.buap.mx, ragustin@fcfm.buap.mx

^bFacultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. spinor70@yahoo.com.mx

^cHospital Universitario de Puebla, Puebla, México. alonso.collantesg@correo.buap.mx

^dFacultad de Medicina, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. fernando.morenobarbosa@correo.buap.mx

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un maniquí médico antropomórfico utilizando impresión 3D con materiales que imitan tejidos humanos duros y blandos. Se emplearon medidas biométricas específicas para lograr mayor realismo clínico. El diseño incluye tres capas que representan piel, músculo y tejido óseo (cortical y trabecular), usando silicon, poliuretano termoplástico (TPU) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), respectivamente. Lo novedoso radica en su estructura trabecular basada en un modelo matemático y su configuración heterogénea. La validación se realizó mediante tomografía computarizada y análisis de Fourier y dimensión fractal, mostrando alta similitud con tejidos reales. El resultado es un maniquí más realista y funcional que los modelos tradicionales, ideal para enseñanza y entrenamiento médico.

Palabras clave: Impresión 3D; Biomedicina; Maniqués Médicos.

ABSTRACT

This work presents the development of an anthropomorphic medical mannequin using 3D printing with materials that mimic both hard and soft human tissues. Specific biometric measurements were used to achieve greater clinical realism. The design includes three layers representing skin, muscle, and bone tissue (cortical and trabecular), using silicone, thermoplastic polyurethane (TPU) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS), respectively. Its novelty lies in the trabecular structure based on a mathematical model and its heterogeneous configuration. Validation was performed through clinical CT imaging and analysis using Fourier components and fractal dimension, showing high similarity to real tissues. The result is a more realistic and functional mannequin compared to traditional models, ideal for medical training and education.

Key words: 3D Printing; Biomedicine; Medical Mannequins.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de maniqués en contextos médicos y de entrenamiento clínico ha sido una herramienta clave para la enseñanza práctica, sin embargo, los modelos tradicionales están limitados por la homogeneidad de sus materiales y su baja similitud con las estructuras anatómicas reales. Estas limitaciones reducen la capacidad de simular situaciones clínicas complejas y afectan la calidad del aprendizaje. La impresión 3D ha emergido como una alternativa tecnológica que permite la fabricación de modelos personalizados con mayor fidelidad anatómica y variabilidad en propiedades físicas, permitiendo emular distintos tipos de tejidos.

El rápido crecimiento de la tecnología de impresión tridimensional (impresión 3D o fabricación aditiva) ha ofrecido muchas nuevas posibilidades en el campo médico. Esta tecnología permite la creación de modelos anatómicamente precisos, rentables, modulares y personalizables, con un alto grado de libertad geométrica. Una de las principales ventajas de la impresión 3D en medicina es su potencial para producir estructuras basadas en pacientes y específicas para cada paciente. Las diversas aplicaciones en medicina abarcan desde productos y equipos médicos, productos farmacéuticos, tejidos y biomateriales, dispositivos médicos hasta modelos físicos en 3D. Dentro del área de modelos físicos, existen modelos para formación y educación, así como modelos utilizados para la planificación preoperatoria [1, 2]. Finalmente, también existen los llamados maniqués.

Los maniqués son modelos físicos diseñados para imitar el tejido biológico y sus propiedades en las imágenes médicas, desempeñando un papel vital en el aseguramiento de la calidad, la educación, la investigación y la formación en diversas disciplinas médicas [3].

Con la impresión 3D, la fabricación de maniqués médicos ha experimentado una transformación significativa. Esta tecnología innovadora ha complementado y reemplazado métodos de fabricación tradicionales, que normalmente son costosos y lentos para la producción de maniqués. En el campo de los maniqués impresos en 3D, se diseñan diversos tipos para abordar necesidades clínicas específicas y requerimientos de investigación. Algunos se centran en replicar órganos o estructuras anatómicas concretas, mientras que otros se enfocan en el aseguramiento de la calidad.

La clave de un maniquí es el material equivalente al tejido (también conocido como sustituto), que replica propiedades específicas de un tejido del cuerpo humano para imitarlo de la forma más realista posible en la obtención de imágenes médicas [4, 5]. En este contexto, se propone el desarrollo de un maniquí médico antropomórfico utilizando impresión 3D con diversos materiales. Este modelo integra materiales que replican tanto tejidos blandos como duros, con una configuración estratificada que imita las capas de la piel, el músculo y el hueso. Además, se introduce una estructura trabecular interna diseñada a partir de un modelo matemático, lo cual aporta un mayor grado de biomimética.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un maniquí médico antropomórfico utilizando tecnologías de impresión 3D, capaz de replicar de manera realista tanto tejidos

blandos como duros mediante el uso de materiales biomiméticos y una estructura trabecular generada matemáticamente.

Asimismo, se busca establecer una metodología de diseño y fabricación de maniqués clínicos más realistas, que puedan utilizarse como herramienta de apoyo en la formación médica y la validación experimental de técnicas diagnósticas.

3. METODOLOGÍA

Para lograr una futura estandarización en el desarrollo de maniqués, es necesario adoptar un flujo de trabajo de producción bien establecido [6]. Los pasos básicos que pueden aplicarse al flujo de trabajo para desarrollar maniqués impresos en 3D son los siguientes:

- (i) una fase de planificación,
- (ii) una fase de conceptualización,
- (iii) una fase de diseño y, finalmente,
- (iv) una fase de validación

Para la fase de planificación de este trabajo el primer paso fundamental consistió en recopilar información detallada sobre los requisitos específicos del modelo. Se definió que el maniqué estaría destinado tanto a fines de investigación como educativos, lo que implicó establecer criterios que permitieran su análisis mediante imágenes tomográficas clínicas. En este sentido, se delimitó su aplicación al estudio anatómico y radiológico de una sección transversal del brazo humano, con un enfoque particular en la representación precisa del húmero. Esta etapa permitió orientar el diseño hacia un modelo que cumpliera con los estándares de realismo y funcionalidad requeridos para su uso en entornos académicos y científicos.

En la fase de conceptualización del maniqué, se desarrolló el modelo a partir de una categorización clara de sus componentes anatómicos, con el fin de representar fielmente una sección transversal del brazo humano. Se definieron cuatro componentes principales: hueso cortical, hueso trabecular, músculo y piel, cada uno con características estructurales específicas. A partir de esta segmentación, se llevó a cabo un análisis detallado de los materiales disponibles para impresión 3D, evaluando su compatibilidad con las propiedades densitométricas y visuales de los tejidos reales. Este análisis fue crucial para seleccionar materiales que permitieran no solo una representación anatómica precisa, sino también una respuesta adecuada en estudios de imagen tomográfica. Para la fabricación, se seleccionaron los siguientes materiales:

- Piel: Se utilizó tinta de silicona, que ofrece una textura flexible y resistencia superficial comparable a la dermis.
- Músculo: Se empleó poliuretano termoplástico (TPU), material elastomérico con buena capacidad de deformación.
- Hueso: Se seleccionó acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) por su rigidez y facilidad de impresión, usado tanto para la estructura cortical como para la trabecular.

Para la fase de diseño se consideró la elaboración de un maniquí antropomórfico basado en datos biométricos reales, utilizando una media de ancho corporal de un humero de 67.66 mm, de ancho corporal de un musculo de 25.5 mm y de una capa de piel de 2 mm de grosor [7]. El diseño fue realizado mediante modelado tridimensional en Meshmixer, un programa de diseño asistido por computadora (CAD), y segmentado en tres capas principales, cada una correspondiente a un tipo de tejido. La novedad del modelo radica en la implementación de una estructura trabecular interna generada mediante el modelo matemático Komarova-Hohenberg [8], lo que permitió distribuir la masa ósea de forma heterogénea. Esta estructura fue integrada al diseño óseo del maniquí antes de la impresión. El modelo fue modificado realizando ajustes según las especificaciones de las medidas biométricas. Posteriormente, el modelo diseñado se convirtió en capas mediante el software de impresión 3D, utilizando como entrada el archivo STL. Finalmente se llevo a cabo la impresión 3D de las distintas capas haciendo uso de los materiales seleccionados con anterioridad.

Una vez fabricado el maniquí se dio paso a la fase de validación donde el modelo fue sometido a un estudio mediante tomografía computarizada (CT) clínica. Las imágenes obtenidas se analizaron mediante técnicas de procesamiento digital utilizando transformada de Fourier para la identificación de patrones espaciales y análisis de dimensión fractal para cuantificar la complejidad morfológica. Los resultados se compararon con valores de referencia obtenidos de muestras óseas reales.

4. RESULTADOS

Como resultado del proceso de elaboración, se obtuvo un maniquí compuesto por capas diferenciadas que representan los principales tejidos de una sección transversal del brazo. En la Figura 1, A) se muestran las distintas capas resultantes de la impresión 3D, el componente óseo, correspondiente al húmero, fabricado con material ABS debido a su rigidez y similitud con las propiedades del hueso cortical y trabecular. La capa muscular se imprimió utilizando TPU y la piel que fue replicada con una cubierta de silicón. Cada componente fue impreso por separado, respetando su geometría y grosor específicos, y posteriormente ensamblado de manera manual para formar el prototipo completo mostrado en la Figura 1, B). Este enfoque por capas permitió una integración estructural precisa y un alto grado de realismo en el modelo final.

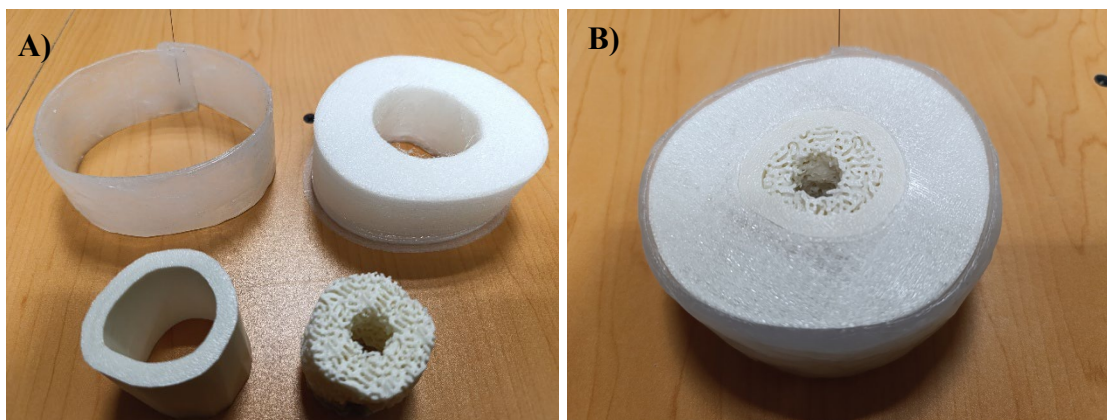


Figura 1: Prototipo final del maniquí; A) capas por separado del maniquí, B) unión de las capas

Las imágenes obtenidas mediante tomografía computarizada del maniquí mostradas en la Figura 2, permitieron visualizar con claridad la diferenciación entre las distintas capas que lo componen. Estas imágenes permitieron observar la distribución interna de densidades, así como la capacidad de los materiales de simular estructuras anatómicas reales en términos de contraste. Las imágenes se adquirieron en un tomógrafo clínico convencional Siemens Healthineers SOMATOM Force eco, es un tomógrafo de doble fuente (2 tubos de rayos X Vectron TM), potencia del generador de 240 kW, ajuste de kV de 70 – 150 kV en pasos de 10 kV y resolución espacial de 0.24 mm. Se caracteriza por su velocidad de escaneo ultra rápida, su capacidad para reducir la dosis de radiación y el uso de contraste, y su potencial para flujos de trabajo sin sedación.

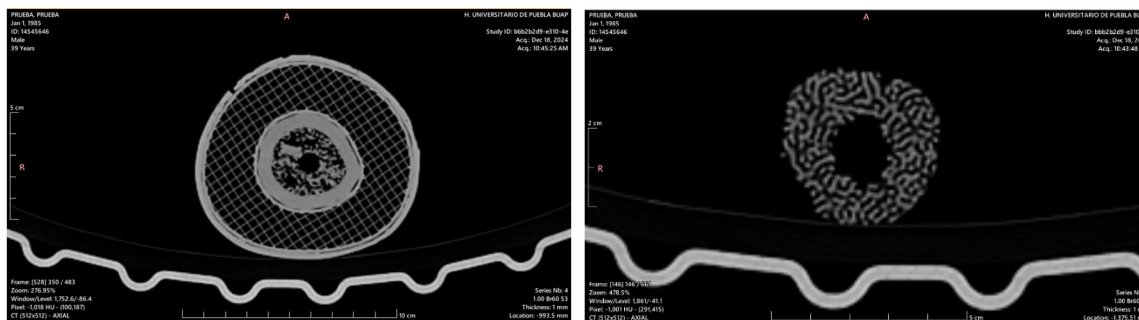


Figura 2: Ejemplo de las imágenes del maniquí obtenidas mediante tomografía computarizada

Finalmente se realizó una validación morfológica del tejido óseo trabecular, la estructura ósea interna, se llevó a cabo una validación visual y cuantitativa de la morfología del tejido óseo trabecular impreso, comparándolo con cortes reales de hueso humano [9]. Se aplicaron técnicas avanzadas de análisis de textura y geometría, tales como:

- Análisis de componentes de Fourier, utilizado para evaluar la distribución espacial y la periodicidad de las estructuras internas, permitiendo comparar directamente las estructuras físicas visualizadas en imágenes clínicas reales con las impresas generadas numéricamente.
- Cálculo de la dimensión fractal, técnica que permitió cuantificar el grado de complejidad y rugosidad del patrón trabecular, ofreciendo un indicador matemático de similitud entre el modelo impreso y las estructuras óseas reales observadas en imágenes clínicas.

El análisis morfológico del maniquí, realizado mediante la dimensión fractal y la transformada de Fourier, permitió evaluar la complejidad estructural y la distribución espacial de las texturas presentes en las imágenes tomográficas. Los resultados mostraron que los modos de Fourier del maniquí, ver Figura 3, C-D); presentaban una distribución de frecuencias similar a la observada en las imágenes de hueso real, especialmente en los rangos medios y altos, lo cual indica una adecuada representación de los patrones estructurales del tejido óseo. Los valores resultantes para la dimensión fractal están dados por $D_r=1.8589$ para el tejido óseo trabecular real y $D_m=1.8485$, con un error absoluto entre ambos resultados $\varepsilon_a=0.0103$ y un error relativo $\varepsilon_r=0.55\%$, ver Figura 3, E). Estos resultados validan la capacidad del modelo impreso en 3D para reproducir la arquitectura interna del hueso, lo que sugiere que el nivel de detalle y la irregularidad superficial fueron reproducidos con fidelidad.

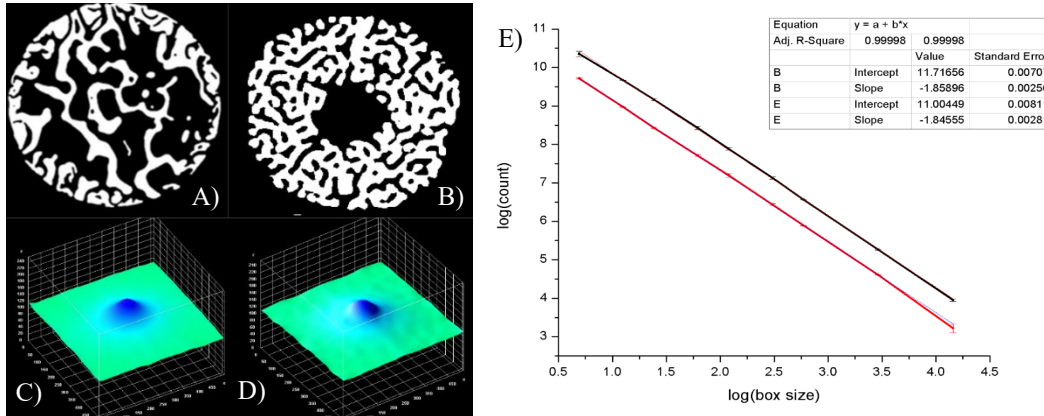


Figura 3: A) Corte transversal del hueso trabecular reflejado por CT, hueso (blanco) y aire (negro); [9], B) corte transversal de la estructura trabecular del maniquí por CT, C-D) Transformadas de Fourier de A) y B) respectivamente, E) Resultado de la dimensión fractal de A) y B) respectivamente

Para complementar el análisis morfológico, se realizó una prueba estadística ANOVA a partir de los valores obtenidos de la dimensión fractal, tanto de las CT's del maniquí como de las CT's de hueso real. En este análisis se estableció como hipótesis nula que las estructuras eran diferentes, mientras que la hipótesis alternativa planteaba que las estructuras eran similares en términos de su complejidad morfológica. El resultado arrojó un valor de $p = 3.66665 \times 10^{-9}$, el cual es significativamente menor al umbral de $p \leq 0.05$, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Esto indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las estructuras comparadas, lo que respalda la similitud morfológica entre el maniquí y el hueso real en términos de complejidad estructural medida por la dimensión fractal.

5. CONCLUSIONES

El trabajo presentado demuestra que es posible diseñar y fabricar maniqués médicos de alta fidelidad anatómica utilizando tecnologías de impresión 3D y modelado matemático. La inclusión de una estructura ósea trabecular heterogénea, combinada con materiales que emulan diferentes tejidos, proporciona un nivel de realismo superior que no se encuentra en modelos tradicionales.

Los trabajos previos referenciados proporcionan el contexto teórico y metodológico que fundamenta el presente estudio. Por ejemplo, los estudios [1–5] destacan la relevancia de la impresión 3D en el desarrollo de modelos anatómicos y maniqués médicos, mientras que las investigaciones más recientes [6–10] abordan los avances en el uso de materiales multimateriales y estructuras funcionales para aplicaciones biomédicas. En este trabajo, se integran dichos enfoques, aplicándolos al diseño de un modelo antropomórfico heterogéneo que busca combinar realismo anatómico con funcionalidad experimental.

Aunque el estudio presenta un gran potencial, aún existen algunas limitaciones. Una de ellas es el uso de materiales comerciales, como TPU, ABS y silicón, que, si bien resultan adecuados para la simulación estructural, no reproducen con precisión las propiedades biomecánicas de los tejidos reales. Además, la validación se centró únicamente en métricas

morfológicas y fractales, por lo que futuras investigaciones podrían incorporar evaluaciones mecánicas o radiológicas más amplias para lograr una validación más completa.

El maniquí propuesto no solo tiene utilidad en la enseñanza médica y la validación de técnicas de imagen, sino que también puede emplearse en contextos de investigación y desarrollo tecnológico. Por ejemplo, puede adaptarse para pruebas de dispositivos médicos, simulación de procedimientos quirúrgicos o entrenamiento en técnicas de diagnóstico no invasivo. Además, su estructura modular permite modificaciones específicas para otras regiones anatómicas, ampliando su potencial en ámbitos educativos y clínicos.

6. REFERENCIAS

- [1]. Z. Jin, Y. Li, K. Yu, L. Liu, J. Fu, X. Yao, A. Zhang, and Y. He, "3D printing of physical organ models: recent developments and challenges," *Advanced Science* 8(17), e2101394 (2021).
- [2]. N. Wake (ed.), *3D Printing for the Radiologist*, Elsevier, St. Louis, USA (2022).
- [3]. G. Sands, C. H. Clark, and C. K. McGarry, "A review of 3D printing utilisation in radiotherapy in the United Kingdom and Republic of Ireland," *Physica Medica* 115, 103143 (2023).
- [4]. K. Wang, C.-C. Ho, C. Zhang, and B. Wang, "A review on the 3D printing of functional structures for medical phantoms and regenerated tissue and organ applications," *Engineering* 3(5), 653–662 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.05.013>
- [5]. V. Filippou and C. Tsoumpas, "Recent advances on the development of phantoms using 3D printing for imaging with CT, MRI, PET, SPECT, and ultrasound," *Medical Physics* 45(9), e740–e760 (2018).
- [6]. M. Wegner, J. Spallek, D. Krause, and E. Gargioni, "Comparing technologies of additive manufacturing for the development of modular dosimetry phantoms in radiation therapy," *Transactions on Additive Manufacturing Meets Medicine* 2(1) (2020).
- [7]. J. Yin, M. Li, G. Dai, et al., "3D printed multi-material medical phantoms for needle-tissue interaction modelling of heterogeneous structures," *Journal of Bionic Engineering* 18, 346–360 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42235-021-0031-1>
- [8]. "Estudios teórico-metodológicos en ciencias exactas, tecnológicas y de la tierra 2," Atena, Cap. 1, 1–17 (2023). <https://doi.org/10.22533/at.ed.9932322111>
- [9]. D. Wu, A. Spanou, A. Diez-Escudero, and C. Persson, "3D-printed PLA/HA composite structures as synthetic trabecular bone: A feasibility study using fused deposition modeling," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 103, 103608 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103608>
- [10]. C. J. Culbreath, M. S. Taylor, S. D. McCullen, et al., "A review of additive manufacturing in tissue engineering and regenerative medicine," *Biomedical Materials & Devices* (2024). <https://doi.org/10.1007/s44174-024-00183-3>