

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE MEDICINA



UANL

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN QUIRÚRGICO PARA LA
FIJACIÓN DE FRACTURAS DE LA COLUMNA ANTERIOR DEL
ACETÁBULO**

Por

Dr. Ramón Quintanilla Loredó

Como requisito parcial para obtener el grado de ESPECIALIDAD MÉDICA en
Ortopedia y Traumatología

Febrero, 2026




UANL

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN QUIRÚRGICO PARA LA
FIJACIÓN DE FRACTURAS DE LA COLUMNA ANTERIOR DEL
ACETÁBULO**

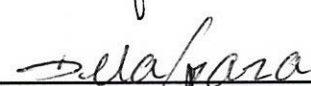
POR

Dr. Ramón Quintanilla Loredó

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
ESPECIALIDAD MÉDICA EN ORTOPEDIA Y TRAUMATOLOGÍA**



Dr. med. Eduardo Álvarez Lozano
DIRECTOR DE TESIS



Dr. med. Santiago de la Garza Castro
COORDINADOR DE POSGRADO



Dr. med. Carlos Alberto Acosta Olivo
COORDINADOR DE INVESTIGACIÓN



Dr. med. Víctor Manuel Peña Martínez
JEFE DE SERVICIO



Dr. med. Felipe Arturo Morales Martínez
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UANL

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN QUIRÚRGICO PARA LA
FIJACIÓN DE FRACTURAS DE LA COLUMNA ANTERIOR DEL ACETÁBULO**

**El presente trabajo fue realizado en el Servicio de Ortopedia y Traumatología
del Hospital Universitario "Dr. José Eleuterio González" en la Facultad de
Medicina de la Universidad Autónoma de Nuevo León, bajo la Dirección del
Dr. med. Eduardo Álvarez Lozano.**



Dr. med. Eduardo Álvarez Lozano
Director

ÍNDICE

Comentado [MS2]: La numeración no coincide (romanos y arábigos) con los títulos, hay que actualizar la tabla.

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
LISTA DE ABREVIATURAS	iii
LISTA DE TABLAS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	1
I. INTRODUCCIÓN	2
II. ANTECEDENTES	4
III. JUSTIFICACIÓN	12
IV. OBJETIVOS	13
V. MATERIAL Y MÉTODOS	14
VI. RESULTADOS	22
VII. DISCUSIÓN	33
VIII. CONCLUSIONES	38
IX. BIBLIOGRAFÍA	40
X. ANEXOS	47
XI. RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	48

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al Servicio de Ortopedia y Traumatología, al Hospital Universitario “Dr. José Eleuterio González” y a la Universidad Autónoma de Nuevo León, mi alma mater, por brindarme las herramientas académicas y el respaldo institucional necesarios para el desarrollo de este proyecto, así como por permitirme llevar a cabo esta investigación en un entorno de excelencia clínica y académica.

Al Dr. med. Eduardo Álvarez Lozano, mi director de tesis, por su invaluable guía, confianza y apoyo durante todo el proceso de desarrollo de este trabajo.

Agradezco también a los coinvestigadores: Jorge, Jaime, Julio y Abraham, por su colaboración, conocimientos y compromiso para llevar este proyecto a cabo.

Finalmente, a mi familia, por su amor y apoyo incondicional, por motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes, y por recordarme siempre el valor del esfuerzo y la perseverancia.

DEDICATORIA

A mi familia. A mi padre, por ser ejemplo de trabajo y perseverancia; a mi madre, por su amor y apoyo incondicional; y a mi hermana, por ser siempre una inspiración y compañía en el camino. Los quiero Ramón, Xochitl y Thais. Este logro es tan suyo como mío.

LISTA DE ABREVIATURAS

AO/OTA	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen / Orthopedics and Trauma Association
3-D	Tercera dimensión
C#	C sharp
C++	C plus plus
UPS	Uninterruptible Power Supply
PC	Personal Computer
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
IMU	Inertial Messuring Unit
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
IEC	International Electrotechnical Commission
MySQL	My Structured Query Language
DOF	Degrees of Freedom

LISTA DE TABLAS

Comentado [MS3]: Las listas de tablas y figuras tienen que llevar número de página.

Tabla 1: Rangos de movimientos del codo

30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de la arquitectura del software.	17
Figura 2: Diagrama de la arquitectura del hardware.	19
Figura 3: Arquitectura del sistema de navegación asistido por robot. Se muestran los módulos principales: sensores y microcontrolador (verde), procesamiento central con control robótico y visualización (naranja) y gestión de datos clínicos (azul).	21
Figura 4: Prototipo del robot junto con sus 6 codos.	31
Figura 5: Prototipo de carcasa del sistema de navegación: vista anterolateral.	31
Figura 6: Prototipo el robot junto a sus codos, versión desnuda: vista anterolateral.	32
Figura 7: Prototipo final del sistema de navegación junto a sus codos: vista anterolateral.	32

RESUMEN

Introducción: Las fracturas de la columna anterior del acetábulo representan un desafío quirúrgico por su compleja anatomía y el alto riesgo de malposición de implantes cuando se utilizan técnicas guiadas únicamente por fluoroscopia bidimensional.

Objetivo: Para superar estas limitaciones, se diseñó y desarrolló un sistema de navegación quirúrgico modular y escalable, orientado a mejorar la precisión de la fijación percutánea con tornillos canulados y reducir la exposición a radiación.

Resultados: El sistema integra planeación tridimensional basada en archivos DICOM, un gemelo digital intraoperatorio desarrollado en Unity/C#, sensores inerciales (IMU) y marcadores ópticos, un módulo de control central en Python, protocolos de comunicación MQTT y un brazo robótico de seis grados de libertad. Esta arquitectura permite guiar en tiempo real la trayectoria de los implantes y proporcionar retroalimentación visual, sonora y háptica al cirujano.

Conclusiones: El desarrollo incluyó pruebas unitarias, integración continua, documentación técnica y medidas de privacidad y ciberseguridad alineadas con normativas internacionales (IEC 62304). Si bien el sistema se encuentra en etapa de prototipo, establece una base sólida para estudios ex vivo y clínicos futuros que evalúen su exactitud geométrica, seguridad y eficacia comparada con técnicas convencionales. Este trabajo representa una innovación tecnológica orientada a ofrecer procedimientos mínimamente invasivos más precisos y seguros en cirugía acetabular.

ABSTRACT

Introduction: Fractures of the anterior column of the acetabulum are a surgical challenge due to their complex anatomy and the high risk of implant malposition when relying solely on two-dimensional fluoroscopic guidance.

Aim: To address these limitations, a modular and scalable surgical navigation system was designed and developed to enhance the accuracy of percutaneous screw fixation and reduce radiation exposure.

Results: The system integrates 3D preoperative planning from DICOM files, an intraoperative digital twin built in Unity/C#, inertial (IMU) and optical tracking sensors, a Python-based central control module, MQTT communication protocols, and a six-degree-of-freedom robotic arm. This architecture enables real-time trajectory guidance and provides visual, auditory, and haptic feedback to the surgeon.

Conclusions: The development process included unit testing, continuous integration, technical documentation, and privacy and cybersecurity measures aligned with international standards (IEC 62304). Although still at the prototype stage, the system provides a solid foundation for future ex vivo and clinical validation studies assessing geometric accuracy, safety, and effectiveness compared to conventional techniques. This work represents a technological innovation aimed at offering safer and more precise minimally invasive procedures in acetabular fracture surgery.

I. INTRODUCCIÓN

Las fracturas de acetábulo afectan la articulación coxofemoral en su porción acetabular y presentan una incidencia aproximada de 3 casos por cada 100,000 pacientes por año **(1)**. Existen dos picos de presentación asociados a diferentes mecanismos de lesión: pacientes jóvenes, generalmente por traumatismos de alta energía, y pacientes ancianos, por traumatismos de baja energía **(2)**. El primer grupo constituye hasta el 80% de los casos reportados **(1)**. Estas fracturas son difíciles de tratar debido a su complejidad, pues afectan una articulación de carga fundamental, lo que puede derivar en limitación funcional, dolor crónico o artrosis postraumática a edades tempranas, con un impacto directo en la calidad de vida **(3, 4)**. La reducción anatómica y la fijación estable son fundamentales para preservar la articulación, permitir movilidad temprana y prevenir complicaciones a largo plazo **(3)**.

El acetábulo está formado por la unión del ilion, el isquion y el pubis, y articula con la cabeza femoral para constituir una articulación sinovial **(5)**. Su anatomía tridimensional y las relaciones con estructuras neurovasculares críticas complican el abordaje quirúrgico. La clasificación de Judet y Letournel, utilizada a nivel mundial, permite planificar el tratamiento de acuerdo con el patrón de fractura **(6)**. Sin embargo, incluso con su uso, la colocación precisa de placas o tornillos sigue siendo un desafío, especialmente en técnicas mínimamente invasivas como la fijación percutánea con tornillos canulados **(7)**.

Esta última técnica ofrece ventajas sobre la reducción abierta, como menor morbilidad, menor sangrado transoperatorio y menor riesgo de infección **(8, 9, 10)**. No obstante, su principal limitación es el riesgo de una colocación inadecuada de los tornillos debido a que se realiza únicamente bajo control fluoroscópico **(11)**. La fluoroscopia bidimensional, aunque útil, presenta limitaciones importantes: la superposición de estructuras óseas dificulta la identificación de referencias anatómicas, la ausencia de proyecciones multiplanares reduce la capacidad de evaluar la trayectoria completa del

implante y la dependencia de la experiencia del cirujano incrementa el riesgo de errores técnicos **(12)**. Estas limitaciones pueden ocasionar colocación subóptima de los tornillos, con complicaciones potenciales como lesión de estructuras neurovasculares, pérdida de estabilidad del montaje e incluso necesidad de reintervenciones **(9, 10)**.

En respuesta a estas limitaciones, los sistemas de navegación quirúrgico han surgido como una herramienta innovadora para mejorar la precisión en la colocación de implantes ortopédicos. Basados en imágenes tridimensionales intraoperatorias y referencias anatómicas digitales, permiten planificar y guiar en tiempo real la trayectoria de los tornillos, reduciendo la dependencia del control fluoroscópico. Diversos estudios han demostrado que la navegación asistida disminuye significativamente el mal posicionamiento de implantes, reduce la perforación cortical y disminuye el riesgo de complicaciones neurovasculares o viscerales **(13, 14, 15, 16, 17)**.

Tomando en cuenta estos avances y las dificultades de la fijación percutánea de fracturas de la columna anterior del acetábulo, se hace necesaria la evaluación de sistemas de navegación quirúrgico diseñados para esta región anatómica. El desarrollo de un sistema de navegación quirúrgico adaptado a estas fracturas podría mejorar la precisión en la colocación de tornillos canulados, reducir complicaciones y favorecer los desenlaces funcionales a largo plazo. Con este propósito, se realizó una búsqueda tecnológica y científica exhaustiva hasta marzo de 2022, sin encontrarse publicaciones que reporten el desarrollo o evaluación de sistemas de navegación quirúrgico específicamente dirigidos a la fijación percutánea de la columna anterior del acetábulo. Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo principal diseñar un sistema de navegación quirúrgico para la fijación de fracturas de la columna anterior del acetábulo.

II. ANTECEDENTES

2.1. Anatomía del acetábulo.

Comentado [MS4]: Los espacios después de los subtítulos se pueden quitar, hacen el documento más largo.

El acetábulo se forma por la unión de los tres huesos pélvicos —ilíon, isquion y pubis—, que convergen en el cartílago trirradiado en la porción anterior, inferior y lateral del anillo pélvico **(5)**. Esta estructura articula con la cabeza femoral para constituir la articulación coxofemoral, una articulación sinovial y esférica que desempeña un papel esencial en la transmisión de cargas y en el mantenimiento de una marcha funcional **(1)**. La región superior de su superficie articular recibe el nombre de cúpula de carga, ya que soporta el peso que se transmite desde el tronco hacia el miembro inferior **(18)**.

Desde el punto de vista anatómico, el acetábulo puede representarse como una “Y” invertida, con un sólido soporte óseo que lo conecta con la articulación sacroilíaca **(19)**. Para fines de clasificación de fracturas, se ha descrito que está compuesto por dos columnas (anterior y posterior), dos paredes (medial y lateral) y un techo **(20)**. La columna anterior comprende la mitad anterior del ala ilíaca, el borde pélvico, la rama púbica superior y la porción anterior de la superficie articular acetabular; mientras que la columna posterior se extiende desde el margen superior de la escotadura ciática mayor, incluyendo las escotaduras ciáticas mayor y menor, hasta la tuberosidad isquiática **(19)**.

En cuanto a su irrigación, la superficie externa del acetábulo recibe aporte sanguíneo de las arterias glútea superior, glútea inferior, obturatriz y circunfleja femoral medial, mientras que la superficie interna se nutre principalmente de ramas de las arterias lumbar cuarta, iliolumbar y obturatriz **(21, 22)**.

Dada su compleja morfología y su participación en la articulación de carga de la cadera, cualquier fractura acetabular que no logre una reducción anatómica, ya sea mediante tratamiento quirúrgico o conservador, tendrá repercusiones

anatómicas, biomecánicas y funcionales, con impacto directo en la calidad de vida del paciente **(23, 24, 25)**.

2.2 Clasificación de las fracturas de acetábulo.

La clasificación de Judet y Letournel, propuesta en 1964, continúa siendo la más utilizada a nivel mundial para las fracturas acetabulares. Este sistema describe los patrones simples (posterior, anterior, transversal, entre otros) y combinados (como T o ambos pilares), proporcionando una base sólida para planificar la reducción y la fijación quirúrgica **(6)**.

La clasificación incluye cinco tipos: fractura de la pared posterior, la más común y relacionada con luxaciones de cadera; fractura de la columna posterior, que afecta la porción isquiática del acetábulo; fractura de la pared anterior, poco frecuente; fractura de la columna anterior, que compromete el borde púbico y la parte delantera del acetábulo; y fractura transversal, que divide el acetábulo de forma horizontal **(6)**.

Los patrones asociados o combinados son también cinco: columna posterior con pared posterior, donde coexisten ambas lesiones; fractura transversal con pared posterior; fractura en "T", que combina una línea transversal con otra vertical; fractura de columna anterior con hemitransversa posterior, que implica compromiso de ambas columnas; y fractura de ambas columnas, en la que la superficie articular queda completamente separada del resto de la pelvis **(6)**.

Esta clasificación no solo facilita la descripción anatómica de las fracturas, sino que además orienta la selección del abordaje quirúrgico y la estrategia de fijación, siendo la reducción anatómica del acetábulo un factor pronóstico clave para el resultado funcional y la prevención de artrosis postraumática.

Otras clasificaciones, como la de la AO/OTA **(26)**, han complementado este sistema, pero la de Letournel sigue siendo la referencia estándar.

La clasificación AO/OTA de las fracturas de acetábulo es una adaptación moderna y sistematizada de la de Judet y Letournel, que organiza los patrones en tres grandes grupos con subcategorías según su complejidad. Las fracturas tipo A corresponden a las parciales de una columna, donde parte del acetábulo permanece unida al ilion: incluyen fracturas de pared posterior, columna posterior y columna anterior con o sin pared anterior. Las fracturas tipo B son transversas o bifocales, en las que ambas columnas se ven afectadas pero aún existe continuidad entre ellas y con el ilion; aquí se incluyen las fracturas transversas simples, las transversas con pared posterior y las fracturas en "T". Finalmente, las fracturas tipo C corresponden a las ambas columnas, caracterizadas por una separación completa de la superficie articular respecto del ilion, lo que genera una disociación articular completa. Esta clasificación es jerárquica, del patrón más simple (tipo A) al más complejo (tipo C), y tiene la ventaja de facilitar la comunicación estandarizada, la investigación clínica y la elección del tratamiento, manteniendo correspondencia con los abordajes quirúrgicos que requiere cada tipo de fractura **(26)**.

El entendimiento de los patrones de fractura es crucial para definir el abordaje quirúrgico adecuado, predecir las dificultades técnicas y estimar el pronóstico funcional del paciente.

2.3 Técnicas de tratamiento quirúrgico para las fracturas de acetábulo.

El tratamiento quirúrgico de las fracturas de acetábulo constituye uno de los desafíos más complejos dentro de la cirugía ortopédica y traumatológica, ya que requiere un balance entre la restauración anatómica de la articulación y la minimización de complicaciones asociadas. La elección de la técnica depende

de múltiples factores: el tipo y patrón de fractura, el grado de desplazamiento, la estabilidad articular, la edad, las comorbilidades del paciente y su estado clínico general **(6, 7)**. Tradicionalmente, el gold standard ha sido la reducción abierta con fijación interna mediante placas de reconstrucción, un procedimiento que busca obtener una reducción anatómica directa de la superficie articular, restaurando la congruencia y la biomecánica normal de la cadera **(6)**. Esta estrategia favorece la rehabilitación temprana y disminuye la progresión hacia artrosis postraumática **(27, 28)**. Sin embargo, no está exenta de desventajas: se asocia con una morbilidad mayor, requiere incisiones amplias y un tiempo quirúrgico prolongado, además de un sangrado significativo y un mayor riesgo de infección **(29, 30)**. Asimismo, conlleva complicaciones potencialmente graves como lesión del nervio ciático, tromboembolismo y dificultades en la cicatrización de tejidos blandos **(31)**.

En las últimas décadas, han cobrado relevancia las técnicas mínimamente invasivas, especialmente la fijación percutánea con tornillos canulados, que resultan útiles en fracturas seleccionadas, como aquellas con desplazamiento mínimo o en pacientes con alto riesgo quirúrgico en los que una cirugía abierta representaría un peligro considerable **(8, 9, 32, 33, 34, 35)**. Estas técnicas ofrecen ventajas claras: menor sangrado, reducción en el tiempo quirúrgico, abordajes pequeños, menor tasa de infección y una recuperación postoperatoria más rápida **(8)**. No obstante, también presentan limitaciones significativas. La ausencia de visión directa del foco de fractura incrementa el riesgo de penetración intraarticular de los tornillos, colocación inadecuada del material, inestabilidad de la fijación y posible lesión de estructuras neurovasculares adyacentes **(8, 9)**. La correcta ejecución depende de manera crítica de la experiencia del cirujano, la disponibilidad de soporte radiológico intraoperatorio avanzado (fluoroscopia, navegación quirúrgica) y una planeación meticulosa. En este sentido, la tendencia actual apunta hacia una individualización del tratamiento, combinando la seguridad y eficacia de la cirugía abierta con la menor agresión de las técnicas percutáneas, siempre en función de las características del paciente y de la fractura.

2.4 Uso de la fluoroscopia en la reducción cerrada con colocación de tornillos canulados.

La fluoroscopia bidimensional ha sido durante décadas la herramienta principal para la colocación percutánea de tornillos en fracturas acetabulares. Este método ofrece ventajas como menor tiempo quirúrgico, reducción de la invasividad y menor sangrado intraoperatorio en comparación con los abordajes abiertos **(34)**. Sin embargo, sus limitaciones son significativas. La superposición de estructuras óseas dificulta la identificación precisa de referencias anatómicas, especialmente en la región anterior del acetábulo, donde la anatomía es más compleja **(32)**. Asimismo, la ausencia de proyecciones multiplanares impide una visión integral del canal óseo, lo que dificulta verificar en su totalidad la posición final del implante **(12)**. A esto se suma que el éxito del procedimiento depende en gran medida de la habilidad y experiencia del cirujano para interpretar imágenes bidimensionales y transformarlas mentalmente en referencias tridimensionales, lo cual representa un reto importante en fracturas con patrones complejos. Finalmente, la exposición a radiación durante estos procedimientos no es despreciable, afectando tanto al paciente como al personal quirúrgico **(36, 37)**.

Estas limitaciones incrementan el riesgo de complicaciones, como penetración intraarticular, lesión neurovascular, inestabilidad de la fijación y la necesidad de reintervenciones, comprometiendo los resultados funcionales a largo plazo **(38)**.

2.5 Uso de los sistemas de navegación quirúrgico en la reducción cerrada con colocación de tornillos canulados.

En respuesta a las dificultades del abordaje convencional, los sistemas de navegación quirúrgico se han consolidado como una herramienta innovadora para procedimientos ortopédicos complejos. Estos sistemas combinan imágenes intraoperatorias tridimensionales, como las obtenidas mediante tomografía o arco en C 3D, con software de planificación digital, lo que permite al cirujano visualizar la trayectoria del implante en múltiples planos y guiar su colocación en tiempo real (13, 15, 16).

La evidencia disponible ha mostrado múltiples beneficios: los sistemas de navegación aumentan la precisión en la colocación de implantes, reducen la tasa de mal posicionamiento y, en consecuencia, disminuyen las complicaciones asociadas como la perforación cortical o las lesiones neurovasculares (16, 17). También contribuyen a optimizar el tiempo quirúrgico, al facilitar la planeación y ejecución del procedimiento, y reducen la exposición a radiación para el paciente y el equipo quirúrgico al disminuir la cantidad de proyecciones necesarias (16, 33).

Estudios recientes han documentado la efectividad de la navegación en cirugías de pelvis, columna, rodilla y cadera, demostrando mejoras significativas en la seguridad y exactitud de la colocación de implantes (33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40). No obstante, estos sistemas han sido diseñados principalmente para fracturas pélvicas posteriores o fijaciones sacroilíacas, y hasta la fecha no existe en la literatura un sistema de navegación orientado específicamente a la fijación percutánea de la columna anterior del acetábulo, donde el riesgo anatómico y técnico es particularmente alto.

2.6 Estado actual de las tecnologías y sistemas de navegación quirúrgico para las fracturas de la columna anterior del acetábulo.

En los últimos años se han implementado diferentes estrategias para abordar las fracturas acetabulares, con el objetivo de evitar los abordajes amplios e invasivos que han sido considerados el estándar de oro. Entre estas nuevas alternativas destacan el uso de fluoroscopia avanzada, la fijación guiada por tomografía computarizada, la reconstrucción de modelos anatómicos en 3D, la tecnología de realidad aumentada y el desarrollo de sistemas de navegación quirúrgica, los cuales han ampliado el espectro de opciones disponibles para el tratamiento de estas lesiones complejas **(16, 32)**.

El uso de sistemas de navegación en cirugía ortopédica continúa en desarrollo, tanto a nivel nacional como internacional. La mayoría de los prototipos actuales se han enfocado en procedimientos de artroplastia de cadera más que en el tratamiento de fracturas acetabulares **(38, 39, 40)**. Ejemplo de ello es el sistema desarrollado en 2009 para mejorar el posicionamiento del componente acetabular durante artroplastia de cadera, que utilizó un marco colocado en la superficie del paciente como referencia para orientar instrumentos quirúrgicos y guías de posicionamiento **(41)**. Posteriormente, en 2020, se diseñó un sistema híbrido que combinaba navegación rotacional y traslacional mediante el uso de microcomputadoras, acelerómetros triaxiales, giroscopios, magnetómetros y transceptores de banda ultra ancha, logrando generar datos precisos sobre la orientación y el desplazamiento de los módulos de navegación **(42)**.

En el ámbito específico de las fracturas acetabulares, en 2018 se desarrolló en China un sistema de navegación para el tratamiento de fracturas de la columna posterior del acetábulo mediante fijación percutánea con tornillos canulados. Este proyecto, basado en la reconstrucción de modelos tridimensionales de pelvis a partir de tomografías computarizadas, demostró resultados prometedores en términos de factibilidad y precisión del procedimiento, abriendo el camino para el desarrollo de nuevas tecnologías en este campo **(43)**.

No obstante, a pesar de estos avances, la falta de tecnologías diseñadas específicamente para la fijación percutánea de fracturas de la columna anterior

del acetábulo sigue representando una limitación relevante en el abordaje moderno de estas lesiones. Para sustentar esta afirmación, se realizó una búsqueda tecnológica y científica exhaustiva hasta enero de 2025, sin encontrarse publicaciones que reportaran el desarrollo o evaluación de sistemas de navegación quirúrgico destinados específicamente a este fin.

Esta ausencia de evidencia respalda la necesidad de innovar, desarrollando un sistema que permita mejorar la precisión en la colocación de tornillos, reducir complicaciones asociadas al procedimiento y optimizar los resultados funcionales. En este contexto, el presente estudio plantea el diseño de un sistema de navegación quirúrgico —que incluirá tanto un software como un prototipo físico— para el tratamiento de las fracturas de la columna anterior del acetábulo mediante fijación percutánea con tornillos canulados.

III. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo y adopción de nuevas tecnologías quirúrgicas han transformado el abordaje de fracturas complejas, permitiendo procedimientos más seguros, precisos y menos invasivos. En el caso de las fracturas de acetábulo, el uso de sistemas de navegación y otras herramientas tecnológicas contribuye a reducir las tasas de complicaciones, optimizar la colocación de los implantes y mejorar los resultados funcionales postoperatorios.

El sistema de navegación quirúrgico que se propone en este proyecto tiene como finalidad apoyar a la fijación percutánea de fracturas de la columna anterior del acetábulo mediante el uso de tornillos canulados. Se espera que su implementación incremente la precisión en la colocación de los implantes, disminuya el tiempo quirúrgico y reduzca el sangrado intraoperatorio y la exposición a radiación en comparación con las técnicas guiadas únicamente por fluoroscopia. Con ello, este sistema representa una alternativa innovadora que puede elevar la tasa de éxito quirúrgico y mejorar la seguridad de los pacientes sometidos a este tipo de procedimientos.

IV. OBJETIVOS

Objetivo general.

Diseñar y desarrollar un sistema de navegación quirúrgico específico para la fijación percutánea con tornillos canulados en el tratamiento de fracturas de la columna anterior del acetábulo, mediante la integración de modelos tridimensionales generados a partir de estudios tomográficos, algoritmos de localización y guiado en tiempo real, y herramientas de planeación preoperatoria y ejecución intraoperatoria.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Diseño del estudio.

El diseño del estudio es de tipo innovación, experimental, longitudinal, prospectivo y descriptivo, realizado en el Servicio de Ortopedia y Traumatología del Hospital Universitario “Dr. José Eleuterio González” en Monterrey, Nuevo León, México. Este estudio está orientado en desarrollar un sistema de navegación quirúrgico para la fijación percutánea con tornillos canulados en fracturas de la columna anterior del acetábulo.

5.2 Diseño del software.

El software del dispositivo se ha concebido bajo un enfoque modular y distribuido, en el que cada subsistema cumple una función específica pero mantiene una comunicación bidireccional con un núcleo central de control y almacenamiento. Esta arquitectura garantiza un alto grado de escalabilidad, interoperabilidad y tolerancia a fallos, facilitando la integración de futuras mejoras tanto a nivel de hardware como de software Figura 1).

5.2.1 Entorno principal (Unity / C#).

El núcleo del sistema se desarrollará en la plataforma Unity, utilizando el lenguaje de programación C# para implementar las interacciones y la interfaz de usuario. Este módulo coordina el flujo de información, gestiona la comunicación con la base de datos

central y proporciona las herramientas de visualización necesarias para el cirujano. Además, procesa los modelos tridimensionales generados a partir de imágenes médicas (p. ej., tomografía computarizada) y permite la planificación preoperatoria de la trayectoria de los tornillos.

5.2.2 Subsistema de microcontroladores (C++).

Los microcontroladores estarán programados en C++ y tendrán la responsabilidad de gestionar la adquisición y el preprocesamiento de datos provenientes de sensores integrados en el dispositivo. Estos datos se transmitirán en tiempo real a la base de datos central, asegurando que el sistema cuente con información precisa y actualizada para la toma de decisiones intraoperatorias.

5.2.3 Control del brazo robótico (Python).

El brazo robótico estará gobernado mediante scripts en Python que establecerán un canal de comunicación directo con el entorno principal y la base de datos. Este módulo interpreta las órdenes enviadas desde Unity y las convierte en comandos de movimiento de alta precisión, utilizando algoritmos de control cinemático y dinámico. Asimismo, incorpora rutinas de retroalimentación para ajustar los movimientos según la información sensorial recibida.

5.2.4 Sistema de cámaras (Python).

El subsistema de visión estará implementado en Python y diseñado para capturar, procesar y transmitir datos visuales en tiempo real. Estos datos serán fundamentales para funciones avanzadas como la visión por computadora, el seguimiento de marcadores y la verificación de la colocación de implantes. La información obtenida se integrará automáticamente en la base de datos central para su análisis y correlación con otros parámetros intraoperatorios.

5.2.5 Base de datos central.

La base de datos actúa como el repositorio único y seguro de toda la información del sistema: datos de pacientes, parámetros quirúrgicos, telemetría de sensores, registros de video y resultados del procesamiento de imágenes. Su diseño estará orientado a garantizar baja latencia en consultas, redundancia y mecanismos de respaldo automáticos, cumpliendo con normativas de seguridad y privacidad de datos médicos.

5.2.6 Flujo de datos y comunicación.

Todos los módulos intercambian información a través de la base de datos central, que funciona como el bus lógico del sistema. Este esquema asegura que cualquier componente pueda acceder a la información más reciente sin depender de conexiones punto a punto, simplificando la escalabilidad y el mantenimiento.

Comentado [MS5]: No uses cuadros de texto para los pies de figura, no vas a poder actualizar el índice de figuras.

Arquitectura del software del sistema de navegación quirúrgico

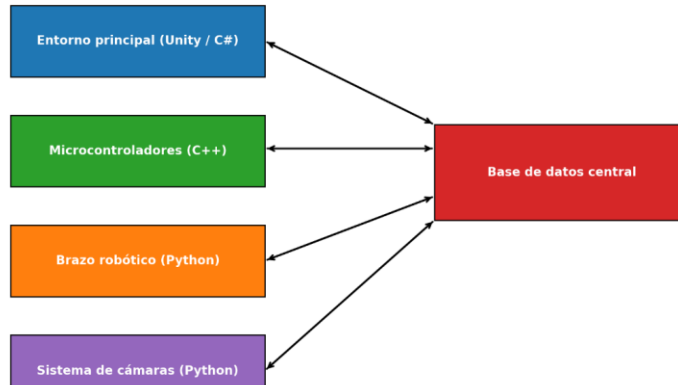


Figura 1: Diagrama de la arquitectura del software.

5.3 Diseño del hardware.

El sistema está construido sobre una estación de trabajo modular diseñada para maximizar funcionalidad, seguridad y ergonomía en entornos quirúrgicos de alta complejidad. Su arquitectura física combina componentes fijos, desplegables y móviles, integrados para trabajar de forma coordinada (Figura 2).

5.3.1 Unidad central de procesamiento.

Núcleo computacional de alto rendimiento encargado de ejecutar el software principal, procesar datos tridimensionales, manejar la interfaz de usuario y gestionar la comunicación con la base de datos central. Su capacidad de cálculo en tiempo real es

fundamental para procesar imágenes médicas, controlar el brazo robótico y coordinar los distintos módulos.

5.3.2 Base de datos central.

Repositorio seguro donde se almacena información de pacientes, parámetros quirúrgicos, datos de sensores, grabaciones de video e imágenes. Diseñada para baja latencia y alta disponibilidad, cumple con normativas de confidencialidad y seguridad de datos médicos.

5.3.3 Sistemas de visualización.

- Monitor de historial médico: muestra estudios preoperatorios y datos clínicos del paciente.
- Monitor táctil: permite ingresar datos, interactuar con la interfaz gráfica y controlar el sistema.
- Proyector holográfico con elevador motorizado: despliega representaciones tridimensionales de modelos anatómicos y trayectorias planificadas. Cuando no se utiliza, se retrae automáticamente dentro de la estación para su protección.

5.3.4 Sistema de alimentación eléctrica.

Una unidad de alimentación ininterrumpida (UPS) garantiza un suministro estable, protege frente a variaciones de voltaje y ofrece autonomía temporal ante interrupciones eléctricas.

Sensores y captura de datos: sensores estratégicamente dispuestos en compartimentos internos de la estación para optimizar accesibilidad y orden. Las cámaras, lentes y soportes se colocan previamente en el área quirúrgica, asegurando calibración y alineación antes del procedimiento.

Módulo robótico: el brazo robótico se aloja en la estación como una unidad independiente. Su diseño modular facilita el despliegue, mantenimiento y sustitución. Opera con movimientos de alta precisión controlados mediante software, integrando datos de la base central y retroalimentación de sensores.

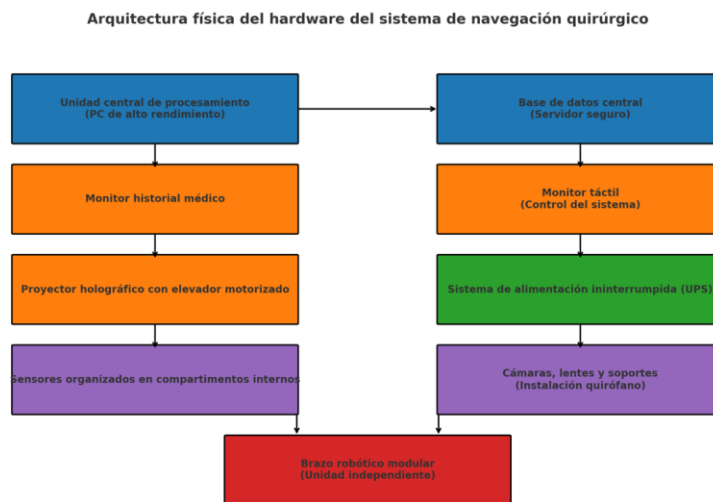


Figura 2: Diagrama de la arquitectura del hardware.

5.4 Asociación del sistema de navegación quirúrgico entre el software y el hardware.

El sistema desarrollado consiste en un prototipo de navegación quirúrgica asistido por robot, diseñado para integrar información en tiempo real proveniente de distintos sensores, controladores y dispositivos de visualización. En el módulo de hardware se incluyeron sensores de distancia y de posición cuyos datos fueron procesados mediante códigos implementados en Arduino. Esta información se envía a través de un broker de comunicación MQTT, el cual

facilita la transmisión entre módulos y asegura la interoperabilidad del sistema. Paralelamente, se integró una base de datos con información clínica del paciente, capturada a través de un monitor táctil y un módulo de entrada de datos, que permite centralizar y correlacionar variables preoperatorias y transoperatorias (Figura 3).

El sistema central, desarrollado en Python, recibe y procesa señales provenientes de cámaras externas, así como del controlador del robot. A partir de esta información, se coordinan los movimientos de un brazo robótico, un perforador y un protector retráctil de tejidos blandos, con el fin de optimizar la seguridad y precisión del procedimiento. De manera complementaria, la integración con un programa de Unity y un proyector holográfico posibilita la representación tridimensional de la anatomía y de las trayectorias instrumentales, brindando al cirujano retroalimentación visual en tiempo real. El diseño global favorece la modularidad, la escalabilidad y la posibilidad de interacción remota, lo que convierte este sistema en una plataforma experimental para la validación de técnicas de cirugía mínimamente invasiva y cirugía asistida por computadora.

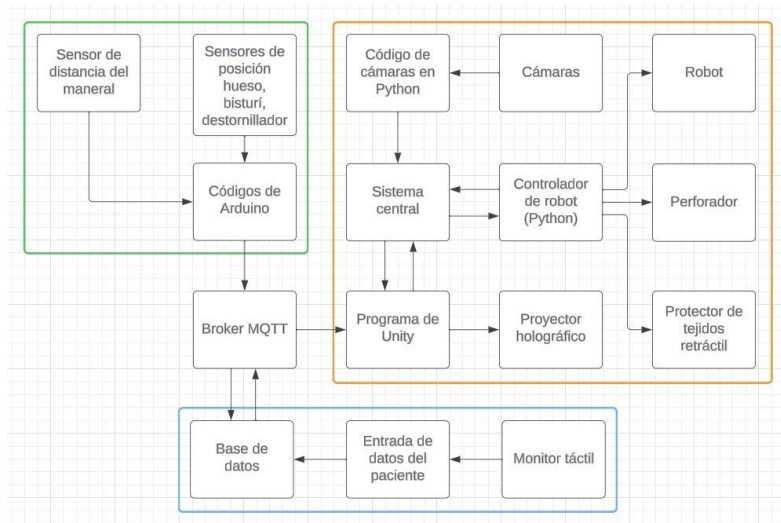


Figura 3: Arquitectura del sistema de navegación quirúrgica asistida por robot. Se muestran los módulos principales: sensores y microcontrolador (verde), procesamiento central con control robótico y visualización (naranja) y gestión de datos clínicos (azul).

VI. RESULTADOS

6.1 Desarrollo del sistema de navegación quirúrgico

El sistema de navegación quirúrgico desarrollado en este trabajo constituye un ecosistema modular y escalable diseñado para asistir al cirujano ortopedista en procedimientos de fijación acetabular. La propuesta integra de manera coordinada diferentes subsistemas: la adquisición de datos a través de sensores inerciales (IMUs) y marcadores ópticos, la planeación tridimensional basada en archivos DICOM, la visualización intraoperatoria en un entorno 3D inmersivo y un brazo robótico con módulos intercambiables que permiten tanto la inspección del campo quirúrgico como la perforación guiada. Todo el conjunto está orquestado mediante una capa de control central que emplea protocolos de comunicación inalámbrica de baja latencia, lo que garantiza fluidez en el intercambio de datos y consistencia entre los distintos componentes.

El objetivo principal de este ecosistema es reducir la dependencia de la fluoroscopia intraoperatoria, limitándola a entre 2 y 4 verificaciones puntuales, en contraste con el uso intensivo que se hace actualmente en la mayoría de los procedimientos de fijación acetabular. A través de este enfoque se busca disminuir la exposición a radiación ionizante tanto del equipo quirúrgico como del paciente, al tiempo que se proporciona una retroalimentación multimodal: visual (modelos 3D y alertas en pantalla), sonora (avisos de seguridad) y háptica (sensaciones táctiles en los controles), con el fin de aumentar la precisión y la repetibilidad del procedimiento.

La arquitectura en capas del sistema se organiza de la siguiente manera:

- Adquisición y registro: fijación de IMUs a referencias anatómicas y colocación de marcadores ópticos co-localizados para proporcionar datos de posición y orientación con alta resolución.

- Planeación y navegación: reconstrucción 3D del fémur a partir de estudios de tomografía computarizada en formato DICOM, cálculo automatizado de trayectorias óptimas para la colocación de pines fijadores y definición de zonas de exclusión para evitar estructuras críticas.
- Actuación y guiado: ejecución mediante un brazo robótico con capacidad de cambio rápido de herramienta, control de fuerza y avance durante la perforación, e integración de un protector de tejidos para disminuir el riesgo de lesiones.
- Interacción clínica: interfaz gráfica tridimensional intraoperatoria y un panel web de apoyo, que permiten tanto la preparación preoperatoria como la trazabilidad del procedimiento y el almacenamiento de métricas relevantes.

6.1.1 Desarrollo del sistema software

El software se desarrolló bajo los lineamientos de la norma IEC 62304, que establece criterios de seguridad y confiabilidad en software médico. La arquitectura se diseñó con separación por capas y con un modelo modular que permite aislar funciones críticas, ejecutar pruebas de integración en cada etapa y mantener registros de auditoría para trazabilidad.

6.1.2 Desarrollo del sistema robótico

El sistema robótico diseñado en este proyecto no funciona de manera aislada, sino que está profundamente integrado con el ecosistema de software que lo

gobierna. Para lograr una coordinación fluida y precisa, se desarrollaron varios módulos especializados, cada uno implementado en lenguajes y plataformas distintas, seleccionadas por su idoneidad para la función asignada.

6.1.2.1 Gemelo digital intraoperatorio (Unity/C#):

Este componente constituye la representación virtual del sistema dentro del quirófano. Se implementó en Unity utilizando C# por su versatilidad en entornos gráficos tridimensionales y su capacidad para manejar interacción en tiempo real. El gemelo digital permite visualizar el hueso, el brazo robótico y las herramientas con alta fidelidad. Además de la representación visual, incorpora alertas dinámicas cuando se detecta una desviación de la trayectoria planificada, lo que ofrece al cirujano un mecanismo inmediato de retroalimentación. El gemelo también incluye controles básicos de navegación que facilitan la exploración del modelo durante la cirugía. Con esto, se crea un puente entre el mundo físico y el virtual, permitiendo validar y simular movimientos antes de ejecutarlos en el paciente.

6.1.2.2 Control central y visión/procesamiento (Python).

El módulo desarrollado en Python funciona como el "cerebro lógico" del sistema. Aquí se realizan los cálculos de trayectorias, tanto preoperatorios como intraoperatorios, empleando algoritmos de cinemática directa e inversa para el movimiento del brazo robótico. Asimismo, gestiona la fusión sensorial entre datos provenientes de IMUs y marcadores ópticos, de manera que se obtenga un registro anatómico confiable aun cuando uno de los sistemas de sensado presente error o ruido. En paralelo, este módulo se encarga de la orquestación de los movimientos robóticos, traduciendo las órdenes quirúrgicas

en comandos ejecutables que son enviados al controlador del brazo. Finalmente, el submódulo de visión por computadora procesa imágenes y video en tiempo real para el seguimiento de marcadores y la verificación automática de la reducción ósea.

6.1.2.3 Firmware de sensado (Arduino/C++).

El subsistema de sensado fue implementado en microcontroladores programados en C++, con soporte de Arduino para la adquisición de datos. Este firmware tiene como tarea principal la lectura filtrada de señales de IMUs, aplicando algoritmos básicos de fusión de sensores (acelerómetro + giroscopio) para reducir errores de drift. Una de sus características críticas es la capacidad de manejar desconexiones en caliente sin comprometer la estabilidad del sistema, gracias a protocolos de reconexión automática y redundancia de telemetría. Este nivel de robustez resulta esencial en un entorno quirúrgico, donde la pérdida de datos en tiempo real podría comprometer la seguridad de la intervención.

6.1.2.4 Planeación y trazabilidad (Java/MySQL).

Para la planeación quirúrgica y el registro de datos se implementó un módulo en Java conectado a una base de datos en MySQL. Esta capa permite cargar directamente los archivos DICOM provenientes de tomografías, realizar la segmentación básica y seleccionar parámetros relevantes del procedimiento. Además, cada procedimiento queda almacenado en la base de datos junto con métricas como tiempos quirúrgicos, número de verificaciones fluoroscópicas y parámetros del robot, lo que asegura la trazabilidad clínica y la reproducibilidad de resultados. Esta información es vital para análisis postoperatorios, auditorías clínicas y estudios comparativos.

6.1.2.5 Comunicaciones.

El último componente clave es la capa de comunicaciones, que asegura la interacción fluida entre todos los módulos mencionados. Está basada en protocolos ligeros de mensajería (como MQTT), capaces de transmitir en tiempo real los datos de telemetría, las órdenes de movimiento y los eventos críticos. La arquitectura se diseñó bajo el principio de baja latencia y alta confiabilidad, permitiendo que los comandos emitidos desde el software central sean ejecutados por el brazo robótico con un retraso mínimo y que las señales de retroalimentación sensorial se sincronicen con el gemelo digital.

6.1.2.6 Pruebas de verificación

Para garantizar la confiabilidad del sistema de navegación quirúrgico y su potencial aplicación en entornos clínicos, se establecieron procesos de validación, pruebas sistemáticas, generación de documentación técnica y medidas específicas de privacidad y ciberseguridad. Estos elementos constituyen pilares fundamentales para la aceptación y posterior escalabilidad del prototipo.

6.1.2.6.1 Pruebas unitarias por módulo.

Cada subsistema del sistema fue sometido a pruebas unitarias con el objetivo de asegurar su correcto funcionamiento de manera aislada antes de proceder a la integración global. Por ejemplo, en el firmware de sensado se evaluó la lectura en tiempo real de los IMUs, la estabilidad del filtrado de señales y la

capacidad de reconexión tras desconexiones simuladas. En el módulo de cálculo de trayectorias se probaron algoritmos de cinemática directa e inversa, verificando la precisión de los cálculos frente a modelos de referencia. En los parsers DICOM se evaluó la correcta interpretación de imágenes médicas, su segmentación básica y la coherencia en la reconstrucción 3D. Estas pruebas iniciales permitieron identificar errores tempranos y corregirlos sin comprometer el desarrollo del ecosistema.

6.1.2.6.2 Integración continua.

Una vez validados los módulos individuales, se implementó un proceso de integración continua, cuyo propósito fue comprobar la coherencia de datos y funcionamiento global. Esto incluyó la verificación de la comunicación entre el entorno Unity (gemelo digital) y el módulo en Python (control central), asegurando que las trayectorias planificadas y los movimientos ejecutados fueran consistentes. Asimismo, se verificó la sincronización entre el panel web, la base de datos y la capa de comunicaciones, confirmando que los registros de procedimientos, métricas e interacciones clínicas se almacenaran de manera uniforme y en tiempo real. El enfoque de integración continua no solo validó la interoperabilidad de los sistemas, sino que también permitió la detección rápida de incompatibilidades entre versiones de software.

6.1.2.6.3 Documentación técnica.

Como parte esencial del ciclo de vida del prototipo, se generó una documentación detallada y estructurada que incluyó:

- **Manual de usuario:** orientado al personal clínico, explicando el flujo de trabajo básico, desde la carga de imágenes médicas hasta la interacción con el gemelo digital y el brazo robótico.
- **Guías de instalación:** con instrucciones paso a paso para la correcta implementación del software y la configuración del hardware, incluyendo dependencias, librerías y conexiones.
- **Manual de mantenimiento y actualización:** destinado a los equipos técnicos encargados de dar soporte al sistema, con protocolos de diagnóstico, sustitución de componentes y actualizaciones de software y firmware.

La existencia de esta documentación asegura la transferencia de conocimiento a futuros usuarios y desarrolladores, y proporciona un marco de referencia para la certificación del sistema en fases posteriores.

6.1.2.7 Privacidad y bioseguridad.

Dado que el sistema gestiona información clínica sensible, se implementaron medidas robustas de seguridad que cumplen con lineamientos de protección de datos médicos. Se estableció la segmentación de la red intra-quirófano, evitando que los módulos críticos del sistema se comuniquen con redes externas sin autorización. Además, se desarrolló un esquema de usuarios y privilegios, de manera que cada perfil (cirujano, técnico, administrador) cuenta con permisos diferenciados.

Los datos son cifrados en tránsito y en reposo, garantizando que tanto las transmisiones en tiempo real como la información almacenada en la base de datos permanezcan protegidas frente a accesos no autorizados. Finalmente, se habilitó un sistema de bitácoras con retención regulada, en el que se registran

todos los eventos relevantes (inicio de sesión, comandos ejecutados, cambios de configuración), lo que facilita auditorías posteriores y asegura la trazabilidad.

6.1.2.8 Rangos de movimiento del codo

El brazo robótico desarrollado en este proyecto cuenta con seis grados de libertad (DOF) distribuidos a lo largo de sus articulaciones principales: base, hombro, codo y muñeca. Esta configuración ofrece un rango de movilidad comparable al de un miembro superior humano, lo cual resulta fundamental en el contexto quirúrgico, ya que permite alcanzar la pelvis y el acetábulo desde diferentes ángulos y trayectorias, adaptándose a la posición del paciente en la mesa quirúrgica (Figura 4).

Cada una de estas articulaciones presenta un rango angular de trabajo que fue definido como especificación objetivo, buscando un equilibrio entre amplitud de movimiento, precisión y seguridad. Los rangos máximos y mínimos delimitan la capacidad del robot para ejecutar tareas críticas, como el posicionamiento de herramientas, el ajuste de ángulos durante la perforación o el acceso a zonas anatómicas de difícil visualización. Al mismo tiempo, estos rangos actúan como límites de seguridad, evitando que el brazo se desplace fuera de la zona de trabajo o que ejecute movimientos que puedan comprometer la integridad del paciente o del equipo quirúrgico (Tabla 1).

- Joint 1 (Base): proporciona la rotación sobre el eje vertical, equivalente al movimiento de giro de un torso humano. Esta articulación permite orientar el robot hacia la región de interés sin necesidad de reubicar físicamente la base.
- Joint 2 (Hombro): encargado de la elevación y descenso del brazo robótico, facilita el acceso desde diferentes planos y asegura que la herramienta pueda aproximarse de forma ergonómica a la pelvis.

- Joint 3 (Codo): permite la flexión y extensión, acercando o alejando la herramienta del sitio quirúrgico, lo que ofrece versatilidad en el alcance y la profundidad de trabajo.
- Joint 4, 5 y 6 (Muñeca): corresponden a los ejes de orientación fina. Estos permiten rotación axial, inclinación lateral y torsión de precisión, respectivamente. Su función es garantizar que la herramienta (taladro, cámara u otro accesorio) pueda alinearse de manera exacta con la trayectoria planificada en el software, incluso en espacios anatómicos reducidos.

La disponibilidad de rotaciones amplias (algunas de ellas con hasta 360° de movilidad) asegura que el robot no tenga restricciones en procedimientos que requieren ajustes continuos de orientación. Sin embargo, los límites de cada articulación no solo responden a la capacidad mecánica del diseño, sino también a consideraciones de seguridad quirúrgica y ergonomía, ya que en un entorno real el robot debe operar con fluidez pero sin generar interferencias con el equipo médico o con el propio paciente (Figura 5) (Figura 6) (Figura 7).

Tabla 1. Rangos de movimientos del codo.

Codo	Ángulo mínimo	Ángulo máximo
Articulación 1	-360 grados	360 grados
Articulación 2	-360 grados	360 grados
Articulación 3	-360 grados	360 grados
Articulación 4	-360 grados	360 grados
Articulación 5	-360 grados	360 grados
Articulación 6	-360 grados	360 grados

Comentado [MS6]: Hay que insertar la tabla.

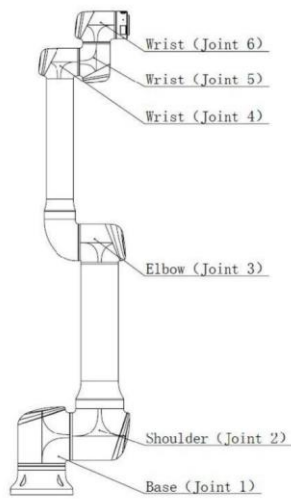


Figura 4: Prototipo del robot, junto con sus 6 codos.



Figura 5: Prototipo de carcasa del sistema de navegación: vista anterolateral.



Figura 6: Prototipo del robot junto a sus codos, versión desnuda: vista anterolateral.



Figura 7: Prototipo final del robot junto con sus codos: vista anterolateral.

VII. DISCUSIÓN

El presente trabajo describe el diseño y desarrollo de un sistema de navegación quirúrgico específico para la fijación percutánea con tornillos canulados en fracturas de la columna anterior del acetábulo, integrando planeación tridimensional a partir de DICOM, un gemelo digital intraoperatorio en Unity/C#, sensado inercial y óptico, capa de control en Python, comunicaciones en MQTT y un módulo robótico de 6 grados de libertad. Este ecosistema busca reducir la dependencia de la fluoroscopia bidimensional, mejorar la precisión en la trayectoria de tornillos y disminuir la exposición a radiación, todo ello con un flujo de trabajo modular, trazable y alineado con principios de ciclo de vida de software médico.

En acetábulo, la fijación percutánea es atractiva por su menor agresión de partes blandas, tiempos quirúrgicos más cortos y potencial reducción de complicaciones infecciosas **(8)**; sin embargo, es técnicamente demandante por la complejidad anatómica y el riesgo de penetración intraarticular o lesión neurovascular cuando se depende exclusivamente de imágenes 2D **(9)**. La literatura respalda que la navegación 3D y los sistemas de guía reducen la tasa de tornillos mal posicionados y, en varias series, disminuyen dosis de radiación frente a fluoroscopia convencional, hallazgos mostrados con solidez en la pelvis posterior y el anillo pélvico. **(16, 33)**.

Para la columna anterior, la evidencia publicada es más escasa, pero existen trabajos con navegación 3D que documentan viabilidad y mayor exactitud de tornillos percutáneos en columna anterior frente a técnicas 2D, apoyando el trasladar las ventajas de la navegación a esta región anatómica de mayor complejidad **(43)**. Asimismo, revisiones y estudios comparativos en pelvis muestran consistentemente que las plataformas de navegación 3D y fluoroscopia 3D guiada mejoran exactitud y reducen malposición **(44)**.

Más recientemente, marcos híbridos han mostrado errores angulares de 3–4° para posicionamiento acetabular en artroplastia y resultados ex vivo prometedores para tornillos pélvicos con navegación por realidad aumentada, sugiriendo que la fusión de sensado inercial/óptico y visualización estereoscópica puede ofrecer guiado intraoperatorio con menor irradiación **(42)**.

Aportaciones técnicas del sistema.

El sistema desarrollado integra diversas aportaciones técnicas de relevancia. En primer lugar, el gemelo digital intraoperatorio programado en Unity/C# permite una visualización tridimensional del procedimiento, genera alertas en caso de desviación y ofrece verificación dinámica de trayectorias, elementos que coinciden con los avances actuales en cirugía ortopédica orientados a mejorar la orientación espacial y la precisión en la colocación de implantes, además de servir como herramienta de entrenamiento y simulación **(41, 42)**.

A ello se suma la fusión sensorial de IMU con marcadores ópticos, la cual aprovecha la complementariedad de ambos métodos para contrarrestar sus debilidades inherentes (deriva en el caso de las IMU y oclusiones en el caso del seguimiento óptico), alineándose con los abordajes de realidad aumentada libres de radiación que han sido evaluados en procedimientos pélvicos **(41)**.

Otro aspecto esencial es la arquitectura modular con capa de comunicaciones mediante MQTT y base de datos integrada, que posibilita la interoperabilidad, asegura baja latencia y garantiza la trazabilidad clínica, además de favorecer la integración continua y la evaluación sistemática del desempeño, requisitos indispensables para la transición hacia validaciones clínicas y eventual certificación regulatoria. Finalmente, el sistema se diseñó bajo los lineamientos de la norma IEC 62304 para software médico, lo que se refleja en la separación por capas, la implementación de pruebas unitarias, la integración continua, la

documentación en bitácoras y la gestión de riesgos, medidas que aseguran el cumplimiento de estándares internacionales para dispositivos cuyo funcionamiento puede impactar directamente en la seguridad del paciente.

Comparación con el estado del arte específico en acetábulo.

Existen reportes de navegación para columna posterior y casos aislados de tornillos acetabulares con navegación **(41)**; sin embargo, sigue habiendo vacíos en soluciones enfocadas a columna anterior con integración robótica y gemelo digital. Nuestro trabajo desarrolló un sistema dedicado a esta región, con control robótico de 6 DOF y protocolos de verificación, algo poco descrito en la literatura pública hasta fechas recientes.

Fortalezas metodológicas.

Entre las principales fortalezas metodológicas del sistema destaca su diseño modular, el cual, acompañado de pruebas unitarias e integración continua, permite aislar posibles fallas y garantizar la coherencia de los datos en cada etapa del proceso (desde los sensores hasta la planeación y la ejecución). Asimismo, la implementación de un panel de control y una base de datos centralizada facilita la trazabilidad de métricas clave, tales como el número de proyecciones utilizadas, los tiempos quirúrgicos, los parámetros de funcionamiento del robot y los resultados obtenidos en el posicionamiento de los tornillos, lo cual constituye un punto de partida sólido para futuros estudios comparativos prospectivos. Finalmente, el sistema incorpora medidas robustas de privacidad y ciberseguridad, que incluyen segmentación de red, gestión jerarquizada de usuarios y roles, cifrado de la información tanto en tránsito

como en reposo, además de bitácoras auditables, todo ello en concordancia con las exigencias regulatorias internacionales aplicables a dispositivos médicos digitales.

Limitaciones.

Las principales limitaciones de este trabajo se relacionan con la etapa de innovación en la que se encuentra el sistema. En primer lugar, al tratarse de un prototipo, aún no se han reportado métricas de exactitud como el error angular o traslacional, la tasa de perforación cortical o la distancia a superficies articulares, por lo que resulta imprescindible llevar a cabo validaciones ex vivo y clínicas que permitan comparar directamente su desempeño con técnicas convencionales de fluoroscopia 2D y 3D.

Asimismo, la estabilidad del registro anatómico y del sistema de tracking representa un desafío relevante, ya que la fusión de datos inerciales y ópticos requiere cuantificarse frente a referencias rígidas (como anclajes óseos o fiduciales externos), considerando que la acumulación de error por deriva u oclusiones podría comprometer la seguridad en trayectorias estrechas del pilar anterior. A esto se suma la curva de aprendizaje inherente al uso de nuevas tecnologías, que si bien busca simplificar la navegación, implica entrenamiento específico y un posible incremento inicial en los tiempos quirúrgicos.

Otra limitación corresponde a la generalización anatómica, ya que las fracturas con alta conminución o con deformidades pélvicas previas podrían modificar las referencias de navegación y alterar las zonas seguras, por lo que será necesario evaluar la robustez del sistema ante la variabilidad morfológica.

Finalmente, debe considerarse el marco regulatorio: la transición de prototipo a producto clínico requiere profundizar en la gestión de riesgos bajo ISO 14971, la usabilidad según IEC 62366, la clasificación y validación conforme a IEC 62304,

así como en la construcción de una estrategia de evidencia clínica que satisfaga los requerimientos de las autoridades regulatorias locales e internacionales.

En conjunto, el prototipo que se presenta cierra una brecha en soluciones de navegación específicamente orientadas a la columna anterior del acetábulo, propone una arquitectura tecnológicamente contemporánea (gemelo digital + fusión sensorial + robot) y se alinea con las direcciones que marca la literatura reciente en navegación 3D, AR y robótica ortopédica. La hipótesis de menor irradiación y mayor exactitud es verosímil a la luz de la evidencia en pelvis, pero requiere la demostración cuantitativa en el escenario anatómico exacto del estudio.

VIII. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de navegación quirúrgico modular y escalable, orientado a la fijación percutánea de fracturas de la columna anterior del acetábulo, que integra planeación tridimensional basada en DICOM, un gemelo digital en Unity/C#, fusión de sensado inercial y óptico, comunicaciones mediante MQTT, trazabilidad de datos clínicos y un brazo robótico de seis grados de libertad con potencial para guiar perforación y proteger estructuras en tiempo real.

La propuesta tecnológica se encuentra en consonancia con la dirección del estado del arte, ya que la literatura ha demostrado que la navegación 3D y las técnicas guiadas disminuyen la malposición de tornillos y reducen la exposición a radiación en la pelvis; aunque la evidencia específica en la columna anterior aún es limitada, los reportes en acetábulo, anillo pélvico y las experiencias recientes con realidad aumentada y asistencia robótica respaldan la plausibilidad de los beneficios clínicos del enfoque planteado. Además, el sistema incorpora buenas prácticas de ciclo de vida de software médico (IEC 62304) y medidas de privacidad y ciberseguridad, aspectos esenciales para su futura certificación y eventual transferencia a la práctica clínica.

No obstante, persisten limitaciones relevantes, entre ellas la necesidad de validar la exactitud geométrica de las trayectorias, la tasa de perforación cortical e intraarticular, el tiempo quirúrgico y la exposición a radiación en comparación con los estándares 2D y 3D, así como confirmar la estabilidad del registro anatómico en escenarios con variabilidad morfológica y flujo intraoperatorio real. Los próximos pasos deben incluir validaciones ex vivo con modelos y cadáveres para cuantificar error angular y lineal, ensayos prospectivos comparativos frente a fluoroscopia 2D y 3D con desenlaces de exactitud, radiación, complicaciones y función, además de la integración de realidad aumentada y control de fuerza/torque para optimizar seguridad y disminuir aún más la irradiación. En conjunto, este trabajo sienta las bases para una plataforma de navegación y asistencia robótica dedicada a la columna anterior del acetábulo que, de

confirmarse en estudios preclínicos y clínicos, podría mejorar la precisión quirúrgica, reducir la radiación y acelerar la recuperación de los pacientes, ofreciendo así una alternativa mínimamente invasiva más segura y reproducible a la práctica actual.

IX. BIBLIOGRAFÍA

1. Hoge S, Rednam M, Chauvin BJ. Acetabular Fractures. [Updated 2023 Jul 4]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544315/>
2. Albrektsson, M., Möller, M., Wolf, O., Wennergren, D., & Sundfeldt, M. (2023). Acetabular fractures: Epidemiology and mortality based on 2,132 fractures from the Swedish Fracture Register. *Bone & Joint Open*, 4(9), 652–658. <https://doi.org/10.1302/2633-1462.49.BJO-2023-0085.R1>
3. Cahueque, M., Martínez, M., Cobar, A., & Bregni, M. (2017). Early reduction of acetabular fractures decreases the risk of post-traumatic hip osteoarthritis? *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 8(4), 320–326. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2017.01.001>
4. Kavak, M., Çeliksöz, A. H., Tokmak, B., & Inan, U. (2023). Analysis of predictive factors for post-traumatic osteoarthritis and poor outcomes in acetabular fractures treated surgically. *Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica*, 57(4), 141–147. <https://doi.org/10.5152/j.aott.2023.22124>
5. Kumar Sharma, S., & Mathur, H. (2020). Surgical anatomy of acetabulum and biomechanics. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92330>
6. Judet, R., Judet, J., & Letournel, E. (1964). Fractures of the acetabulum: Classification and surgical approaches for open reduction. Preliminary report. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 46, 1615–1646.
7. Cheng, E. Y., & Bastian, J. D. (2019). Selecting surgical approaches for treatment of acetabular fractures. *JBJS Essential Surgical Techniques*, 9(1), e4. <https://doi.org/10.2106/JBJS.ST.18.00102>

8. Einhorn, S., Höch, A., Osterhoff, G., Josten, C., Kleber, C., & Pieroh, P. (2023). Comparison of percutaneous screw fixation to open reduction and internal fixation in acetabular fractures: A matched pair study regarding the short-term rate of conversion to total hip arthroplasty and functional outcomes. *Journal of Clinical Medicine*, 12(3), 1163. <https://doi.org/10.3390/jcm12031163>
9. Caviglia, H., Mejail, A., Landro, M. E., & Fernández, J. A. (2018). Percutaneous fixation of acetabular fractures. *EFORT Open Reviews*, 3(5), 326–334. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.3.170054>
10. Kelly, J., Ladurner, A., & Rickman, M. (2020). Surgical management of acetabular fractures: A contemporary literature review. *Injury*, 51(10), 2267–2277. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2020.06.016>
11. Alsheikh, K. A., Alzahrani, A. M., Alshehri, A. S., Alzahrani, F. A., Alqahtani, Y. S., Alhumaidan, M. I., & Alangari, H. S. (2022). Clinical outcomes of percutaneous screw fixation of acetabular fracture: A minimally invasive procedure. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 18(2), 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2022.09.015>
12. Gharib, M., Mohammadi, S., Mohammadi, M. R., Maghbouli, N., & Nabian, M. H. (2024). Challenges of using C-arm fluoroscopy systems: A mixed method study investigating orthopedic surgeons' experience. *Journal of Iran Medical Council*, 7(2), 344–350.
13. Ewurum, C. H., Guo, Y., Pagnha, S., Feng, Z., & Luo, X. (2018). Surgical navigation in orthopedics: Workflow and system review. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1093, 47–63. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1396-7_4
14. Zheng, G., & Nolte, L. P. (2018). Computer-aided orthopaedic surgery: State-of-the-art and future perspectives. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1093, 1–20. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1396-7_1

15. Takao, M., Hamada, H., Sakai, T., & Sugano, N. (2018). Clinical application of navigation in the surgical treatment of a pelvic ring injury and acetabular fracture. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1093, 289–305. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1396-7_22
16. Florio, M., Capasso, L., Olivi, A., Vitiello, C., Leone, A., & Liuzza, F. (2020). 3D-navigated percutaneous screw fixation of pelvic ring injuries: A pilot study. *Injury*, 51(Suppl 3), S28–S33. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2020.07.025>
17. Cintean, R., Schütze, K., Gebhard, F., & Pankratz, C. (2025). Minimal-invasive stabilisation von acetabulumfrakturen mit virtueller navigation in kombination mit robotergestützter 3-D-bildgebung [Minimally invasive stabilization of acetabular fractures with virtual navigation combined with robot-assisted 3D imaging]. *Operative Orthopädie und Traumatologie*, 37(1), 14–22. <https://doi.org/10.1007/s00064-024-00872-8>
18. Anderson, C. N., Riley, G. M., Gold, G. E., & Safran, M. R. (2013). Hip-femoral acetabular impingement. *Clinics in Sports Medicine*, 32(3), 409–425. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2013.03.010>
19. Drake, R. L., Vogl, A. W., & Mitchell, A. W. M. (2020). *Gray's anatomía para estudiantes*. Elsevier.
20. Scott, A. N. (2021, noviembre). Pelvis 1: Anatomy of the pelvis and acetabulum [Presentación en PDF]. *Orthopaedic Trauma Association*. <https://ota.org/sites/files/2021-11/Pelvis%201%20Anatomy%20of%20the%20Pelvis%20and%20Acetabulum.pdf>
21. Seeley, M. A., Georgiadis, A. G., & Sankar, W. N. (2016). Hip vascularity: A review of the anatomy and clinical implications. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 24(8), 515–526. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-15-00237>

22. Kalhor, M., Beck, M., Huff, T. W., & Ganz, R. (2009). Capsular and pericapsular contributions to acetabular and femoral head perfusion. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 91(2), 409–418. <https://doi.org/10.2106/JBJS.G.01679>
23. Olson, S. A., Bay, B. K., Chapman, M. W., & Sharkey, N. A. (1995). Biomechanical consequences of fracture and repair of the posterior wall of the acetabulum. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 77(8), 1184–1192. <https://doi.org/10.2106/00004623-199508000-00007>
24. Konrath, G. A., Hamel, A. J., Sharkey, N. A., Bay, B., & Olson, S. A. (1998). Biomechanical evaluation of a low anterior wall fracture: Correlation with the CT subchondral arc. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 12(3), 152–158. <https://doi.org/10.1097/00005131-199803000-00003>
25. Olson, S. A., Bay, B. K., & Hamel, A. (1997). Biomechanics of the hip joint and the effects of fracture of the acetabulum. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 339, 92–104. <https://doi.org/10.1097/00003086-199706000-00013>
26. Meinberg, E., Agel, J., Roberts, C. S., Karam, M. D., & Kellam, J. F. (2018). *Fracture and dislocation classification compendium—2018. Journal of Orthopaedic Trauma*, 32(1, Suppl), S1–S170. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000001063>
27. Gross, S. C. (n.d.). *Rehabilitation protocol: Acetabulum fracture repair* [PDF]. Boulder Centre for Orthopedics & Spine. <https://www.boulderfractures.com/pdf/acetabulum-fracture-repair-rehab.pdf>
28. Ivanova, S., Prochazka, O., Giannoudis, P. V., Tosounidis, T., Tannast, M., & Bastian, J. D. (2023). Rehabilitation protocols for surgically treated acetabular fractures in older adults: Current practices and outcomes. *Journal of Clinical Medicine*, 14(14), 4912. <https://doi.org/10.3390/jcm14144912>

29. Lundin, N., Berg, H. E., & Enocson, A. (2023). Complications after surgical treatment of acetabular fractures: a 5-year follow-up of 229 patients. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, 33(4), 1245–1253. <https://doi.org/10.1007/s00590-022-03284-1>
30. Meena, U. K., Tripathy, S. K., Sen, R. K., Aggarwal, S., & Behera, P. (2013). Predictors of postoperative outcome for acetabular fractures. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 99(8), 929–935. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2013.09.004>
31. Gao, Y. S., Zhou, Z. B., Tang, M. J., Yu, X. W., Chen, S., Zhang, C. Q., & Sun, Y. Q. (2015). Late surgery for acetabular fractures in a Chinese level I trauma centre: surgical experience and outcomes. *International Orthopaedics*, 39(9), 1865–1871. <https://doi.org/10.1007/s00264-015-2932-2>
32. Debuka, E., Kumar, G., Dalal, N., & Kalra, S. (2021). Fracture characteristics and outcomes of acetabular fracture management with minimally invasive approach and percutaneous fixation
33. Yokota, K., Kawano, O., Sakai, H., Morishita, Y., Masuda, M., Hayashi, T., Kubota, K., Hirashima, H., Nakashima, R., Nakashima, Y., & Maeda, T. (2023). Intraoperative Radiation Exposure from O-arm-based 3D Navigation in Spine Surgery. *Spine surgery and related research*, 7(6), 496–503. <https://doi.org/10.22603/ssrr.2023-0057>
34. Holly, L. T., & Foley, K. T. (2003). Intraoperative spinal navigation. *Spine*, 28(15 Suppl), S54–S61. <https://doi.org/10.1097/01.BRS.0000076899.78522.D9>
35. Tormenti, M. J., Kostov, D. B., Gardner, P. A., Kanter, A. S., Spiro, R. M., & Okonkwo, D. O. (2010). Intraoperative computed tomography image-guided navigation for posterior thoracolumbar spinal instrumentation in spinal deformity surgery. *Neurosurgical focus*, 28(3), E11. <https://doi.org/10.3171/2010.1.FOCUS09275>

36. Van de Kelft, E., Costa, F., Van der Planken, D., & Schils, F. (2012). A prospective multicenter registry on the accuracy of pedicle screw placement in the thoracic, lumbar, and sacral levels with the use of the O-arm imaging system and StealthStation Navigation. *Spine*, 37(25), E1580–E1587. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e318271b1fa>
37. Rossi, S. M. P., & Benazzo, F. (2023). Individualized alignment and ligament balancing technique with the ROSA® robotic system for total knee arthroplasty. *International orthopaedics*, 47(3), 755–762. <https://doi.org/10.1007/s00264-022-05671-z>
38. Haluzynskiy, O. A., Chornyi, V. S., Burburska, S. V., & Kozik, Y. V. (2022). USE OF COMPUTER NAVIGATION IN TOTAL HIP ARTHROPLASTY (LITERATURE REVIEW). *Wiadomosci lekarskie (Warsaw, Poland : 1960)*, 75(7), 1765–1770. <https://doi.org/10.36740/WLek202207128>
39. Sugano N. (2013). Computer-assisted orthopaedic surgery and robotic surgery in total hip arthroplasty. *Clinics in orthopedic surgery*, 5(1), 1–9. <https://doi.org/10.4055/cios.2013.5.1.1>
40. Chang, J. D., Kim, I. S., Bhardwaj, A. M., & Badami, R. N. (2017). The Evolution of Computer-Assisted Total Hip Arthroplasty and Relevant Applications. *Hip & pelvis*, 29(1), 1–14. <https://doi.org/10.5371/hp.2017.29.1.1>
41. Murphy, S. B. (2012). *Method and apparatus for determining acetabular component positioning* (U.S. Patent No. US 8267938B2). United States Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US8267938B2/en>
42. Mahfouz, M. (2020). Surgical Navigation. EP3747388A1. Estados Unidos de América.
43. Zhang, P., Tang, J., Dong, Y., Lu, L., Wang, S., Song, S., & Wang, G. (2018). A new navigational apparatus for fixation of acetabular posterior column

fractures with percutaneous retrograde lagscrew: Design and application. *Medicine*, 97(36), e12134.
<https://doi.org/10.1097/MD.00000000000012134>

44. Haveman, R. A., Buchmann, L., Haefeli, P. C., Beeres, F. J. P., Babst, R., Link, B. C., & van de Wall, B. J. M. (2025). Accuracy in navigated percutaneous sacroiliac screw fixation: a systematic review and meta-analysis. *BMC surgery*, 25(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s12893-025-02813-z>

X. ANEXOS

9.1. Carta de aprobación por parte del Comité de Ética en investigación del Hospital Universitario "Dr. José Eleuterio González" de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Logo of the Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) and the Facultad de Medicina y Hospital Universitario.

DR. med. EDUARDO ÁLVAREZ LOZANO
Servicio de Ortopedia y Traumatología
Hospital Universitario "Dr. José Eleuterio González"
Presente. -

Estimado Dr. Álvarez:

En respuesta a su solicitud con número de folio de ingreso **s23OR-001** revisada por el Comité Institucional de Innovación y Desarrollo Tecnológico el día 28 de febrero de 2024, le informamos que el Comité ha evaluado su proyecto de Innovación titulado "Desarrollo de un sistema de navegación quirúrgico para la fijación de fracturas de la columna anterior del acetábulo.", determinando que queda como **ACEPTADO**.

Por lo tanto, ha sido **aceptado** para su desarrollo y pruebas técnicas en el Servicio de Ortopedia y Traumatología del Hospital Universitario "Dr. José Eleuterio González" y de la Facultad de Medicina de la UANL. Su proyecto aprobado ha sido registrado con el folio **OR24-002i**. La vigencia de aceptación de este proyecto es el día 28 de febrero del 2025.

Participando además el Dr. Ramón Quintanilla Loreda, Dr. Jorge Armando Cortez Ramírez, Ing. Jaime Octavio López Vázquez como Co-Investigadores.

"La aceptación por el Comité Institucional de Innovación y Desarrollo Tecnológico, faculta al inventor y su equipo a desarrollar el dispositivo sometido y a realizar pruebas técnicas, no se autorizan pruebas o el uso en seres humanos ni animales. La autorización para dichas pruebas corresponde a los respectivos comités dentro de la Subdirección de Investigación"

Atentamente,
"Alere Flammam Veritatis"
Monterrey, N.L., a 28 de febrero de 2024

Dr. Antonio Sánchez Uresti
Presidente Comité Institucional de Innovación y Desarrollo Tecnológico

Comité Institucional de Innovación y Desarrollo Tecnológico
Av. Francisco I. Madero y Av. González s/n, Col. Mitras Centro, C.P. 64460, Monterrey, N.L. México
Teléfonos 818329 4050, Ext. 2870 a 2874. Correo Electrónico: innovacionydt@gmail.com

XII. RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Candidato(a) para el grado de:

Especialista en Ortopedia y Traumatología

Tesis

Desarrollo de un sistema de navegación quirúrgico para la fijación de fracturas de la columna anterior del acetábulo

Campo de estudio:

Ciencias de la Salud

Biografía:

Personal: Nacido el 31 de octubre de 1995 en Monterrey, Nuevo León, México. Hijo de Ramón Quintanilla Villarreal y Xochitl Francisca Loredó Salazar.

Educación: Egresado de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Nuevo León con grado de Médico Cirujano y Partero del 2014 al 2020. Médico Pasante del Servicio Social en el Hospital Universitario “Dr. José Eleuterio González” de la Universidad Autónoma de Nuevo León del 2020 al 2021.