

Robotics in surgery and neurosurgery, applications and challenges, a review

Robótica en cirugía y neurocirugía, aplicaciones y desafíos, una revisión

H. F. Vargas-Rosero , O. A. Vivas-Albán 

Abstract—The integration of robots in operating rooms aims to improve the performance and efficiency of various procedures, since it offers remarkable advantages over conventional procedures, in particular precision, hand shake filtering and the possibility of executing complex tasks, however, Considerable challenges still prevail affecting massification and maneuverability on the part of surgeons. In the present work a review of the current state of robotic surgery, the challenges and trends is carried out. Specifically, the need for optimal force feedback mechanisms is evidenced, as well as dynamic visualization through augmented reality or virtual reality. It is not yet possible to determine that robotic surgery has reached standards, however, the integration of alternative technologies will allow surgeons to improve not only the efficiency of the robot, but also of its operation by the surgeon

Index Terms —robotic neurosurgery, neuro navigation, haptic feedback, surgical robotics, surgical visualization.

Resumen— La integración de robots en los quirófanos plantea mejorar el desempeño y eficiencia de variados procedimientos, dado que ofrece ventajas destacables sobre los procedimientos convencionales, en particular la precisión, el filtrado de temblor de mano y la posibilidad de ejecución de tareas complejas, sin embargo, aún prevalecen considerables desafíos que afectan la masificación y la maniobrabilidad por parte de los cirujanos. En el presente trabajo se realiza una revisión del estado actual de la cirugía robótica, los retos y las tendencias. En concreto se evidencia la necesidad de mecanismos de realimentación de fuerza óptimos, así como la visualización dinámica mediante realidad aumentada o realidad virtual. Aun no es posible determinar que la cirugía robótica ha alcanzado estándares, sin embargo, la integración de tecnologías alternas permitirá mejorar no solo la eficiencia en cuanto al robot sino respecto de su operación por parte de los cirujanos.

Palabras claves— neurocirugía robótica, neuro navegación, realimentación háptica, robótica quirúrgica, visualización quirúrgica.

I. INTRODUCCIÓN

La cirugía mínimamente invasiva asistida por robot (RAMIS) cambia el paradigma de intervenciones quirúrgicas. A diferencia de la cirugía abierta el acceso mediante pequeños orificios permite menos dolor, tiempo de recuperación menor, al igual que disminuye la posibilidad de complicaciones. El espectro de procedimientos cubre desde intervenciones en la pelvis, tórax, abdomen, inserción de tornillos en vértebras, intervenciones intracraneales entre otros.

Las exigencias en los procedimientos de cirugía mínimamente invasiva convencional, tales como precisión alta y prolongada, movimientos milimétricos, generan temblor en manos y aumentan la carga física y mental del cirujano. Esta condición motiva la adaptación de robots para asistencia quirúrgica, los cuales han demostrado eficiencia y potencialidad de mejoramiento de los procesos en los quirófanos [1]. Estos sistemas tienen la capacidad de realizar trabajos de elevada precisión, repetitivos, mientras soportan cargas durante períodos de tiempo prolongados. Adicionalmente permiten ejecutar movimientos o tareas que no son posibles en intervenciones tradicionales, o de extrema dificultad [2], de igual manera permiten tratar pacientes con virus peligrosos o reducir la exposición del especialista a la radiación que es algo usual en algunos procedimientos tales como inserción de tornillos en cirugía de columna y cirugía guiada por imágenes [3], [4], [5]. Existen zonas profundas, estrechas o de difícil acceso tales como el área de la base de cráneo que presentan desafíos y condiciones complejas [6]. Del mismo modo algunas tareas de rigor tales como micro canulación, o procedimientos intraoculares, que exigen precisión inferior a 2 mm, lo cual solo pocos y muy calificados cirujanos pueden realizar [7].

La cirugía RAMIS, presenta múltiples beneficios, pero los sistemas aún no han alcanzado un estándar óptimo, debido a que existen limitaciones en áreas como realimentación, interface de control y particularmente el elevado costo de adquisición y operación.

Este manuscrito fue enviado el 25 de febrero de 2019 y aceptado el 26 de marzo de 2020.

Producto derivado del proyecto de investigación “Contribución a la robótica quirúrgica mediante la ejecución automatizada de una sutura externa”, presentado como proyecto doctoral del estudiante Hermes Fabian Vargas al programa de Doctorado en Ciencias de la Electrónica de la Universidad del Cauca.

H. F. Vargas, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, (email: fvargas@unicauca.edu.co).

A. Vivas, Universidad del Cauca, Popayán, (email: avivas@unicauca.edu.co).



Protocolo de revisión: la consulta correspondiente a las publicaciones relacionadas se desarrolló con las ecuaciones de búsqueda mostradas a continuación:

1. surgical AND robot AND (challenges OR trends OR feedback OR haptic)
2. neurosurgery robots
3. surgery AND (augmented reality OR virtual reality)

los criterios de inclusión fueron: se incluyeron documentos presentes en las siguientes bases de datos Scencedirect, IEEE xplore, y Pubmed, además se seleccionó un periodo de publicación comprendido entre 2014 y primer semestre de 2019, sin embargo, se tomó en cuenta 15 publicaciones adicionales de periodos anteriores por su pertinencia en la revisión, los documentos fueron artículos, libros y eventos. Se excluyeron los documentos que presentaban estudios no relacionados o con la aplicación específica, también se excluyeron resúmenes, cartas, noticias y similares, de igual manera se eliminaron duplicados. Luego de realizar el tamizaje respectivo se obtuvo un total de 83 publicaciones más 9 de referencias comerciales.

En el presente documento se muestran el estado de la robótica aplicada a la cirugía y a la neurocirugía considerando los desafíos que aún prevalecen, y sus posibles formas de ser resueltos.

II. ROBOTICA QUIRURGICA

Los robots utilizados en los quirófanos se clasifican en serial, robot continuo, robot paralelo y robot con sistema híbrido. Adicionalmente existen sistemas flexibles, que a su vez pueden ser accionados por manipuladores continuos de tendones con múltiples segmentos, o mediante tubos concéntricos, como se muestra en la Fig. 1.

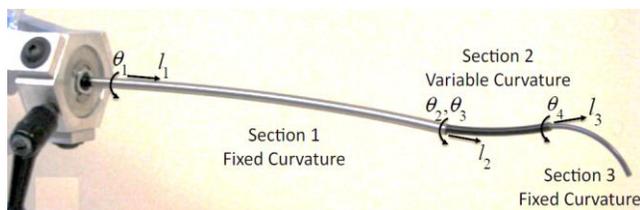


Fig.1. Robot concéntrico flexible [8].

Una clasificación adicional es el modo de operación por el cual se catalogan en teleoperados, donde el cirujano dirige la localización y ejecución del efector final mediante el esquema maestro-esclavo [9]. Adicionalmente están los robots semiautónomos o supervisados donde el operador interviene eventualmente para corregir acciones erradas, de igual manera pueden tener control compartido o *co-worker* [10], [11] para solventar las limitaciones y requerimientos en el quirófano, y finalmente se encuentran los sistemas autónomos, lo cual es una tendencia reciente. En la actualidad la inteligencia artificial provee la capacidad de tomar decisiones y realizar tareas de manera independiente [12], tal es el caso del sistema Star,

capacitado para desarrollar de forma autónoma tareas sobre tejido blando [13].

El robot Da Vinci es un destacado exponente de los sistemas de robótica quirúrgica debido a sus grandes prestaciones y variados procedimientos, entre los cuales se encuentran afecciones del colon, vejiga, arterias coronarias, vesícula, próstata y garganta. El sistema se compone de una consola donde el cirujano manipula los controles que dirigen los brazos del robot, además posee un monitor de visualización del área a intervenir, también dispone de pedales que permiten la activación de espera, parada de emergencia, y embrague que deshabilita el robot para que el cirujano reubique los controles a una mejor posición sin poner en riesgo al paciente.

En el robot Da Vinci el cirujano controla la posición y orientación de la cámara interna, reubicándolo regularmente de acuerdo a la necesidad del procedimiento.

En el mercado existen sistemas alternos de robótica quirúrgica de intervenciones específicas como: Robodoc® (Think Surgical, Inc) utilizado para intervenciones de perforación o fresado de hueso para el implante de prótesis de cadera (artroplastia) y rodilla donde se requiere precisión milimétrica [14]. El robot Renaissance® (Mazor Robotics) es utilizado para tratar las complicaciones de la columna vertebral, donde algunos procedimientos requieren la inserción de placas, varillas o jaulas en las que se demanda alta precisión para el fijado de tornillos sin lesionar el sistema nervioso [15]. El robot Sensei X® (Hansen Medical), que consiste en un sistema de guía de catéter en conductos circulatorios que envía impulsos de alta frecuencia para producir ablación de tejidos [16]. El robot CyberKnife® (Accuray) genera una radiación ionizante dirigida para la eliminación de tumores en zonas de muy difícil acceso como el cerebro, manteniendo el objetivo a pesar de los movimientos involuntarios del paciente [17]. Y el sistema Artas® (Restoration Robotics), desarrollado para implantes de cabello [18], por nombrar los más representativos.

Existen aplicaciones adicionales interesantes por ejemplo Chan y otros [19] presentan un robot porta-endoscopio, controlado por el pie que reporta fácil manejo y potencialidad en su aplicación. Convencionalmente los procedimientos con endoscopio a dos manos se realizan sosteniendo el dispositivo y un instrumento a la vez, este robot posibilita la ejecución con dos instrumentos ampliando la gama de acciones disponibles. Esta aplicación aún requiere de un desarrollo adecuado porque algunos cirujanos son reacios a su utilización por el riesgo de movimientos involuntarios, o la necesidad de que alguien lo controle. En adición a los sistemas porta-endoscopio, también se incluyen los de soporte de brazo, aunque no intervienen directamente sobre el paciente, mejoran las condiciones de los cirujanos en cirugía CIM convencional optimizando los resultados de los mismos. Por ejemplo el sistema iArmS es un soporte de brazo inteligente, que sigue automáticamente los movimientos del cirujano, sirve de apoyo y previene de esta manera la fatiga en procedimientos prolongados y delicados como es el caso de la cirugía endoscópica transnasal [20].

Hennersperger y otros [21] presentan un robot para barrido de precisión de una sonda de ultrasonido (US) a nivel intraoperatorio. US ha sido utilizado para diagnóstico, pero recientemente su aplicación en procedimientos de intervención permite evitar la radiación de las imágenes radiológicas convencionales. Aunque la ecografía 3D es ampliamente difundida el desafío se presenta en el emparejamiento con imágenes preoperatorias con alta precisión en tiempo real, la vinculación de un robot que ejecute el barrido permite mayor exactitud y libera al cirujano para la tarea en particular. En el caso de estructuras cerebrales se pueden usar sondas de ultrasonido intracraneal.

1) Cirugía robótica de puerto único.

Los procedimientos en la base del cráneo, o del área bucofaríngea, presentan la particularidad de un espacio angosto y curvado, además de la presencia de múltiples estructuras musculares, vasculares y nerviosas, lo cual es limitante para los robots convencionales [22]. El enfoque de puerto único ofrece solventar estas limitantes, dado que mediante un solo punto de acceso se introduce el instrumental necesario. De igual manera este enfoque permite el acceso al interior del cuerpo mediante los orificios naturales de él, técnica denominada Notes (*Natural orifice transluminal endoscopic surgery*) [23].

El sistema Flex es un robot flexible que se moldea y orienta para alcanzar objetivos en lugares como la orofaringe, hipofaringe y laringe, cuenta con dos terminales también flexibles (*muñecas*), capaces de desplazarse en todas las direcciones como se muestra en la Fig. 2a. Este sistema presenta un nuevo esquema de cirugía robótica donde el tiempo de configuración¹ y ubicación de su plataforma es menor, además presenta mejor maniobrabilidad en áreas estrechas, a diferencia de los brazos robóticos de gran tamaño y limitado espacio de operación por su estructura [24].

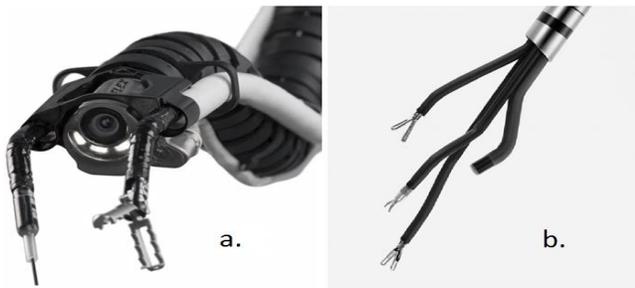


Fig. 2. (a.) Robot Flex System Medrobotics, (b.) Robot Da Vinci SP Intuitive Surgical.

De otra parte, el robot quirúrgico Da Vinci presenta varias versiones, la última de ellas es el sistema de puerto único Da Vinci SP (ver Fig. 2b). Es especialmente diseñado para espacios estrechos y profundos, mediante un único punto de inserción. Aunque inicialmente está aprobado para uso urológico, se

¹ La cirugía robótica requiere de constante reubicación de brazos, lo cual incrementa el tiempo de operación.

pretende la aceptación para uso en la base del cráneo y cuello, posee soportes flexibles de articulación múltiple capaces de girar y desplazarse en cualquier sentido, adicional a la cámara, que a su vez en conjunto pueden rotar para adaptarse al espacio y al procedimiento. Del sistema Da Vinci SP se reportan los primeros 6 casos en cirugía robótica transoral, en procedimiento de nasofaringe, orofaringe, laringe, e hipofaringe, donde los pacientes no presentaron inconvenientes en los días posteriores a su intervención [25].

III. DESAFIOS EN ROBOTICA QUIRURGICA

A. Sistemas de realimentación.

La cirugía CIM se ejecuta considerando la interacción constante entre lo que visualiza el cirujano y lo que percibe por la realimentación que transfiere la herramienta desde el extremo hasta el mango del instrumental, lo cual le permite trabajar con la delicadeza correspondiente al tejido tratado. Al realizar cirugía robótica esta propiedad se pierde dado que la manipulación es remota por la interacción de mecanismos de telecontrol [26], tales como la interfaz de control del robot Da Vinci mostrado en la Fig. 3. Esta falencia crítica se solventa por una larga curva de aprendizaje.



Fig. 3. Mecanismo de control del robot Da Vinci de Intuitive Surgical.

En un sistema tele operado los brazos del robot se convierten en extremidades adicionales del cirujano, por este motivo el especialista debe desarrollar la experticia suficiente y una adecuada propiocepción de sí mismo en conjunto con el robot, para manipular tejidos aún en zonas de baja visibilidad [27]. La habilidad de propiocepción requiere del desarrollo de destrezas especiales y es una de las razones por la cual la curva de aprendizaje se hace extensa [28].

Para el adiestramiento y formación de los especialistas en cirugía robótica, estos sistemas ofrecen opciones adicionales; por ejemplo un tutor puede dirigir a un aprendiz por medio de un robot de monitoreo remoto, lo cual le permite a un instructor desplazar una cámara a voluntad, o incluir instrucciones visuales en 2D o 3D, conocido como *telestration*² [29]. Amirabdollahian y otros [30] en su trabajo respecto a la realimentación táctil y kinestésica en robots quirúrgicos, resaltan que según los estudios evaluados se evidencia la necesidad de brindar la solución al problema de falta de

² El termino *telestration* hace referencia a sistema de enseñanza con instrucciones remotas sobre un monitor.

realimentación no solo háptica o del contacto del extremo efector, sino táctil cutánea para poder percibir la textura del tejido. Su revisión informa que la gran mayoría de soluciones aún están en fase de desarrollo, inclusive aquellas utilizadas en el robot Da Vinci, solo unas pocas publicaciones realizan pruebas en cadáveres o animales, adicionalmente es precisamente la realimentación un desafío y tendencia de investigación para aplicaciones clínicas.

La interfaz de control de un robot tele operado permite posicionar el extremo, pero debido a la estructura y la dinámica del mecanismo aún no existe una solución óptima para la transferencia de la presión ejercida en el extremo [31]. En este sentido, Maddahi y otros [32], presentan un trabajo reciente del espacio de trabajo, posición, orientación y fuerzas ejercidas por un robot quirúrgico en la disección de tejidos intracraneal en cuatro procedimientos clínicos de extracción de meningiomas. Utilizaron un robot Neuroarm, que en sus dos brazos soportan una pinza de fórceps³ y una herramienta de succión, los cuales son controlados por interfaces de 7 grados de libertad con realimentación háptica. Los resultados muestran que se requiere el desarrollo de interfaces de manipulación adecuadas que permitan una interacción fluida, además se considera la necesidad de caracterizar la fuerza, el desplazamiento, ritmo y la velocidad en la ejecución de un procedimiento. Por otro lado, se destaca que cada tarea quirúrgica es diferente por lo tanto las fuerzas aplicadas y requeridas son distintas.

Las fuerzas de interacción entre el extremo del instrumental y el tejido pueden ser estimadas por sensores, aunque esto es restringido por el tamaño del mismo en zonas muy estrechas como es el caso de los procedimientos en el cerebro. Sin embargo existen tecnologías como sensores de fibra FBG (*Fiber Bragg Grating*), los cuales son microestructuras con distintos índices de refracción que al deformarse modifican la longitud de onda reflejada, pudiendo ser usados como sensores de fuerza [33]. Otro enfoque es el análisis de deformación de tejido por medio de modelos viscoelásticos similares al de masa resorte como el de Maxwell, Hunt-Crossley, y Kelvin. No obstante el análisis se debe hacer en tiempo real sobre la imagen, teniendo en cuenta la estructura y forma geométrica del tejido, lo cual aumenta el tiempo de procesamiento [26].

Los avances en espectroscopía admiten también la evaluación de tejidos a nivel molecular en tiempo real mediante técnicas como la espectroscopía Raman, que es una técnica fotónica de alta resolución que proporciona información estructural de un material en segundos, lo que podría brindar un análisis detallado del tejido durante la ejecución del procedimiento [34]. Para el uso de esta técnica, las sondas pueden ser de fibra óptica acoplada al instrumental quirúrgico. Una técnica similar consiste en el desarrollo de clasificadores automáticos para imagen multiespectral de banda estrecha (Mnbi), que actualmente facilita la detección de carcinomas en tiempo real [35].

Las tecnologías que podrían aplicarse para la realimentación de fuerza ejercida son: superficie táctil por electro vibración,

que al variar cargas eléctricas puntuales en una pantalla capacitiva crean la sensación de percibir distintas texturas como superficie áspera, lisa, y pegajosa[36]; retroalimentación por actuadores de vibración localizados en la interfaz de control en contacto con los dedos del cirujano [37]. Realimentación visual donde la presión encontrada por el sensor es representada en barra de colores según la fuerza aplicada [38]. Electroestimulación muscular en la cual electrodos sobre la piel realizan descargas variando la frecuencia e intensidad de las señales eléctricas, al respecto Diente y otros [39] realizaron un arreglo de 20 canales de electrodos ubicados en el antebrazo para la transmisión de señales hápticas, pero los resultados muestran que se requiere un correcto sistema de mapeo y calibración de las sensaciones percibidas.

Chinbe y otros [40] desarrollaron un dispositivo que permite percibir remotamente la tensión que se presenta al interactuar con un tejido similar a un tumor, que por lo general es más duro que el tejido circundante. El dispositivo es un receptáculo para el dedo pulgar, el cual permite estimar la fuerza necesaria para la correcta recepción de tumores, especialmente aquellos que presentan arterias próximas y que por consiguiente tienen mayor probabilidad de presentar sangrado. En el mismo ámbito en [41] y [42] presentan el desarrollo de un sistema actuado que se soporta sobre el dedo como lo indica la Fig. 4, este enfoque permite libertad en el movimiento entre tanto que percibe reacciones remotas pero presenta limitaciones como peso, interferencia con otros dedos, y miniaturización del dispositivo [43].



Fig. 4. Sistema de realimentación actuado sobre el dedo [42].

La precisión requerida en reconstrucción vascular y reparación de conductos en ocasiones está más allá de las habilidades humanas, por este motivo la disminución del temblor y el escalado de los movimientos hacen posible la ejecución de operaciones para el tratamiento de linfedemas (*hinchazón de extremidades*), el cual es extremadamente desafiante para los cirujanos expertos en métodos tradicionales, pero factible con el uso de robots [44].

B. Sistemas de navegación.

Los avances en cirugía no hubieran sido posibles sin el uso de imágenes de exploración quirúrgica. Estas técnicas posibilitan

³ Pinzas fórceps, son pinzas para prensar o tomar tejido.

la observación interna, detección de anomalías y planificación del tratamiento. La robótica quirúrgica se beneficia particularmente por que provee un mecanismo para solventar la falta de realimentación táctil que aún prevalece, adicionalmente la eficacia de una operación y los márgenes de seguridad están determinados por la correcta correlación de la posición del órgano terminal del robot respecto de las imágenes de la operación.

Las técnicas de adquisición de imágenes tales como tomografía computarizada, tomografía por emisión de positrones, o imagen por resonancia magnética funcional, permiten identificar tejidos y estructuras a intervenir. De igual manera la tractografía posibilita la visualización de los tractos neuronales.

Los cirujanos dependen estrictamente de estas imágenes para la planificación y establecimiento de las restricciones del área a intervenir, así mismo durante la ejecución del procedimiento estas imágenes le brindan información del estado actual y el objetivo propuesto. Entre estas técnicas se destacan la fluoroscopia, la cual usa un medio de contraste verde de indocianina irrigado en las arterias, propenso a detección en la imagen intraoperatoria la cual posibilita el seguimiento de la ubicación exacta de dichos ductos.

Un enfoque moderno es la inclusión de realidad virtual VR (*virtual reality*), y realidad aumentada AR (*augmented reality*) para mejorar la visualización, de tal manera que la información recibida sea más completa que las imágenes de dos planos interceptados, tal como se realiza convencionalmente.

1) Realidad virtual en ambientes quirúrgicos.

La eficiencia en la navegación quirúrgica está asociada a una pérdida menor de sangre, y menor número de complicaciones, los cuales son índices de éxito en cirugías [45]. Técnicas como VR posibilitan el entrenamiento en ambientes simulados realistas, con suficiente detalle que permiten desarrollar habilidades en menor tiempo (ver Fig. 5). Del mismo modo la VR permite una sofisticada manera de establecer la planificación quirúrgica, el cual es un factor clave para prevenir hemorragias porque ofrece la estimación de riesgos sobre estructuras adyacentes al área del procedimiento.

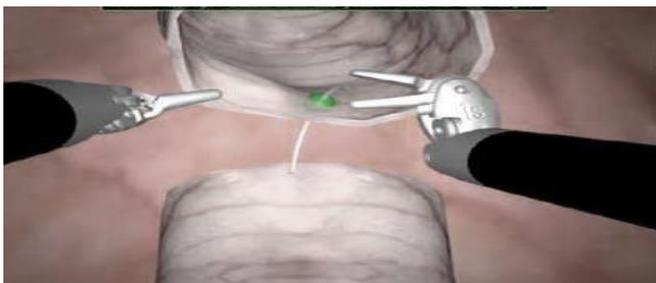


Fig. 5. Entrenador virtual para robot Da Vinci [46]

La realidad virtual permite el mejoramiento de los procesos de formación, que es un factor crítico en la eficacia de un procedimiento. Publicaciones recientes han demostrado que el

uso de esta herramienta mejora el desempeño del cirujano. Adicionalmente VR permite el seguimiento y evidencia del progreso en el desarrollo de habilidades mediante métricas de desempeño, de igual manera incrementa el aprovechamiento del tiempo con el cirujano orientador dado que el sistema VR permite la supervisión automática y la correspondiente corrección, labor que realiza un profesor especializado con las restricciones que esto implica [47].

La realidad virtual en la planificación pre quirúrgica combina un ambiente virtual con imágenes del paciente, con lo cual se permite un reconocimiento preciso de la zona a intervenir, la planificación del acceso y puntos críticos a tener en cuenta, de tal manera que el cirujano conozca en detalle el área antes de la ejecución [48], como se observa en la Fig. 6.

La VR en cirugía se debe concebir desde varias perspectivas para un análisis adecuado, dada la complejidad que abarca, así como sus implicaciones:

- Cada tipo de intervención requiere enfoques particulares de VR así como el nivel de realismo en su representación.
- Depende del objetivo, si es para planificación o para formación. Dominio del instrumental, o conocimiento de un procedimiento en particular.

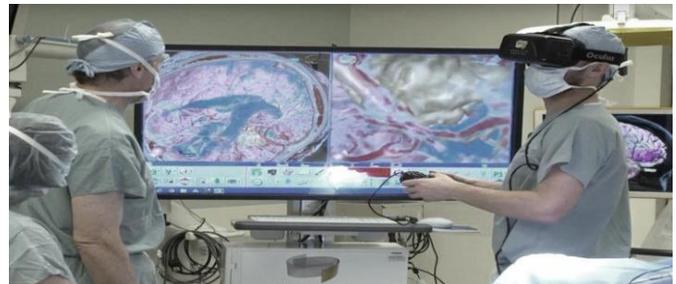


Fig. 6. Planificación mediante VR [49].

Los desafíos que aún presenta VR en cirugía se centran en la necesidad de algoritmos para la extracción de información relevante de las imágenes y su correspondiente representación, así como realimentación háptica, dado que este aspecto es vital en la ejecución convencional de procedimientos neuro quirúrgicos [50]. El ambiente virtual está restringido por ahora a tareas pre quirúrgicas, debido a que no es posible usarlo en cirugía *in vivo* en tiempo real [51]. Sin embargo, se puede plantear el uso de VR por ejemplo durante un procedimiento que requiera la observación de distintos ángulos, usando algún dispositivo de inmersión para hacer la exploración y luego volver al procedimiento.

2) Realidad aumentada en ambientes quirúrgicos.

La realidad aumentada presenta la incorporación de información adicional, que posibilita la integración de elementos para apoyar al cirujano en su orientación a nivel intraoperatorio. También permite estimar la profundidad absoluta y relativa, pero aún adolece de la falta de un total emparejamiento sin error de los modelos utilizados, lo cual debe ser informado en la pantalla para que el responsable pueda estimar riesgos al respecto [52].

Se ha demostrado la utilidad y potencialidad de AR al presentar información o modelos 3D superpuestos en la imagen real, lo cual permite contrarrestar la falta de realimentación háptica, tanto para determinación de textura de tejidos como para mejorar los márgenes de resección⁴ [53], [54] como se muestra en la Fig. 7. Sin embargo, aún existe la dificultad en el registro o emparejamiento de las imágenes intraoperatorias con el video del monitor que observa el cirujano, en tiempo real, el cual es un parámetro denominado “Tre” (*índice de error de registro de objetivo*) cuyo máximo valor debe ser de 2 mm para dar seguridad al paciente. Adicionalmente se requiere de seguimiento fiel a la deformación del tejido, en este sentido algunos trabajos hacen uso de tomografía computarizada, para lo cual se requiere de costosos sistemas además de la exposición a radiación [55].

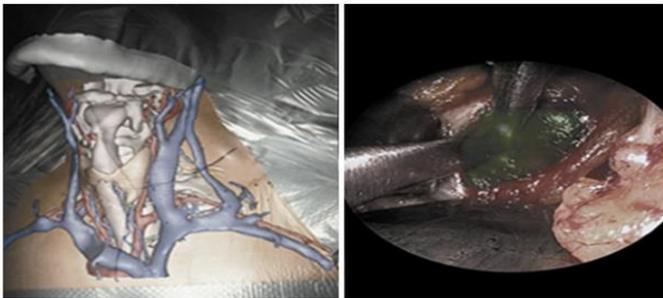


Fig. 7. Realidad aumentada in vivo [53].

La calidad del registro “Tre” está afectado por tres condiciones. En primer lugar el seguimiento del instrumento ya sea óptico o electromagnético, en segundo lugar la calidad o resolución de la imagen que en el mejor de los casos es de 0.5 mm, y finalmente el método propio de mapeo entre los puntos de la imagen y los marcadores sobre el paciente, los cuales limitan el uso de RA en cirugía in vivo [56].

La superposición de información sobre la imagen real no es nueva, se reporta desde 1985. Sin embargo, la tecnología de aquella época no brindaba los requisitos necesarios para su aplicación y masificación, de igual manera los algoritmos de mapeo y reconstrucción de imágenes preoperatorias aún son objeto de estudio, debido a la falta de fiabilidad en la detección de estructuras. La interfaz de presentación debe considerar las limitaciones que son inherentes en la vista natural, por ejemplo realizar tareas muy cerca de los ojos requiere enfocar constantemente, lo que genera fatiga, cansancio, mareo y hasta cefalea [57], razón por la cual todas las alternativas de visualización deben considerar esta circunstancia. Por otro lado presentar cualquier información, imagen, línea guía o modelo, debe tener un retardo máximo de 80 ms, dado que de lo contrario la falta de sincronía es molesta y aumenta la carga mental de dicha tarea [58]. Así mismo la información adicional puede generar distracciones no intencionadas que afectan la calidad de los resultados, comúnmente esto se denomina “*inattentive blindness*”. Por este motivo no solo es importante

la innovación, también es necesaria una adecuada adaptación en el flujo de trabajo.

En la aplicación de AR en cirugía cada procedimiento es particularmente distinto, tanto en el área de aplicación como en el medio de visualización, ya sea microscopio, sistema monocular, binocular, de monitor o tablet [59]. Por ejemplo, en cirugía de base de cráneo los huesos son marcadores fiduciales óptimos, pero en el tratamiento de tejidos blandos se requiere otros mecanismos como fluorescencia. El uso de dispositivos montados en la cabeza (*optical see-through HMDs*) debe limitarse a periodos cortos, debido a la fatiga tanto por el enfoque de la visión como por la sincronización entre el movimiento de la cabeza y la cámara, conocido como enfermedad del simulador [60], [61]. Adicionalmente al ejecutar un procedimiento quirúrgico con AR, se genera oclusión entre el desplazamiento del instrumental sobre el tejido y la proyección de objetos, que afecta la percepción del entorno [62].

La falta de realimentación háptica en el uso de robots quirúrgicos exige un prolongado entrenamiento para dominar la técnica, pero el uso de realidad aumentada podría ayudar a identificar patrones de referencia para solventar dicha limitación [53]. Pero a pesar de los grandes avances de la tecnología en navegación quirúrgica se recomienda que los cirujanos tengan mucho cuidado con su utilización, dado que, aunque el sistema puede demostrar precisión, en algún momento puede brindar datos erróneos y la tasa de fracaso aún es considerable. Por lo tanto, confiar enteramente en la información suministrada podría ser de alto riesgo durante el procedimiento.

IV. ROBÓTICA EN NEUROCIRUGÍA.

En el ámbito de la neurocirugía, la robótica quirúrgica brinda opciones considerables, por las características especiales de esta área como son estrecho y profundo espacio de trabajo, tejidos y estructuras adyacentes delicadas, necesidad de apertura de la duramadre, etcétera [63]. Los procedimientos en neurocirugía difieren en la ubicación del objetivo, por ejemplo, si la intervención es intracraneal, el abordaje puede ser por craneotomía (*corte y extracción de un segmento del cráneo*), o estereotaxia sí es profundo. En la base del cráneo las opciones de abordaje son mediante la introducción de instrumentos por el seno esfenoidal (*transesfenoidal*), mediante el acceso por la boca (*transoral*), acceso mediante la nariz (*transnasal*), acceso mediante apertura de alguna región del rostro (*transfacial*), y en la parte posterior del cráneo por abordaje lateral sub occipital. Estos enfoques pueden extenderse y combinarse dependiendo de la afección a tratar [64]. Cada enfoque requiere de la ejecución de un procedimiento particular, por lo cual los robots en neurocirugía difieren en su estructura y funcionalidad respecto al área a tratar [65], [66].

1) Estereotaxia.

En neurocirugía un procedimiento de gran utilidad es la

⁴ El término margen de resección corresponde a la valoración de los bordes donde se extirpó o se realizó resección de tejido anómalo.

estereotaxia, para el tratamiento de lesiones profundas del cerebro con alta precisión. El procedimiento permite la localización exacta de tejidos anómalos mediante un marco que se fija a la cabeza del paciente, como se muestra en la Fig. 8a, este mecanismo hace posible mantener una ruta determinada para perforación y penetración con elevada exactitud [67]. De manera adicional se acopla con imágenes del paciente lo cual se desarrolla dentro del paradigma IGS (*cirugía guiada por imágenes*).

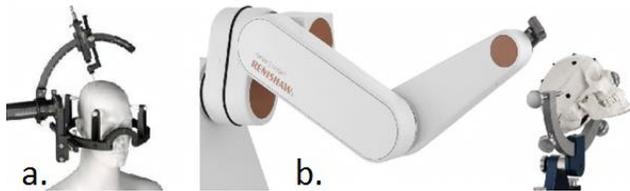


Fig. 8. (a.) Estereotaxia con marco [68], (b.) Estereotaxia robótica sin marco de Renishaw.

El uso de asistentes robóticos posibilita el desarrollo de estereotaxia sin el uso del marco (Fig. 8b), lo que disminuye considerablemente el tiempo de ejecución y demás implicaciones asociadas a dicho mecanismo. Permite además la ubicación de electrodos con desplazamientos lentos y milimétricos para evitar afectar arterias adyacentes. Adicionalmente es soportado por las mejoras en las técnicas y equipos, como los nuevos sistemas de imágenes médicas: tomografía por resonancia magnética, tomografía axial computarizada, tensor de difusión, etcétera.

En torno a los procedimientos de estereotaxia sin marco se destaca el sistema Isys Robot, que consiste en una guía para sonda, que permite posicionar el terminal con alta precisión en poco tiempo de forma remota en cirugía guiada por imagen. Así mismo el tiempo de configuración es corto, disminuyendo el tiempo de radiación ionizante extra que afecta a médicos y pacientes [69]. De igual forma se encuentra el sistema Neuroarm que consiste en dos brazos y posee sensores de fuerza para ofrecer realimentación al cirujano que lo controla de forma remota, puede realizar corte, irrigación y cauterización, con imágenes por resonancia magnética en tiempo real [70].

2) Estimulación cerebral profunda.

Una técnica neuroquirúrgica particular es la estimulación cerebral profunda DBS (*deep brain stimulation*), que actualmente permite disminuir en forma considerable los síntomas en pacientes con enfermedad de Parkinson. Esta técnica consiste en la apertura de la duramadre e introducción de un electrodo hasta la región cerebral que presenta la afección, dicho electrodo se conecta a un neuro estimulador (Fig. 9) que envía señales eléctricas para inhibir por ejemplo los temblores de las extremidades [71].

La DBS tiene la potencialidad de tratar múltiples afecciones cerebrales como epilepsia, paraplejía, dolor de miembro

fantasma, disfunciones de comportamiento, trastorno obsesivo o bipolar, Alzheimer e incluso incidir en trastornos graves como la esquizofrenia [72].



Fig. 9. Prototipo de estimulación cerebral profunda [73].

El sistema Neuromate tiene buena aceptación para procedimientos neuroquirúrgicos funcionales, tales como estimulación cerebral profunda, estereo electroencefalografía, neuroendoscopia, etcétera, los cuales son de amplio uso en los quirófanos [74]. También se encuentra el sistema Rosa Brain para posicionamiento de instrumentos en cirugía guiada por imágenes, que permite la planificación y ejecución precisa de trayectorias para entrada y destino del instrumental [75].

En el mercado existen varios sistemas de neuro cirugía robótica usados clínicamente con éxito, sin embargo, aún hay factores que presentan limitaciones como la falta de confianza de parte de los cirujanos y los costos asociados.

3) Robótica en oftalmología.

En cirugía intraocular la precisión necesaria es elevada y exigente. Sistemas como el Steady Hand System permiten eliminar el temblor de las manos en microcirugía, bajo un esquema cooperativo y tele operado con realimentación háptica a través de control de admitancia [76]. En la misma área de aplicación se encuentra el sistema Iriss, el cual cuenta con un mecanismo de cambio de instrumental, y centro de movimiento remoto, probado con éxito en la remoción de cataratas y en canulación de venas en pruebas in vitro. Actualmente no existen sistemas robóticos para cirugía oftalmológica disponibles comercialmente o que posean pruebas en humanos [2].

4) Ablación láser y perforación robótica.

En neurocirugía es común utilizar láser para ablación de tejidos tumorales. El sistema Neuroblate permite dirigir una sonda que puede girar y profundizar realizando un barrido hasta recorrer un tejido canceroso [77], de igual manera el láser como herramienta de corte permite gran precisión cuando se logra integrar a una guía robótica [78]. La perforación del cráneo es una actividad que requiere gran destreza del cirujano, y depende del sitio a realizar la craneotomía. Dillon y otros [79] presentan un sistema para perforación en mastoidectomía que permite

establecer la ruta de corte con imágenes CT, y ejecutar el fresado y perforación del cráneo (*drilling*) bajo la supervisión del cirujano.

5) Cirugía robótica transoral TORS (*TransOral Robotic Surgery*).

La cirugía robótica transoral consiste en realizar operaciones en la base de cráneo mediante el acceso por la boca. Es ampliamente utilizada, en procedimientos como resección de tumor en la base de la lengua, cirugía laríngea e hipofaríngea, apnea del sueño, resección de carcinoma orofaríngeo, entre otras [65]. El desafío estriba en la recuperación del paciente, dado que se afecta la función de deglución y función del habla, la ventaja que presenta sobre la cirugía CIM convencional es que permite llegar al tejido objetivo más rápido disminuyendo la exposición a radiación [80].

Las intervenciones quirúrgicas realizadas con el sistema robótico TORS disminuyen la utilización, intensidad, cantidad de quimioterapia y radioterapia [81], además muestran una mejora en la relación costo beneficio respecto a los procedimientos de CIM [82], y la tasa de curación es mayor [83]. Chauvet y otros [84] encuentran que para resección de tumores en la base de cráneo mediante abordaje transoral, se evitan complicaciones del abordaje endonasal como sinequias, rinitis atrófica primaria y secundaria, además de síndrome de nariz vacía. Su trabajo evalúa la eficacia de la técnica usando un robot Da Vinci en pacientes con adenoma en pituitaria. Recientemente el primer estudio clínico demuestra el uso del robot Da Vinci en la resección de tumores selares, por abordaje transoral sin división del paladar blando o los efectos rinológicos que se producen en abordaje endonasal convencional. Los resultados muestran que se encontró una mejor accesibilidad, con calidad en la resección y tiempo operatorio medio, que podría disminuir o evitar los efectos del abordaje transesfenoidal [85].

En cuanto a las cirugías en el cuello, esta área posibilita el uso de robots de varios brazos como el Da Vinci, en operaciones como resección de carcinoma papilar de tiroides, metástasis en los ganglios, y tiroidectomía, aunque en estos procedimientos los resultados son similares para el paciente respecto de la cirugía tradicional. No obstante se requiere mayor tiempo con el enfoque robótico por el periodo de configuración del sistema, aspecto que busca ser superado con robots flexibles o de puerto único [86].

V. DESAFÍOS EN NEUROCIRUGÍA ROBÓTICA

Los procedimientos quirúrgicos desarrollados al interior del globo ocular tales como vitreoretinal, o membranectomía epirretinal, exigen gran destreza y precisión mucho mayor que el resto de procedimientos oculares, así como la reconstrucción vascular. Debido al tamaño de las estructuras a intervenir se requiere precisión del orden de 10 μm , pero el promedio de cirujanos expertos varía de 100 a 150 μm . Por lo cual solo un

grupo selecto de cirujanos están capacitados para realizar determinados procedimientos, siendo esta una de las principales limitaciones de este campo. Además, los tejidos y estructuras que intervienen son considerablemente delicados por lo cual se requieren micro-instrumentos. Las relaciones estructurales y la estimación de profundidad es compleja, adicionalmente el temblor en las manos es algo inherente así como el nivel mínimo de sensibilidad del tacto, lo cual es una problemática donde la robótica quirúrgica tiene gran potencialidad debido a que puede implementar filtros para que los desplazamientos sean suaves aunque exista temblor en la mano del cirujano en el caso de un sistema tele manipulado.

Adicionalmente el manipulador puede realizar un escalado del movimiento para lograr la precisión requerida, lo cual es fundamental para procedimientos como micro canulación, donde se suministra un medicamento sobre una vena minúscula durante un tiempo determinado hasta lograr la eliminación de una obstrucción. Del mismo modo los procedimientos con células madre para regeneración requieren micro movimientos, conservando siempre al paciente de daños intragénicos o causados en el procedimiento.

Farias y otros [87] realizaron una consulta con cirujanos especialistas en la ejecución de operaciones de esterotaxia para indagar sobre los desafíos de la robótica en este campo, sus resultados destacan los siguientes aspectos:

- Posibilitar la correlación automática de coordenadas del electrodo y las trayectorias planificadas.
- Aumentar la profundidad del electrodo mientras se evalúan los signos vitales desde una interfaz adecuada, permitiendo la flexibilidad y facilidad al cambiar el punto de entrada.
- Disponer de monitoreo constante y en línea de las coordenadas absolutas de los instrumentos y los objetivos, considerando su dimensión, la posición del manipulador y la base de referencia de ubicación.

La técnica Ushifi (*Hi frequency ultrasound*), permite la ablación de tejido mediante la focalización de ultrasonido de alta frecuencia. Este procedimiento requiere la ubicación y desplazamiento de una sonda sobre un área con movimientos milimétricos de alta precisión y exactitud, durante un tiempo determinado, lo cual es desafiante para los cirujanos, pero posible para los robots quirúrgicos.

Un requisito de la robótica quirúrgica es disminuir al máximo las secuelas sobre el paciente, realizando las maniobras de manera segura, evitando principalmente causar sangrado, lo cual es crítico al retirar tumores que presenten vasculatura [88], [89]. Ueda y otros [90] realizan una propuesta para evitar colisiones en espacios profundos y estrechos del cerebro, definiendo un cono truncado, cuya base angosta es el área disponible para el desplazamiento del extremo del instrumento y la base ancha es el espacio disponible para el desplazamiento del cuerpo del instrumental. De acuerdo a las pruebas realizadas

el enfoque disminuye la carga computacional más que otros métodos.

VI. CONCLUSIONES

En este documento se presentó el uso de robots quirúrgicos y específicamente aquellos orientados a intervenciones de neurocirugía, considerando su estado y desafíos que aun requieren ser superados, entre los que se destacan la falta de adecuados mecanismos de realimentación de fuerza.

Aunque los avances en robótica quirúrgica son considerables aún prevalecen complicaciones como mal funcionamiento, quemaduras, o afección de órganos no implicados, pero en su mayoría se deben a la falta de experiencia del cirujano[91]. Una de las limitaciones del uso de robots son las restricciones por el tamaño y disposición de los brazos que soportan el instrumental quirúrgico, lo que limita su utilización en áreas estrechas como los procedimientos endonasales, transorales o en la base del cráneo, que a su vez excluye su aplicación en algunos pacientes como los niños. Adicionalmente la falta de realimentación háptica limita la ejecución de determinadas tareas quirúrgicas [87]. También es particularmente interesante conocer que la cirugía aún no es enteramente robótica, algunas secciones de la operación son apoyadas por CIM convencional, lo cual es un aspecto a mejorar [92].

Los procedimientos de microcirugía tales como los intraoculares trabajan con tejidos cuya tensión máxima es mucho menor que el umbral de sensibilidad del tacto humano, por lo tanto, no es factible la realimentación háptica en estas condiciones. Esto se podría solventar con sensores de micro fuerzas que a su vez por ejemplo ofrezcan respuesta sonora variando intensidad y frecuencia.

Cada procedimiento y área a intervenir donde se utiliza la robótica quirúrgica tiene sus propias restricciones, tanto de espacio de trabajo como de tipo de tejido a tratar. Por ejemplo, para una colecistectomía tanto la vesícula como el hígado son de tamaño considerable, en tanto que en la cirugía de base de cráneo como la transesfenoidal, el área es pequeña. Sin embargo, existen aspectos comunes como por ejemplo el mecanismo de control, la guía mediante imágenes, y la necesidad recurrente de realimentación háptica para disminuir la carga mental de trabajo del especialista, mejorar el tiempo de ejecución de procedimientos, así como disminuir la curva de aprendizaje.

La cirugía asistida por robots concentra varios campos de desarrollo científico y tecnológico como, por ejemplo, actuadores, microsensores, imágenes, e inteligencia artificial. Tal es el caso de las interfaces humano computador para tratar con objetos remotos o virtuales propulsada por la industria de los videojuegos, y que permiten virtualizar tejidos y órganos para navegar en ellos, lo cual es adaptado y aplicado a procesos de diagnóstico e intervención en medicina.

Aún no es posible decir que la cirugía robótica ha alcanzado su madurez. A pesar de los avances existen desafíos en los cuales no se ha alcanzado el establecimiento de un estándar. En

primer lugar, los brazos son voluminosos, lo cual genera conflicto de posicionamiento y desplazamiento del instrumental. Por esto determinados procedimientos requieren reconfiguración del quirófano, aumentando el tiempo quirúrgico. De igual manera los instrumentos son de tamaño considerable respecto de algunas áreas a intervenir, además se debe conservar el equilibrio entre longitud, diámetro, resistencia y fuerza que pueden ejercer [28], o su curvatura física con el fin de lograr acceder a más lugares. Y aún existen falencias en el uso de herramientas para corte o perforación de huesos con seguridad [92]. De igual manera la realimentación táctil y háptica presenta retos en tareas complejas como disección, sutura y en general trabajo con tejidos blandos y delicados.

REFERENCIAS

- [1] A. R. Lanfranco, A. E. Castellanos, J. P. Desai, and W. C. Meyers, "Robotic Surgery," *Annals of Surgery*, vol. 239, no. 1, pp. 14–21, Jan. 2004, DOI: 10.1097/01.sla.0000103020.19595.7d.
- [2] B. Singh and N. Sellappan, "Evolution of Industrial Robots and their Applications," vol. 3, no. 5, p. 6, May 2013. ISSN: 2250-2459.
- [3] F. Chen, J. Liu, and H. Liao, "Image Guided and Robot Assisted Precision Surgery," in *Artificial Intelligence in Decision Support Systems for Diagnosis in Medical Imaging*, K. Suzuki and Y. Chen, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 361–387. DOI: 10.1007/978-3-319-68843-5–13
- [4] X. Le *et al.*, "Robot-Assisted Versus Fluoroscopy-Assisted Cortical Bone Trajectory Screw Instrumentation in Lumbar Spinal Surgery: A Matched-Cohort Comparison," *World Neurosurgery*, vol. 120, pp. e745–e751, Dec. 2018, DOI: 10.1016/j.wneu.2018.08.157.
- [5] A. Khan *et al.*, "Comparing Next-Generation Robotic Technology with 3-Dimensional Computed Tomography Navigation Technology for the Insertion of Posterior Pedicle Screws," *World Neurosurgery*, Nov. 2018, DOI: 10.1016/j.wneu.2018.11.190.
- [6] S. Nicolaidis, "Neurosurgery of the future: Deep brain stimulations and manipulations," *Metabolism*, vol. 69, pp. S16–S20, Apr. 2017, DOI: 10.1016/j.metabol.2017.01.013.
- [7] R. Nuzzi and L. Brusasco, "State of the art of robotic surgery related to vision: brain and eye applications of newly available devices," *Eye Brain*, vol. 10, pp. 13–24, Feb. 2018, DOI: 10.2147/EB.S148644.
- [8] P. Dupont *et al.*, "Concentric tube robots for minimally invasive surgery," *Neurosurgery*, vol. 7, Jan. 2012.
- [9] M. A. Mashagbeh and M. B. Khamesee, "Unilateral Teleoperated Master-Slave System for Medical Applications," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 784–787, Jan. 2015, DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.178.
- [10] E. Bauzano, A. Fernández Iríbar, C. López-Casado, J. Klein, A. Renteria, and V. Muñoz-Martinez, "Integración de Dispositivos en un Robot Quirúrgico Teleoperado mediante ROS," presented at the Conference: Conference: XXXVI Jornadas de Automática, Bilbao, España, 2015. ISBN: 978-84-15914-12-9.
- [11] J. Sandoval, H. Su, P. Vieyres, G. Poisson, G. Ferrigno, and E. De Momi, "Collaborative framework for robot-assisted minimally invasive surgery using a 7-DoF anthropomorphic robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 106, pp. 95–106, Aug. 2018, DOI: 10.1016/j.robot.2018.04.001.

- [12] D. Chow and W. Newman, "Improved knot-tying methods for autonomous robot surgery," in *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2013, pp. 461–465, DOI: 10.1109/CoASE.2013.6653955.
- [13] A. Shademan, R. S. Decker, J. D. Opfermann, S. Leonard, A. Krieger, and P. C. W. Kim, "Supervised autonomous robotic soft tissue surgery," *Science Translational Medicine*, vol. 8, no. 337, pp. 64–73, May 2016, DOI: 10.1126/scitranslmed.aad9398.
- [14] S. Nishihara *et al.*, "Clinical accuracy evaluation of femoral canal preparation using the ROBODOC system," *Journal of Orthopaedic Science*, vol. 9, no. 5, pp. 452–461, Sep. 2004, DOI: 10.1007/s00776-004-0804-5.
- [15] "Mazor Robotics USA," *Mazor Robotics*. [Online]. Available: <https://www.mazorrobotics.com/en-us/>. [Accessed: 24-Jan-2019].
- [16] "Hansen Medical - Auris Health." [Online]. Available: <https://www.aurishealth.com/hansen-medical.html>. [Accessed: 24-Jan-2019].
- [17] "CyberKnife System from Accuray." [Online]. Available: <https://www.accuray.com/cyberknife/>. [Accessed: 24-Jan-2019].
- [18] "The ARTAS Robotic System | Restoration Robotics." [Online]. Available: <https://artas.com/physicians/>. [Accessed: 24-Jan-2019].
- [19] J. Y. K. Chan *et al.*, "Foot-controlled robotic-enabled endoscope holder for endoscopic sinus surgery: A cadaveric feasibility study," *Laryngoscope*, vol. 126, no. 3, pp. 566–569, Mar. 2016, DOI: 10.1002/lary.25634.
- [20] T. Ogiwara, T. Goto, A. Nagm, and K. Hongo, "Endoscopic endonasal transsphenoidal surgery using the iArmS operation support robot: initial experience in 43 patients," *Neurosurgical Focus*, vol. 42, no. 5, p. E10, May 2017, DOI: 10.3171/2017.3.FOCUS16498.
- [21] C. Hennersperger *et al.*, "Towards MRI-Based Autonomous Robotic US Acquisitions: A First Feasibility Study," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. PP, Jul. 2016, DOI: 10.1109/TMI.2016.2620723.
- [22] S. R. Dutta, D. Passi, S. Sharma, and P. Singh, "Transoral robotic surgery: A contemporary cure for future maxillofacial surgery," *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine, and Pathology*, vol. 28, no. 4, pp. 290–303, 2016, DOI: 10.1016/j.ajoms.2016.03.002.
- [23] C.-L. Lee, K.-Y. Wu, H. Su, C.-M. Han, C.-Y. Huang, and C.-F. Yen, "Robot-assisted natural orifice transluminal endoscopic surgery for hysterectomy," *Taiwanese Journal of Obstetrics and Gynecology*, vol. 54, no. 6, pp. 761–765, Dec. 2015, DOI: 10.1016/j.tjog.2015.08.023.
- [24] H. Poon, C. Li, W. Gao, H. Ren, and C. M. Lim, "Evolution of robotic systems for transoral head and neck surgery," *Oral Oncology*, vol. 87, pp. 82–88, Dec. 2018, DOI: 10.1016/j.oraloncology.2018.10.020.
- [25] J. Kaouk, J. Garisto, M. Eltemamy, and R. Bertolo, "Pure Single-Site Robot-Assisted Partial Nephrectomy Using the SP Surgical System: Initial Clinical Experience," *Urology*, Nov. 2018, DOI: 10.1016/j.urology.2018.11.024.
- [26] Z. Wang, Z. Sun, and S. J. Phee, "Haptic feedback and control of a flexible surgical endoscopic robot," *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 112, no. 2, pp. 260–271, Nov. 2013, DOI: 10.1016/j.cmpb.2013.01.018.
- [27] A. Nakazawa *et al.*, "Feedback methods for collision avoidance using virtual fixtures for robotic neurosurgery in deep and narrow spaces," presented at the 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2016, pp. 247–252, DOI: 10.1109/BIOROB.2016.7523632.
- [28] J. J. Doulgeris, S. A. Gonzalez-Blohm, A. K. Filis, T. M. Shea, K. Aghayev, and F. D. Vrionis, "Robotics in Neurosurgery: Evolution, Current Challenges, and Compromises," *Cancer Control*, vol. 22, no. 3, pp. 352–359, Jul. 2015, DOI: 10.1177/107327481502200314.
- [29] A. J. Hung, J. Chen, A. Shah, and I. S. Gill, "Telementoring and Telesurgery for Minimally Invasive Procedures," *The Journal of Urology*, vol. 199, no. 2, pp. 355–369, Feb. 2018, DOI: 10.1016/j.juro.2017.06.082.
- [30] F. Amirabdollahian *et al.*, "Prevalence of haptic feedback in robot-mediated surgery: a systematic review of literature," *Journal of Robotic Surgery*, vol. 12, no. 1, pp. 11–25, Mar. 2018, DOI: 10.1007/s11701-017-0763-4.
- [31] G. Gerboni, A. Diodato, G. Ciuti, M. Cianchetti, and A. Menciassi, "Feedback Control of Soft Robot Actuators via Commercial Flex Bend Sensors," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1881–1888, Aug. 2017, DOI: 10.1109/TMECH.2017.2699677.
- [32] Y. Maddahi, L. S. Gan, K. Zareinia, S. Lama, N. Sepehri, and G. R. Sutherland, "Quantifying workspace and forces of surgical dissection during robot-assisted neurosurgery," *The international journal of medical robotics*, vol. 12, no. 3, pp. 528–537, Sep. 2016, DOI: 10.1002/rcs.1679.
- [33] L. Xiong, G. Jiang, Y. Guo, and H. Liu, "A Three-Dimensional Fiber Bragg Grating Force Sensor for Robot," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 9, pp. 3632–3639, May 2018, DOI: 10.1109/JSEN.2018.2812820.
- [34] P. C. Ashok, M. E. Giardini, K. Dholakia, and W. Sibbett, "A Raman spectroscopy bio-sensor for tissue discrimination in surgical robotics," *Journal of Biophotonics*, vol. 7, no. 1–2, pp. 103–109, 2014, DOI: 10.1002/jbio.201300034.
- [35] S. Mascharak, B. J. Baird, and F. C. Holsinger, "Detecting oropharyngeal carcinoma using multispectral, narrow-band imaging and machine learning," *Laryngoscope*, vol. 128, no. 11, pp. 2514–2520, Nov. 2018, DOI: 10.1002/lary.27159.
- [36] C. Hatzfeld and R. Werthschützky, "Vibrotactile Force Perception Thresholds at the Fingertip," in *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, vol. 6191, pp. 99–104, DOI: 10.1007/978-3-642-14064-8_15
- [37] K. J. Kuchenbecker, J. Gewirtz, W. McMahan, D. Standish, P. J. Mendoza, and D. Lee, "VerroTouch: High-Frequency Acceleration Feedback for Telerobotic Surgery," *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, vol. 6191, Springer, Berlin, Heidelberg 2010, DOI: 10.1007/978-3-642-14064-8_28
- [38] A. I. Aviles, S. M. Alsaleh, and A. Casals, "Sight to touch: 3D diffeomorphic deformation recovery with mixture components for perceiving forces in robotic-assisted surgery," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 160–165, DOI: 10.1109/IROS.2017.8202152.
- [39] T. Duenste, M. Pfeiffer, and M. Rohs, "Zap++: a 20-channel electrical muscle stimulation system for fine-grained wearable force feedback," presented at the MobileHCI '17 Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, Vienna, Austria, 2017, pp. 1–13, DOI: 10.1145/3098279.3098546.
- [40] H. Chinbe, T. Yoneyama, T. Watanabe, K. Miyashita, and M. Nakada, "Finger-attachment device for the feedback of gripping and pulling force in a manipulating system for brain tumor resection," *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol. 13, Jul. 2017, DOI: 10.1007/s11548-017-1640-3.
- [41] C. Pacchierotti, L. Meli, F. Chinello, M. Malvezzi, and D. Prattichizzo, "Cutaneous haptic feedback to ensure the stability

- of robotic teleoperation systems,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 34, no. 14, pp. 1773–1787, Dec. 2015, DOI: 10.1177/0278364915603135.
- [42] D. Tsetserukou, S. Hosokawa, and K. Terashima, “LinkTouch: A wearable haptic device with five-bar linkage mechanism for presentation of two-DOF force feedback at the fingerpad,” in *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, 2014, pp. 307–312, DOI: 10.1109/HAPTICS.2014.6775473.
- [43] A. Girard, M. Marchal, F. Gosselin, A. Chabrier, F. Louveau, and A. Lécuyer, “HapTip: Displaying Haptic Shear Forces at the Fingertips for Multi-Finger Interaction in Virtual Environments,” *Front. ICT*, vol. 3, 2016, DOI: 10.3389/fict.2016.00006.
- [44] H. J. Marcus, C. A. Seneci, C. J. Payne, D. Nandi, A. Darzi, and G.-Z. Yang, “Robotics in keyhole transcranial endoscope-assisted microsurgery: a critical review of existing systems and proposed specifications for new robotic platforms,” *Neurosurgery*, vol. 10 Suppl 1, pp. 84–95, Mar. 2014, DOI: 10.1227/NEU.000000000000123.
- [45] D. M. Dalgorf *et al.*, “Image-guided surgery influences perioperative morbidity from endoscopic sinus surgery: a systematic review and meta-analysis,” *Otolaryngol Head Neck Surg*, vol. 149, no. 1, pp. 17–29, Jul. 2013, DOI: 10.1177/0194599813488519.
- [46] “MedicalExpo e-Magazine - Simulators Guide 21st-Century Robotic Surgery Training — MedicalExpo e-Magazine.” [Online]. Available: <http://emag.medicaexpo.com/article-long/a-video-game-to-train-robotic-surgeons/>. [Accessed: 04-Jan-2019].
- [47] M. Alaker, G. R. Wynn, and T. Arulampalam, “Virtual reality training in laparoscopic surgery: A systematic review & meta-analysis,” *International Journal of Surgery*, vol. 29, pp. 85–94, May 2016, DOI: 10.1016/j.ijssu.2016.03.034.
- [48] C. Zheng *et al.*, “Development of a virtual reality preoperative planning system for post-lateral endoscopic lumbar discectomy surgery and its clinical application,” *World Neurosurg*, Aug. 2018, DOI: 10.1016/j.wneu.2018.08.082.
- [49] “Doctors Using VR To Aid In Neurosurgery ‘Is A No-Brainer,’” *UploadVR*, 28-Aug-2016. [Online]. Available: <https://uploadvr.com/surgical-theater-neurosurgeons/>. [Accessed: 04-Jan-2019].
- [50] T. Mazur, T. R. Mansour, L. Mugge, and A. Medhkour, “Virtual Reality-Based Simulators for Cranial Tumor Surgery: A Systematic Review,” *World Neurosurgery*, vol. 110, pp. 414–422, Feb. 2018, DOI: 10.1016/j.wneu.2017.11.132.
- [51] A. Alaraj *et al.*, “Role of cranial and spinal virtual and augmented reality simulation using immersive touch modules in neurosurgical training,” *Neurosurgery*, vol. 72 Suppl 1, pp. 115–123, Jan. 2013, DOI: 10.1227/NEU.0b013e3182753093.
- [52] S. de Ribaupierre and R. Eagleson, “Editorial: Challenges for the usability of AR and VR for clinical neurosurgical procedures,” *Healthcare Technology Letters*, vol. 4, no. 5, p. 151, Oct. 2017, DOI: 10.1049/htl.2017.0077.
- [53] P. Pessaux, M. Diana, L. Soler, T. Piardi, D. Mutter, and J. Marescaux, “Robotic duodenopancreatectomy assisted with augmented reality and real-time fluorescence guidance,” *Surgical Endoscopy*, vol. 28, no. 8, pp. 2493–2498, Aug. 2014, DOI: 10.1007/s00464-014-3465-2.
- [54] Q. Shan, T. E. Doyle, R. Samavi, and M. Al-Rei, “Augmented Reality Based Brain Tumor 3D Visualization,” *Procedia Computer Science*, vol. 113, pp. 400–407, Jan. 2017, DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.356.
- [55] W. O. Contreras López, P. A. Navarro, and S. Crispin, “Intraoperative clinical application of augmented reality in neurosurgery: A systematic review,” *Clinical Neurology and Neurosurgery*, vol. 177, pp. 6–11, Feb. 2019, DOI: 10.1016/j.clineuro.2018.11.018.
- [56] M. J. Citardi, W. Yao, and A. Luong, “Next-Generation Surgical Navigation Systems in Sinus and Skull Base Surgery,” *Otolaryngologic Clinics of North America*, vol. 50, no. 3, pp. 617–632, Jun. 2017, DOI: 10.1016/j.otc.2017.01.012.
- [57] C. Moro, Z. Štromberga, A. Raikos, and A. Stirling, “The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy,” *Anatomical Sciences Education*, vol. 10, no. 6, pp. 549–559, Nov. 2017, DOI: 10.1002/ase.1696.
- [58] X. Hu and H. Hua, “An optical see-through multi-focal-plane stereoscopic display prototype enabling nearly correct focus cues,” in *Stereoscopic Displays and Applications XXIV*, 2013, vol. 8648, p. 86481A, DOI: 10.1117/12.2005117.
- [59] E. Watanabe, M. Satoh, T. Konno, M. Hirai, and T. Yamaguchi, “The Trans-Visible Navigator: A See-Through Neuronavigation System Using Augmented Reality,” *World Neurosurg*, vol. 87, pp. 399–405, Mar. 2016, DOI: 10.1016/j.wneu.2015.11.084.
- [60] D. Guha, N. M. Alotaibi, N. Nguyen, S. Gupta, C. McFaul, and V. X. D. Yang, “Augmented Reality in Neurosurgery: A Review of Current Concepts and Emerging Applications,” *The Canadian Journal of Neurological*, vol. 44, no. 3, pp. 235–245, May 2017, DOI: 10.1017/cjn.2016.443.
- [61] A. Vovk, F. Wild, W. Guest, and T. Kuula, “Simulator Sickness in Augmented Reality Training Using the Microsoft HoloLens,” in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, 2018, pp. 209:1–209:9, DOI: 10.1145/3173574.3173783.
- [62] R. Frikha, R. Ejbali, and M. Zaied, “Handling occlusion in Augmented Reality surgical training based instrument tracking,” in *2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA)*, 2016, pp. 1–5, DOI: 10.1109/AICCSA.2016.7945729.
- [63] M. N. Huda, H. Yu, and S. Cang, “Robots for minimally invasive diagnosis and intervention,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 41, pp. 127–144, Oct. 2016, DOI: 10.1016/j.rcim.2016.03.003.
- [64] M. Scholz, R. Parvin, J. Thissen, C. Löhnert, A. Harders, and K. Blaeser, “Skull base approaches in neurosurgery,” *Head & Neck Oncology*, vol. 2, p. 16, Jul. 2010, DOI: 10.1186/1758-3284-2-16.
- [65] A. Finegersh, F. C. Holsinger, N. D. Gross, and R. K. Orosco, “Robotic Head and Neck Surgery,” *Surgical Oncology Clinics of North America*, vol. 28, no. 1, pp. 115–128, Jan. 2019, DOI: 10.1016/j.soc.2018.07.008.
- [66] V. Bagga and D. Bhattacharyya, “Robotics in neurosurgery,” *The Annals of The Royal College of Surgeons of England*, vol. 100, no. 6_sup, pp. 23–26, May 2018, DOI: 10.1308/rcsann.suppl.19.
- [67] H. Ashrafian, O. Clancy, V. Grover, and A. Darzi, “The evolution of robotic surgery: surgical and anaesthetic aspects,” *British Journal of Anaesthesia*, vol. 119, pp. i72–i84, Dec. 2017, DOI: 10.1093/bja/aex383.
- [68] “Cirugia Estereotáctica - EcuRed.” [Online]. Available: https://www.ecured.cu/Cirug%C3%ADa_Estereot%C3%A1ctica. [Accessed: 04-Jan-2019].
- [69] G. Minchev *et al.*, “A novel miniature robotic guidance device for stereotactic neurosurgical interventions: preliminary experience with the iSYS1 robot,” *Journal of Neurosurgery*, vol. 126, no. 3, pp. 985–996, Mar. 2017, DOI: 10.3171/2016.1.JNS152005.
- [70] Z. Guo, M. C.-W. Leong, H. Su, K.-W. Kwok, D. T.-M. Chan, and W.-S. Poon, “Techniques for Stereotactic Neurosurgery: Beyond the Frame, Toward the Intraoperative Magnetic Resonance Imaging-Guided and Robot-Assisted Approaches,”

- World Neurosurg*, vol. 116, pp. 77–87, Aug. 2018, DOI: 10.1016/j.wneu.2018.04.155.
- [71] L. Puy, M. Tir, M. Lefranc, H. Yaïche, O. Godefroy, and P. Krystkowiak, “Acute Dementia After Deep Brain Stimulation in Parkinson Disease,” *World Neurosurgery*, vol. 119, pp. 63–65, Nov. 2018, DOI: 10.1016/j.wneu.2018.07.197.
- [72] S. Goering, E. Klein, D. D. Dougherty, and A. S. Widge, “Staying in the Loop: Relational Agency and Identity in Next-Generation DBS for Psychiatry,” *AJOB Neuroscience*, vol. 8, no. 2, pp. 59–70, Apr. 2017, DOI: 10.1080/21507740.2017.1320320.
- [73] “Deep-Brain Stimulation: Surgical Relief for Parkinson’s and Beyond | ALZFORUM.” [Online]. Available: <https://www.alzforum.org/print-series/192366>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [74] H. Yasin, H.-J. Hoff, I. Blümcke, and M. Simon, “Experience with 102 frameless stereotactic biopsies using the neuromate® robotic device,” *World Neurosurg*, Nov. 2018, DOI: 10.1016/j.wneu.2018.11.187.
- [75] N. Alan, P. Lee, A. Ozpinar, B. A. Gross, and B. T. Jankowitz, “Robotic Stereotactic Assistance (ROSA) Utilization for Minimally Invasive Placement of Intraparenchymal Hematoma and Intraventricular Catheters,” *World Neurosurg*, vol. 108, pp. 996.e7–996.e10, Dec. 2017, DOI: 10.1016/j.wneu.2017.09.027.
- [76] J. J. Abbott, G. D. Hager, and A. M. Okamura, “Steady-hand teleoperation with virtual fixtures,” in *The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003.*, Millbrae, CA, USA, 2003, pp. 145–151, DOI: 10.1109/ROMAN.2003.1251824.
- [77] C. Lagman *et al.*, “Laser neurosurgery: A systematic analysis of magnetic resonance-guided laser interstitial thermal therapies,” *J Clin Neurosci*, vol. 36, pp. 20–26, Feb. 2017, DOI: 10.1016/j.jocn.2016.10.019.
- [78] K.-W. Baek *et al.*, “Clinical applicability of robot-guided contact-free laser osteotomy in cranio-maxillo-facial surgery: in-vitro simulation and in-vivo surgery in minipig mandibles,” *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 53, no. 10, pp. 976–981, Dec. 2015, DOI: 10.1016/j.bjoms.2015.07.019.
- [79] N. P. Dillon *et al.*, “A Compact, Bone-Attached Robot for Mastoidectomy,” *Journal of Medical Devices*, vol. 9, no. 3, pp. 031003–031003–7, Sep. 2015, DOI: 10.1115/1.4030083.
- [80] S. Othman and B. J. McKinnon, “Financial outcomes of transoral robotic surgery: A narrative review,” *American Journal of Otolaryngology*, vol. 39, no. 4, pp. 448–452, Jul. 2018, DOI: 10.1016/j.amjoto.2018.04.001.
- [81] S. A. Patel *et al.*, “Post-operative therapy following transoral robotic surgery for unknown primary cancers of the head and neck,” *Oral Oncology*, vol. 72, pp. 150–156, 2017, DOI: 10.1016/j.oraloncology.2017.07.019.
- [82] J. K. Byrd *et al.*, “Transoral Robotic Surgery and the Unknown Primary: A Cost-Effectiveness Analysis,” *Otolaryngol Head Neck Surg*, vol. 150, no. 6, pp. 976–982, 2014, DOI: 10.1177/0194599814525746.
- [83] M. Friedman *et al.*, “Transoral robotic glossectomy for the treatment of obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome,” *Otolaryngol Head Neck Surg*, vol. 146, no. 5, pp. 854–862, May 2012, DOI: 10.1177/0194599811434262.
- [84] M. G. Inc, “Innovative minimally invasive transoral robotic surgery (TORS) for... by Dorian Chauvet.” [Online]. Available: <https://academy.eans.org/eans/2016/athens/166724/dorian.chauvet.innovative.minimally.invasive.transoral.robotic.surgery.28tors29.html>. [Accessed: 12-Dec-2018].
- [85] D. Chauvet, S. Hans, A. Missistrano, C. Rebours, W. E. Bakkouri, and G. Lot, “Transoral robotic surgery for sellar tumors: first clinical study,” *Journal of Neurosurgery*, vol. 127, no. 4, pp. 941–948, Oct. 2017, DOI: 10.3171/2016.9.JNS161638.
- [86] M. E. Garstka, E. S. Alameer, S. A. Awwad, and E. Kandil, “Conventional Robotic Endoscopic Thyroidectomy for Thyroid Cancer,” *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America*, Dec. 2018, DOI: 10.1016/j.ecl.2018.10.005.
- [87] C. Faria, W. Erhagen, M. Rito, E. De Momi, G. Ferrigno, and E. Bicho, “Review of Robotic Technology for Stereotactic Neurosurgery,” *IEEE Rev Biomed Eng*, vol. 8, pp. 125–137, 2015, DOI: 10.1109/RBME.2015.2428305.
- [88] F. Rydén and H. J. Chizeck, “Forbidden-region virtual fixtures from streaming point clouds: Remotely touching and protecting a beating heart,” in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 3308–3313, DOI: 10.1109/IROS.2012.6386012.
- [89] G. R. Sutherland, Y. Maddahi, L. S. Gan, S. Lama, and K. Zareinia, “Robotics in the neurosurgical treatment of glioma,” *Surg Neurol Int*, vol. 6, no. Suppl 1, pp. S1–S8, Feb. 2015, DOI: 10.4103/2152-7806.151321.
- [90] H. Ueda *et al.*, “Toward Autonomous Collision Avoidance for Robotic Neurosurgery in Deep and Narrow Spaces in the Brain,” *Procedia CIRP*, vol. 65, pp. 110–114, 2017, DOI: 10.1016/j.procir.2017.04.027.
- [91] “Robotic Surgery: Risks vs. Rewards | AHRQ Patient Safety Network.” [Online]. Available: <https://psnet.ahrq.gov/webmm/case/368/Robotic-Surgery-Risks-vs-Rewards->. [Accessed: 24-Jan-2019].
- [92] S. Rangarajan, R. A. Hachem, E. Ozer, A. Beer-Furlan, D. Prevedello, and R. L. Carrau, “Robotics in Sinus and Skull Base Surgery,” *Otolaryngologic Clinics of North America*, vol. 50, no. 3, pp. 633–641, 2017, DOI: 10.1016/j.otc.2017.01.013.



Hermes Fabian Vargas Rosero.

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia (2010). Maestría en Automática de la Universidad del Cauca (2016). Sus líneas de interés son la robótica médica y la instrumentación. Actualmente es profesor del Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. Es candidato a doctor del Programa de Doctorado en Ciencias de la Electrónica de la Universidad del Cauca y estudiante del Doctorado en Mecatrónica de la Universidad de Málaga-España.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5682-3522>.



Oscar Andrés Vivas Albán. Ingeniero Electrónico de la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia (1989). Maestría en Automática de la Universidad de Nantes, Francia (2001). Doctorado en Robótica de la Universidad de Montpellier II, Montpellier, Francia (2004). Sus líneas de interés son el control de robots y la robótica médica. Actualmente es profesor

titular del Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, en Popayán. Pertenece al Grupo de Automática Industrial de la misma Universidad, escalafonado como A por Colciencias. Tiene 10 publicaciones en revistas internacionales indexadas y 15 ponencias en eventos internacionales.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5381-8234>.