



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



E.T.S.
INGENIERÍA
INFORMÁTICA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
INFORMÁTICA**

INGENIERÍA DE LA SALUD

**PROTOTIPO DE UN ASPIRADOR AUTOMÁTICO
PARA CIRUGÍA POR VÍA ENDONASAL**

**PROTOTYPE OF AN AUTOMATIC SURGICAL
ASPIRATOR FOR ENDONASAL SURGERY**

Realizado por:

Cristina Cuesta Arranz

Tutorizado por:

Víctor F. Muñoz Martínez y Enrique Bauzano Núñez

Departamento:

Ingeniería de Sistemas y Automática

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Málaga, septiembre 2019

Fecha defensa:

El Secretario del Tribunal

Resumen

El presente trabajo describe un prototipo de un aspirador multifuncional para la cirugía endoscópica endonasal. En este tipo de intervenciones, el cirujano accede al seno esfenoidal a través de las fosas nasales. En concreto, el dispositivo propuesto permite realizar tanto la función de aspirado como de administración de fármacos con una sola herramienta, evitando tener que cambiarla durante la intervención para estas tareas. La herramienta puede ser controlada de forma manual o de forma automática mediante el uso de un robot quirúrgico, para lo cual se dispone de sendos elementos de agarre específicos para cada modo de empleo. En ambos casos, la herramienta posee una carcasa común que integra una cánula alargada. Esta parte es la que se introduce por las vías nasales, y se aprovecha como conducto común para la irrigación o la aspiración, siempre de forma exclusiva. Por otro lado, la carcasa posee un ensamblaje que permite cambiar el elemento de agarre de la herramienta. El elemento de agarre manual posee el botón de hombre muerto que tendrá que ser pulsado para activar la aspiración, y otro para cambiar a modo de irrigación que únicamente podrá ser activado si esta activado el pulsador de hombre muerto. El elemento de agarre automático comunica las actuaciones de los pulsadores anteriormente mencionados a través del controlador del robot quirúrgico. Toda la arquitectura funcional del sistema ha sido integrada en el dispositivo mediante el framework ROS y una placa Arduino.

Palabras clave: cirugía endonasal, neurocirugía, aspirador, irrigador, robótica, cavidad nasal, instrumento quirúrgico, automático, manual, microprocesador, ROS, succión, administración fármaco, Arduino, CAD.

Abstract

The present work describes a prototype of a multifunctional aspirator for endonasal endoscopic surgery. In this kind of interventions, the surgeon accesses the sphenoid sinus through the nostrils. Specifically, the propose device allows to perform both the function of aspiration and administration of drugs with a single tool, avoiding having to change it during the intervention for these tasks. The tool can be controlled manually or automatically using a surgical robot, for which specific gripping elements are available for each mode of use. In both cases, the tool has a common housing that integrates an elongated cannula. This part is the one that is introduced through the nasal passages, and is used as a common conduit for irrigation or aspiration, always exclusively. On the other hand, the housing has an assembly that allows changing the grip element of the tool. The manual grip element has the dead man button that will have to be pressed to activate the aspiration, and another to change to irrigation mode that can only be activated if the dead man button is activated. The automatic grip element communicates the actions of the aforementioned push buttons through the surgical robot controller. All the functional architecture of the system has been integrated into the device through the ROS framework and an Arduino board.

KeyWords: endonasal surgery, neurosurgery, aspirator, irrigator, nasal cavity, surgical instrument, automatic, manual, microprocessor, ROS, suction, drug administration, Arduino, CAD.

Índice

1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Motivación del trabajo de fin de grado.....	2
1.3 Objetivos y finalidades del trabajo de fin de grado	3
1.4 Contenido de la memoria.....	4
2 Estado del arte	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 La cirugía endonasal.....	5
2.3 Los robots quirúrgicos	6
2.4 El instrumental quirúrgico	8
2.5 Conclusiones.....	10
3 Descripción del sistema.....	11
3.1 Introducción.....	11
3.2 Realización de la cirugía endonasal.....	11
3.3 Arquitectura del sistema	13
3.4 Conclusiones.....	15
4 Desarrollo del prototipo.....	17
4.1 Introducción.....	17
4.2 Conexionado hidráulico y eléctrico	17
4.3 Metodología de funcionamiento del sistema	20

4.4	Diseño mecánico de la herramienta de aspiración.....	22
4.5	Conclusiones.....	26
5	Implantación del sistema y experimentos	27
5.1	Introducción.....	27
5.2	Componentes hardware y software.....	27
5.3	Integración del sistema	32
5.4	Experimentos.....	34
5.3.1	Experimento 1	35
5.3.2	Experimento 2	37
5.3.3	Experimento 3	42
5.4	Discusión de los resultados.....	43
6	Conclusiones y trabajos futuros.....	45
6.1	Conclusiones.....	45
6.2	Futuras líneas de trabajo	46
	Bibliografía	49
	Anexo	55

Tabla de contenidos: Figuras

Figura 1.	Anatomía de la cavidad endonasal [21].....	6
Figura 2.	Configuración para TORS [25]	7
Figura 3.	Instrumentos para cirugía endonasal [29].....	8
Figura 4.	Dispositivos y métodos para la irrigación transnasal o la succión de los senos	9
Figura 5.	Cirugía cerebral tubo de aspiración multifuncional.....	10

Figura 6. (a) Posición quirúrgica semi-sentada del paciente [42], y (b) cirugía endonasal robotizada [43]	12
Figura 7. Arquitectura del sistema de aspiración e irrigación asistida por el cirujano	14
Figura 8. Arquitectura del sistema de aspiración e irrigación asistida por el robot.....	14
Figura 9. Circuito de los fluidos para succión y administración de fármaco	18
Figura 10. Esquema para el conexionado del circuito eléctrico.....	19
Figura 11. Diagrama de bloques que describe el funcionamiento del dispositivo de aspiración	21
Figura 12. Diseño mecánico del cabezal de la herramienta	23
Figura 13. Integración del cabezal con la caña alargada.....	23
Figura 14. Elemento de agarre para el modo de manejo manual	24
Figura 15. Enganche para el modo de manejo manual	25
Figura 16. Herramientas de aspiración con los elementos de agarre ensamblados	26
Figura 17. Placa programable Arduino Uno Rev3 (izquierda) y Relay Shield v3.0 (derecha)	28
Figura 18. Bomba peristáltica (izquierda) y bomba de aspiración (derecha)	29
Figura 19. Electroválvula	30
Figura 20. Sensor de presiones.....	30
Figura 21. Brazo manipulador UR3 de Universal Robots (izquierda) y dispositivo háptico Phantom Omni de 3D Systems (derecha)	31
Figura 22. Plataforma de experimentación in-vitro para validar el funcionamiento de la herramienta de aspiración junto con los elementos de agarre	33
Figura 23. Conexionado de los conductos de aspiración e irrigación.....	33
Figura 24. Conexionado eléctrico de los elementos de la herramienta. (1. Conexionado de la bomba de succión. 2. Conexionado de la bomba de irrigación 3. Conexionado de la	

electroválvula. 4. Señal analógica procedente del sensor. 5. Conexión del elemento de iluminación. 6. y 7. Conexión de los botones de succión e irrigación).....	34
Figura 25. Prueba de aspiración	35
Figura 26. Prueba de administración de fármaco	36
Figura 27. Medidas de presión durante la prueba de succión	37
Figura 28. Evolución de presiones en cada fase del proceso de succión y administración de fármaco en el modo de manejo manual de la herramienta	39
Figura 29. Desplazamiento del robot a lo largo del tiempo	43

Introducción

1.1 Antecedentes

En neurocirugía, el primer abordaje craneal fue descrito por Wagner en 1889 como una “resección craneal temporal”, actualmente conocida como “craneotomía osteoplástica con colagajo óseo pendiculado”. Una craneotomía es cualquier tipo de cirugía abierta realizada en el espacio intracraneal [1]. Hay distintos tipos de craneotomías según la zona donde se realice la incisión, pero todas ellas requieren manipular la zona neurovascular. Por ello, antes de los setenta algunas patologías como los meningiomas de la base del cráneo tenían un alto índice de mortalidad [2]. Sin embargo, actualmente, las nuevas técnicas han hecho posible realizar neurocirugías de la base del cráneo por vía nasal, lo que disminuye la cantidad de tejido nervioso manipulado [3]. En el campo de la otorrinolaringología, el uso de cirugías abiertas para tratar ciertas patologías como por ejemplo en el seno maxilar, también han sido sustituidas por estas otras técnicas que disminuyen las secuelas [4].

Actualmente se realiza la cirugía endonasal para este tipo de intervenciones, ya que son cirugías de mínima invasión. Al igual que ocurre en cualquier intervención quirúrgica, el sangrado supone un problema para la visualización del campo quirúrgico. Este hecho resulta particularmente relevante en cirugía endonasal debido a las pequeñas dimensiones del espacio intranasal. En la actualidad, el mercado ofrece diversos tipos de aspiradores con cabezales específicos para este tipo de cirugía de pequeño diámetro y amplia longitud, también denominados de caña larga [5]. Los aspiradores quirúrgicos endonasales incorporan una regulación del caudal de aspiración específica para este tipo de intervenciones, que difiere de la cirugía laparoscópica general [6] [7]. Hay aspiradores que combinan la limpieza por aspiración con la irrigación de líquidos como químicos, agua purificada o fluidos de masaje [8].

También hay dispositivo que realizan de forma simultánea la disección y succión de sangrado, pero sin inyección de fármaco [9].

Otro inconveniente que presentan estos tipos de cirugías es la necesidad de administrar fármaco durante la intervención para evitar infecciones. Ciertas invenciones intentan solventar este problema introduciendo tubos paralelos al endoscopio, para así poder administrar fármaco cuando el cirujano lo vea conveniente [10]. Además, para administrar anestésicos locales y fármacos durante las cirugías endoscópicas también hay dispositivos que insertan una jeringa a través del canal hueco del endoscopio [11].

Existen dispositivos que utilizan el mismo conducto para succionar fluido o administrar fármaco. Su funcionalidad debe ser establecida antes de la intervención, ya que hay que conectar y configurar el aspirador o irrigador a la herramienta, pero nunca ambos de forma simultánea [12]. Para cirugía cerebral hay dispositivos que nos ayudan a realizar estas dos funciones con el mismo dispositivo. Para ello, se emplean cánulas independientes para el circuito de cada fluido, lo que limita el tipo y morfología de la herramienta [13].

Este trabajo de fin de grado plantea como solución a los problemas mencionados el diseño y la realización de un prototipo de un aspirador quirúrgico automatizado para cirugía endonasal. De esta forma, el cirujano podrá utilizar el mismo dispositivo tanto para administrar fármaco como para succionar determinados fluidos en plena intervención sin necesidad de utilizar dos instrumentos distintos. Además, disminuye el número de instrumentos quirúrgicos utilizados, facilitando al cirujano la maniobrabilidad.

1.2 Motivación del trabajo de fin de grado

La motivación de este trabajo de fin de grado se fundamenta en la realización de un instrumento quirúrgico para cirugía mínimamente invasiva, en concreto es un sistema que realiza las funciones de aspiración e irrigación por la cavidad nasal, diseñado para realizar cirugías por vía endonasal. Hoy en día, el grupo de investigación de Robótica Médica del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga está involucrado en el proyecto DPI2016-80391-C3-1-R, relacionado con este trabajo de fin de grado.

1.3 Objetivos y finalidades del trabajo de fin de grado

El objetivo de este trabajo consiste en facilitar las tareas de limpieza y cura realizadas por el cirujano a la hora de realizar un procedimiento quirúrgico por vía nasal. Para cumplir este objetivo, se propone realizar los siguientes pasos:

1. Búsqueda de posibles soluciones existentes actualmente

Esta fase requiere de la investigación sobre posibles invenciones, patentes, artículos o productos comercializados que tengan como finalidad ayudar a solucionar este problema. Con ello, se analizan los pros y contras que tienen estos dispositivos y sus limitaciones. Con esta información, se intentan abordar las ventajas que poseen y solventar las carencias en el nuevo dispositivo.

2. Elección de los componentes y elementos de control.

La segunda fase consta de la elección de los elementos necesarios para el desarrollo de un prototipo funcional. En primer lugar, se realiza una exhaustiva investigación para conocer cuáles serán los elementos electromecánicos más adecuados. En segundo lugar, se dedica especial atención a la selección del elemento de control con el que se integran el resto de los componentes.

3. Diseño del prototipo

3.1 Diseño del circuito por donde circula el material. Debe diseñarse el circuito por donde circula tanto el fármaco como aquellos materiales o fluidos que se succionen.

3.2 Diseño del circuito eléctrico. Los distintos elementos que integran el dispositivo deben estar conectados de tal forma que puedan actuar en conjunto como un sistema perfectamente coordinado. Para ello es necesario conectar los distintos elementos electromecánicos al elemento de control.

4. Modelado y diseño de la herramienta de manipulación

Para la correcta manipulación del dispositivo es necesario realizar un diseño en detalle de una herramienta que facilite su manejo al cirujano. En primer lugar, se diseñará en un programa CAD los modelos 3D de cada pieza de la que se compone la herramienta. En segundo lugar, a partir de dichos modelos se generan las piezas físicas mediante el uso de

una impresora 3D.

5. Programación y validación del sistema.

Una vez diseñado el comportamiento de los elementos electromecánicos de la herramienta, se procede a programar el elemento de control para que cumpla las especificaciones planteadas. La validación de todas estas funcionalidades se realiza mediante una batería de experimentos.

6. Documentación del trabajo de fin de grado.

En este último paso se recopilan todas las tareas realizadas a lo largo del proceso en un documento o memoria: el análisis preliminar sobre las posibles soluciones, el diseño del sistema, el modelado de la herramienta, su programación y su validación, además de las posibles futuras líneas de trabajo.

1.4 Contenido de la memoria

En el presente capítulo se ha planteado cual ha sido la motivación y los objetivos de este trabajo de fin de grado, además de los avances que ha habido en este campo a lo largo del tiempo. En el capítulo 2 se explica detalladamente en qué consiste la cirugía endonasal y cuáles son sus ventajas e inconvenientes, incluyendo la problemática del sangrado. En ese capítulo también se describe el instrumental quirúrgico que hay actualmente para desarrollar esta tarea y sus limitaciones, a partir de las cuales se plantean los objetivos de este trabajo de cara a facilitar las tareas de aspiración de sangrado y administración de fármacos por parte del cirujano. El capítulo 3 plantea la metodología de un protocolo de cirugía endonasal para extraer las características de la arquitectura funcional de la herramienta de aspiración. A continuación, en el capítulo 4 se presenta el desarrollo y el procedimiento seguido para la realización del aspirador tanto a nivel lógico como de diseño y estructural. Para validar el correcto funcionamiento del sistema, en el capítulo 5 se presenta la integración de todos los elementos de la herramienta y los experimentos realizados con sus respectivos resultados. Por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y posibles futuras líneas de trabajo.

Estado del arte

2.1 Introducción

En este capítulo se describe cuál es la finalidad de la cirugía endonasal. Gracias a los avances tecnológicos, este tipo de cirugías ha traído grandes ventajas tanto para los cirujanos como para los pacientes. Aunque cabe destacar que hay algunas carencias que todavía se deben solventar.

Hoy en día encontramos múltiples invenciones y productos que poseen algún tipo de relación con la finalidad perseguida en la realización del presente trabajo de fin de grado. Por ello, se describen las ventajas que tienen esos dispositivos y sus limitaciones y restricciones a la hora de abordar dicha tarea. También describe cuál es la finalidad y utilidad de cada uno de ellos.

2.2 La cirugía endonasal

La cirugía endonasal es un tipo de cirugía mínimamente invasiva que utiliza la cavidad nasal como puerto de acceso para realizar intervenciones en otorrinolaringología [14], para enfermedades nano-sinusales, inflamaciones en la mucosa de la nariz o tumorales [15], en los senos paranasales y en neurocirugía para realizar intervenciones en la base del cráneo. También se emplea para solucionar la obstrucción del sistema lagrimal en el sistema vertical [16] y para reparación de fístulas de líquido cefalorraquídeo [17], aunque estas son sólo algunas de las infinitas intervenciones que se pueden realizar.

Hay estudios que comprueban la eficacia de este tipo de intervenciones frente a la cirugía convencional. Estos estudios realizados sobre cadáveres muestran cómo dicha técnica es efectiva para lesiones de más de 2 cm en la parte lateral y medial del cráneo, aunque en muchos casos la craneotomía sigue siendo la mejor opción [18]. También hay estudios que muestran

que hay mayor riesgo de haber complicaciones en cirugías sinusales tradicionales que en las cirugías endoscópicas endonasales [19].

Una de las mayores ventajas es que proporcionan una cavidad natural que nos permite acceder a diversas partes de la estructura de la base del cráneo sin necesidad de realizar ningún tipo de cirugía craneofacial que pueda dejar algún tipo de cicatriz visible [20]. Sin embargo, no todo son ventajas, ya que la cavidad nasal tiene poca amplitud, pero grandes distancias y no todos los instrumentos utilizados en cirugía pueden utilizarse en estas condiciones. La Figura 1 representa un esquema de una intervención de cirugía endonasal mínimamente invasiva en la que se pueden visualizar este problema [21].

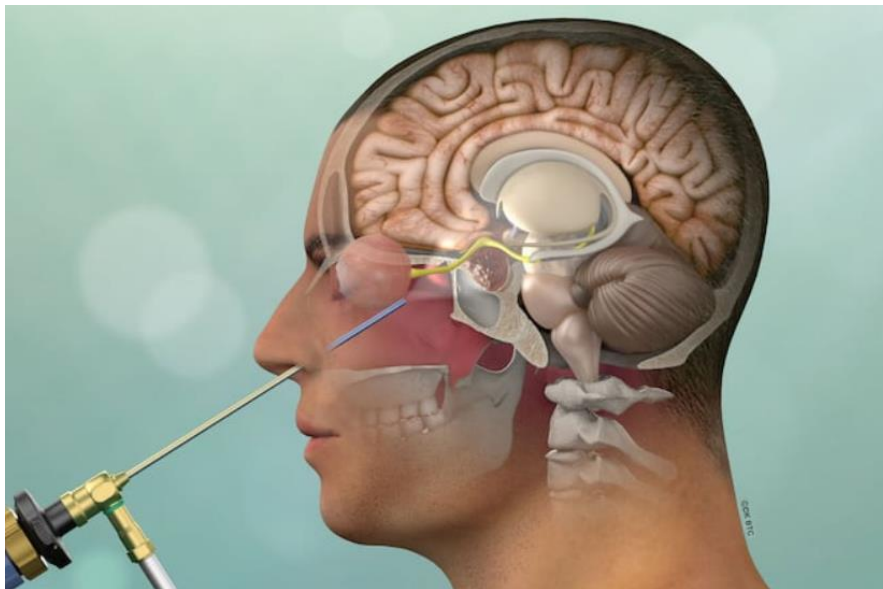


Figura 1. Anatomía de la cavidad endonasal [21]

Otro inconveniente asociado a este tipo de intervenciones son las posibles infecciones que pueden producirse en la vía nasal, por lo que es necesario administrar fármaco para prevenir posibles patologías [18]. Además, en este tipo de intervenciones el sangrado dificulta la visión a través del endoscopio, por lo que es necesario succionar el fluido cuando el cirujano lo vea conveniente.

2.3 Los robots quirúrgicos

Hoy en día, la utilización de robots para realizar intervenciones quirúrgicas abarca gran cantidad de escenarios clínicos. Estas innovaciones en la tecnología han mejorado la realización de cirugías endonasales, ya que las pequeñas dimensiones de la cavidad nasal y la escasa visión

que posee el cirujano dificultan la cirugía. Además, la gran complejidad que presentan necesita una gran precisión para realizar estas intervenciones [22].

Algunas de las limitaciones de este tipo de cirugías robotizadas están relacionadas con la escasa sensación táctil y las grandes dimensiones de los equipos quirúrgicos. Actualmente, para estas intervenciones se utiliza la máquina Da Vinci, a la cual se puede incorporar una gran diversidad de instrumental quirúrgico específicamente diseñado para este sistema robótico [23]. Entre ellos, se puede encontrar herramientas de aspiración e irrigación, pero en este caso deben ser manejadas de forma específica por el cirujano [24]. Dentro de las cirugías que utilizan robots quirúrgicos, la cirugía robótica transoral (TORS, TransOral Robotic Surgery) es una de las cirugías realizadas para intervenciones de cabeza y cuello. Para este tipo de intervenciones es necesario una consola (CC) manipulada por el cirujano principal (Ci), un carro para el paciente (CP) y un carro de vídeo (CV). Otros operarios que se encuentran es esta intervención son el cirujano asistente (As), el instrumentista (In) y el anestesiista (An), como se muestra en la Figura 2 [25].

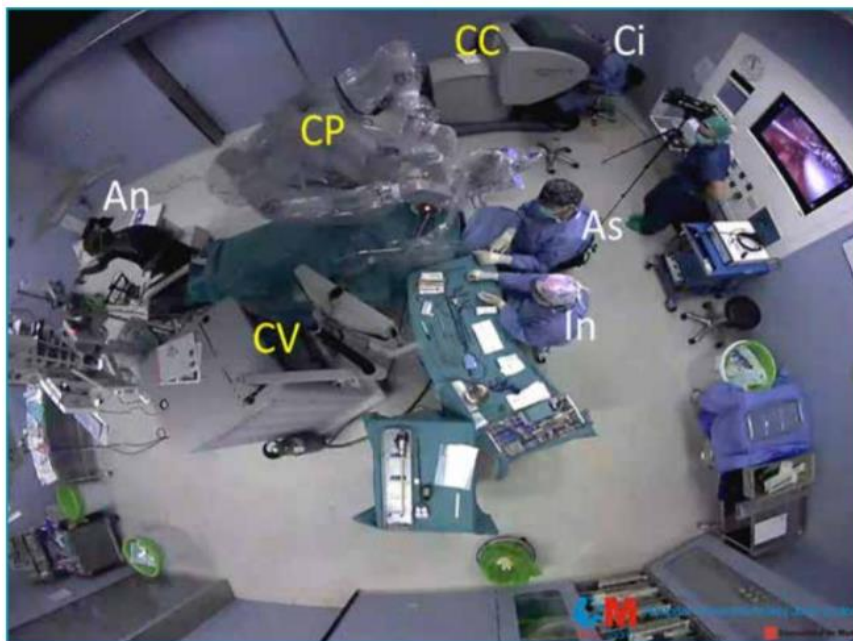


Figura 2. Configuración para TORS [25]

Para cirugía endonasal hay un robot endoscópico nasal de cirugía pasiva que posee un método de frenado inverso por lo que, en caso de haber algún tipo de incidente durante la operación, las articulaciones del robot se mantienen en la posición y postura originales, protegiendo al paciente y al cirujano [26].

Por la mayor precisión que supone, las cirugías transnasales de la base del cráneo están controladas robóticamente por un entorno teleoperado que facilita al cirujano la operación [27]. También hay simuladores que obtienen la actividad cerebral del paciente durante la cirugía endonasal a partir de señales de un electroencefalograma (EEG). Las señales las capta una sonda que es manipulada por el cirujano o en su caso por un robot quirúrgico [28].

2.4 El instrumental quirúrgico

El instrumental quirúrgico estándar de una cirugía convencional es demasiado grande o corto para este tipo de incisiones. Por ello, los instrumentos utilizados en cirugías endonasales deben adecuarse al espacio de uso. En estas intervenciones, el cirujano utiliza instrumentos alargados y de pequeño grosor a través de la nariz, también llamados herramientas laparoscópicas. Estos instrumentos pueden tener distintos ángulos de orientación según la zona a la que se desee acceder. En concreto, en cirugías endoscópicas endonasales transfenoidales se emplean instrumentos rectos [3]. Esto facilita la realización de la cirugía, ya que es necesario introducir varios instrumentos como un endoscopio, un gancho o una tijera para la extracción del tumor, un aspirador, un irrigador o una herramienta para administrar algún fármaco, entre otros. Los instrumentos de cirugía endonasal son apropiados para la mayoría de los abordajes realizados a través de estas cavidades [30]. En la Figura 3 se puede apreciar el instrumental utilizado para estas cirugías.



Figura 3. Instrumentos para cirugía endonasal [29]

Como se ha mencionado antes, uno de los mayores problemas de la cirugía endonasal son las dimensiones de los instrumentos. Sin embargo, hay invenciones que intentan solventar este

problema con la incorporación de distintos cabezales tanto para cirugía de los senos paranasales como para neurocirugía. En la Figura 4 se muestra una imagen de un cabezal diseñado específicamente para incorporar en aspiradores quirúrgicos para realizar intervenciones para cirugía endonasal [31] [32].

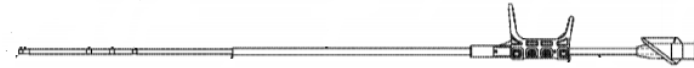


Figura 4. Dispositivos y métodos para la irrigación transnasal o la succión de los senos

Estos dispositivos están conectados a un asistente quirúrgico que posee un mecanismo específico para succionar fluidos. Sin embargo, a lo largo de la intervención el sangrado va variando, por lo que no es efectivo succionar un caudal constante. Lo más efectivo es variar el caudal dependiendo de las condiciones quirúrgicas que hay en cada momento. Una forma de regular el caudal de succión es variando la apertura del dispositivo de succión [33] [34].

Otro inconveniente es el pequeño espacio de manipulación que hay dentro de las cavidades. Por este motivo, una solución factible es aumentar el tamaño de dichas cavidades. Para ello, se puede dilatar el área intervenida administrando el fármaco adecuado para este efecto [36]. La administración de fármaco puede realizarse mediante dispositivos genéricos que apliquen cualquier tipo de fluido a través de una jeringa que va unida al endoscopio por un canal hueco que posee [8]. Al igual que en los dispositivos destinados a succionar, para controlar la irrigación también hay dispositivos que se encargan de regular la administración de fármaco. Esto es posible gracias a un elemento de control que permite controlar el dispositivo y una válvula que se puede regular manualmente [35].

Hay dispositivos que son capaces de succionar e irrigar con el mismo artílugio, muchos son solo para solo cirugías relacionadas con patologías de los senos paranasales y otras tienen la finalidad de controlar la presión intracraneal combinando la succión e inyección. Sin embargo, estos dispositivos utilizan dos canales distintos, es decir, no utilizan una misma caña para ambas funciones [37] [38].

Existen herramientas que abarcan estas tres funciones, es decir, son capaces de administrar fármaco, succionar fluidos y tejidos, además tienen la capacidad de agrandar e inflar el área para facilitar su manipulación e intervención. Cada función tiene un mecanismo independiente

el uno del otro, por lo que no están interconectados. En concreto, se utilizan tres cañas alargadas que están unidas las unas a las otras de forma paralela. Sin embargo, las dimensiones que ocupa son demasiado grandes, por lo que su uso queda restringido a intervenciones de neurocirugía craneales. Este dispositivo se muestra en la Figura 5 [39].



Figura 5. Cirugía cerebral tubo de aspiración multifuncional.

Debido a las limitaciones encontradas en los ejemplos anteriores, este trabajo propone el diseño de una herramienta capaz de resolver estas carencias. El sangrado dificulta la intervención por lo que, aunque existen propuestas que permiten succionar cualquier fluido variando el cabezal del aspirador, todas ellas carecen de la capacidad de administrar fármacos. También hay múltiples dispositivos diseñados para la administración de líquidos, ya sea realizando solo esta función o unidos al endoscopio. En las propuestas de aspiradores e irrigadores conjuntos muchas de ellas no están destinadas para neurocirugía, además de no utilizar el mismo conducto para ambas funciones. Así, el trabajo de fin de grado presenta un aspirador para cirugía endonasal capaz de realizar ambas funciones utilizando el mismo conducto. Además, podrá ser utilizado tanto de forma manual, accionado y controlado por el cirujano, como de forma automática, es decir, manipulado a través de un robot quirúrgico.

2.5 Conclusiones

En el presente capítulo se han planteado los aspectos más relevantes sobre la cirugía endonasal. Este tipo de cirugías ha sustituido a otras más tradicionales aportando múltiples ventajas, tanto en neurocirugía como en otorrinolaringología. Aun siendo una intervención con múltiples beneficios, existen limitaciones desde el punto de vista de la maniobrabilidad y la precisión de los movimientos del instrumental quirúrgico. Aunque es cierto que actualmente la utilización de robots quirúrgicos ha facilitado dichas tareas, y mejorado la precisión y manejo de la intervención, es necesario un instrumental específico. Por último, se han presentado una serie de ejemplos que resuelven el problema de aspiración o irrigación, los cuales presentan algunas limitaciones que se contemplan como objetivos a resolver en el presente trabajo.

Descripción del sistema

3.1 Introducción

En este capítulo se describe el protocolo que es necesario seguir a la hora de realizar una intervención quirúrgica, además del procedimiento quirúrgico de neurocirugía a través de las vías nasales y los pasos que sigue el cirujano para realizar esta intervención. También se explica cómo se emplean los sistemas de aspiración y administración de un fármaco en estos procedimientos y cuáles son las desventajas e inconvenientes que poseen. A continuación, se plantea la arquitectura funcional que plantea este trabajo de fin de grado para resolver el problema de la aspiración e irrigación.

3.2 Realización de la cirugía endonasal

En los quirófanos es necesario seguir un protocolo a la hora de realizar cualquier intervención quirúrgica. El protocolo marca que el paciente debe utilizar ropa específica apropiada para el procedimiento quirúrgico y el personal que realice la intervención deberá ponerse ropa limpia de quirófano para evitar posibles contaminaciones. También es necesaria una preparación antiséptica de la superficie donde se va a realizar la incisión antes de la intervención. Además, es de vital importancia realizar la irrigación de la herida y el lavado intracavitarios para reducir las infecciones [40].

Concretamente, en la cirugía endonasal se requiere un gran conocimiento de la anatomía de la cabeza junto con la destreza y agilidad de los cirujanos a la hora de utilizar el instrumental

quirúrgico. Este tipo de cirugía se realiza con el paciente en posición semi-sentada, es decir, en posición supina (paralelo al suelo) pero con una ligera inclinación y con la cabeza apoyada en un cabezal de herradura. De esta manera, el instrumental entra paralelo al suelo, ya que facilita al cirujano la intervención [41]. La Figura 6a representa la posición en la que se encuentra el paciente. La Figura 6b representa una intervención mediante la utilización de un robot quirúrgico. El robot es controlado por el neurocirujano mediante un dispositivo háptico. Al robot quirúrgico se le acopla la herramienta autónoma que se introduce por la vía nasal. Por otro lado, la cámara del endoscopio se conecta a un robot autónomo que posee un intercambiador automático de herramientas y permite visualizar la imagen intra-craneal.

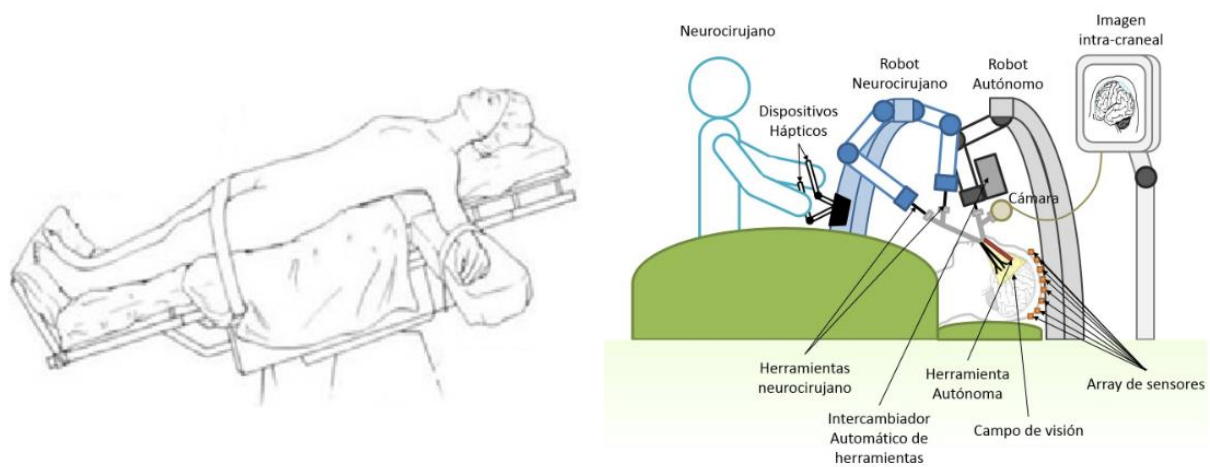


Figura 6. (a) Posición quirúrgica semi-sentada del paciente [42], y (b) cirugía endonasal robotizada [43]

Si se analiza concretamente el caso de la extracción de tumores hipofisarios, lo primero que se realiza es una descongestión mediante algodones empapados de fármaco. A continuación, se introduce el endoscopio por la vía nasal para avanzar lentamente a lo largo de la cavidad hasta llegar al lugar donde se encuentra el tumor. Luego, se realiza la extracción del tumor con curetas rectas que facilitan el proceso. Por último, es necesario sellar y reconstruir la zona intervenida [45]. Todo ello está realizado por el cirujano. El endoscopio y el resto de los instrumentos quirúrgicos se introducen por la misma vía nasal, paralelos unos de otros. Normalmente se escoge la fosa más amplia. Sin embargo, hay cirujanos que prefieren introducir el endoscopio por una fosa y trabajar por otra. Además, el endoscopio es sostenido por el cirujano con la mano no dominante para poder manipular con la mano dominante el resto de los instrumentos que requieren mayor precisión, como por ejemplo las tijeras a la hora de cortar tejido. En muchas

ocasiones el endoscopio va acompañado de un sistema de irrigación que permite limpiar su óptica en el caso de ser obstruida por algún material biológico o una jeringa con suero fisiológico por si es necesario administrar fármaco. Además, se mantiene siempre en funcionamiento un aspirador para eliminar los residuos biológicos y evitar que se manche la lente del endoscopio [46][47].

3.3 Arquitectura del sistema

Con la finalidad de solventar el problema expuesto en el apartado anterior centrado en el sangrado, se ha realizado un prototipo de un dispositivo de aspiración para cirugía endonasal capaz de administrar fármaco y aspirar fluido. Este sistema puede estar integrado por dos modos de manejo distintos: el modo manual y el modo automático. El modo manual permite el manejo directo de la herramienta por el cirujano mediante un elemento de agarre con un pulsador para la aspiración y un regulador para la administración de fármaco. Por su parte, el modo automático incluye un mecanismo de acople a un brazo manipulador con el que se navega la herramienta de forma autónoma.

La Figura 7 muestra la arquitectura funcional del sistema propuesta para resolver la funcionalidad de la herramienta en el modo de manejo manual. La interacción entre el cirujano y el paciente se realiza a través del Aspirador Quirúrgico a través de una Interfaz Hombre-Máquina ensamblado al mismo. Dicha interfaz incluye un pulsador de seguridad denominado de hombre-muerto, de manera que cualquier funcionalidad del aspirador quirúrgico queda deshabilitada mientras dicho pulsador no esté presionado de forma intencionada. En caso de estar presionado, la interfaz dispone de un regulador adicional con el que se selecciona en el Selector de Caudal del aspirador quirúrgico si se debe activar el funcionamiento de la Bomba de Succión (regulación nula) o de la Bomba de Inyección (regulación superior a cero). En el modo de funcionamiento de aspiración, se puede realizar un análisis sobre el fluido que atraviesa el conducto mediante un sistema de Monitorización de la Succión. En concreto, el conducto de la Bomba de Succión incluye un Sensor de Presiones para medir el paso de líquidos o aspiración en vacío. Esta información es recopilada por un Clasificador, el cual devuelve una señal a la Interfaz Hombre-Máquina que indica si el conducto de aspiración está parado, funcionando en vacío o recogiendo fluido. Ambas bombas se consideran reguladas mediante un control en bucle abierto.

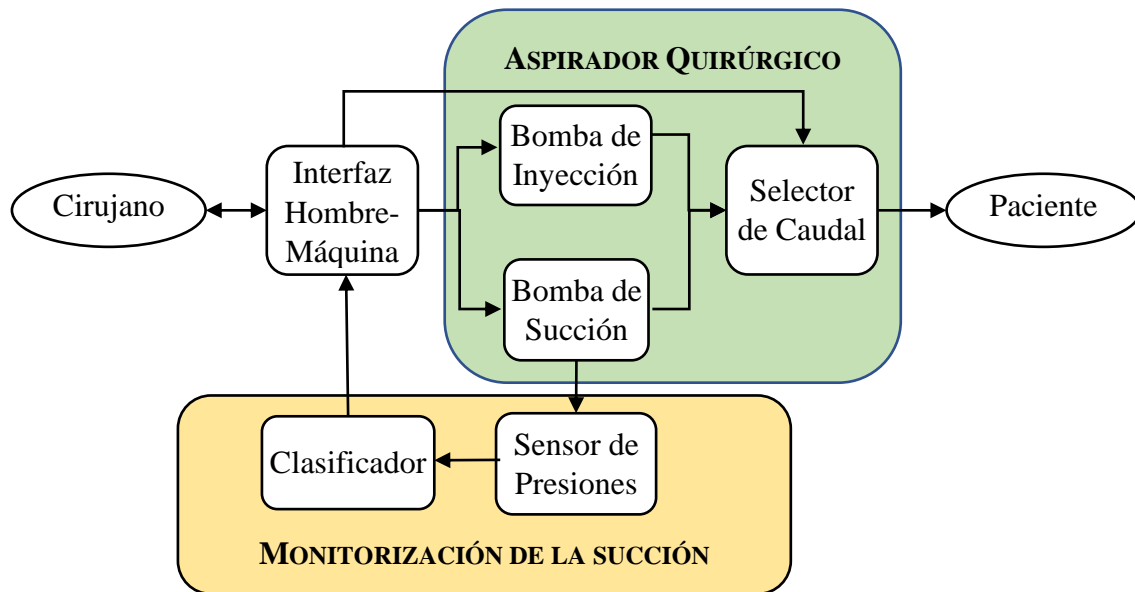


Figura 7. Arquitectura del sistema de aspiración e irrigación asistida por el cirujano

En el caso del modo de manejo automático, la arquitectura funcional se ve modificada respecto a la vista anteriormente. Así, en la Figura 8 puede verse que el Cirujano (que manejaba manualmente el aspirador quirúrgico) se sustituye por un Robot Quirúrgico, el cual envía directamente las señales correspondientes a las generadas por la Interfaz Hombre-Máquina. Las decisiones sobre la actuación de estas señales se toman a partir del Planificador, el cual calcula tanto trayectorias de navegación como el modo de funcionamiento del Aspirador Quirúrgico de forma autónoma.

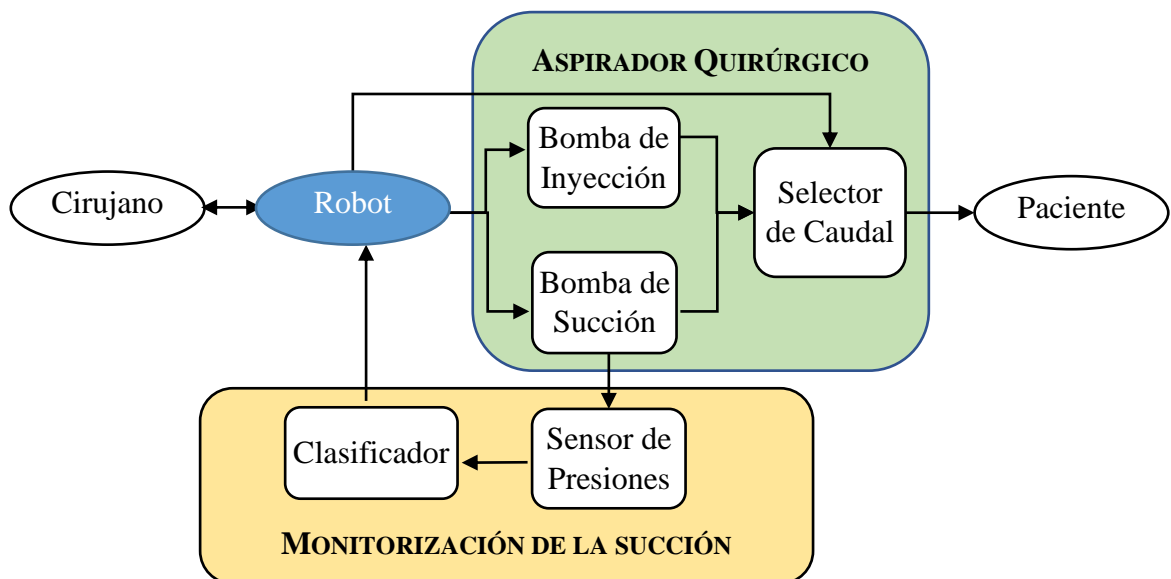


Figura 8. Arquitectura del sistema de aspiración e irrigación asistida por el robot

3.4 Conclusiones

Antes de una intervención quirúrgica, es necesario conocer de forma detallada los pasos definidos por el protocolo quirúrgico. Si se analiza la cirugía de extracción de un tumor hipofisiario por vía endonasal, es necesario utilizar al menos un endoscopio para poder visualizar la operación, un aspirador y un irrigador. Por ello, este trabajo de fin de grado propone un diseño para la realización de estas dos acciones de forma automática o manual, es decir, pudiendo el cirujano manipular la herramienta por si sola o con ayuda de un robot, además de poseer un sensor que indicará en todo momento si se está succionado fluido.

Desarrollo del prototipo

4.1 Introducción

En este capítulo se describe cómo se han integrado los componentes necesarios para desarrollar la arquitectura funcional propuesta en el capítulo anterior. En primer lugar, se expone el conexionado de los distintos elementos desde el punto de vista del flujo de caudales de aspiración y del fármaco, así como respecto al conexionado eléctrico. En segundo lugar, se propone de forma esquemática la metodología de funcionamiento del sistema de aspiración e irrigación del fármaco mediante la presentación de un diagrama de bloques. Por último, el capítulo muestra el desarrollo mecánico de cada una de las piezas que conforman la herramienta principal y los elementos de agarre diseñados para su manejo manual o a través de un robot quirúrgico.

4.2 Conexionado hidráulico y eléctrico

Para que el fármaco y el fluido aspirado no interfieran entre sí es necesario organizar y separar los dos flujos. La Figura 9 muestra cómo se integran los distintos elementos para que los fluidos circulen por sus conductos correspondientes. En el modo de funcionamiento de succión, el fluido llega desde el paciente y atraviesa la caña alargada. A continuación, atraviesa la electroválvula, cuya función es permitir el paso de un fluido u otro, es decir, abre un canal y cierra el otro para que ambos canales no estén abiertos simultáneamente. Después recorre el canal donde se encuentra integrado el sensor de presiones hasta llegar a la bomba de succión,

la cual termina enviando el fluido aspirado en un depósito. En el modo de funcionamiento de administración de fármaco, el medicamento es bombeado desde su depósito gracias a la Bomba de Inyección, la cual impulsa el fluido a lo largo del canal. En el tramo final del recorrido, el fluido pasa por la electroválvula directo para ser administrado al paciente a través de la caña alargada.

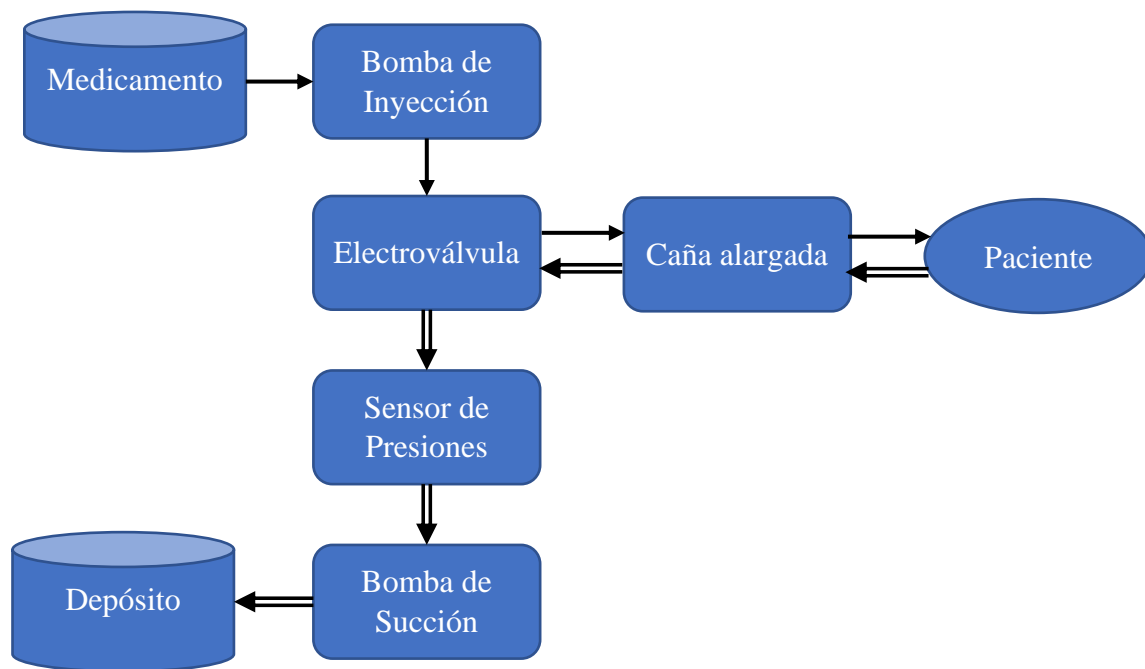


Figura 9. Circuito de los fluidos para succión y administración de fármaco

Como se ha visto, el circuito del fluido puede tomar dos caminos independientes: uno recorrido por los materiales que han sido aspirados, o bien otro utilizado en la administración de medicamentos, evitando así la mezcla de los distintos materiales. Hay que destacar que, gracias a la electroválvula, estos dos caminos no están abiertos simultáneamente sino de forma excluyente. Será el modo de funcionamiento el que indique qué camino sigue el fluido. El hecho de que esté activada una parte y no otra influirá en los procedimientos de cambio de circuito para minimizar la posible mezcla de fluidos en el canal común (Caña alargada y Electroválvula).

Desde el punto de vista del conexionado eléctrico, la Figura 10 muestra cómo se integran y conectan todos los elementos de actuación y sensores al componente principal del sistema: el Controlador. En el modo de manejo manual, el elemento de agarre establece el estado del Interruptor de Agarre de manera que se seleccionen las señales provenientes de los elementos

que componen la Interfaz Hombre-Máquina: el Pulsador de Succión que actúa como botón de hombre-muerto (debe estar presionado para activar la administración de fármaco); el regulador fármaco para activar su administración de forma controlada; y el Indicador de Aspiración, que en caso de iluminarse indica si se está aspirando algún fluido. Cuando se acopla a la herramienta el elemento de agarre del robot, el Interruptor de Agarre cambia su estado para seleccionar las señales provenientes de la Interfaz del Robot. Esta Interfaz transmite señales similares a las de la Interfaz Hombre-Máquina, pero se generan desde el controlador externo del robot. En cuanto a los elementos que gestionan el flujo de los conductos de aspiración y administración de fármaco, el controlador puede actuar en lazo abierto las Bombas de Inyección y de Succión, así como la Electroválvula. También recibe una señal continua con el valor medido por el sensor de Presiones ubicado en el conducto de aspiración.

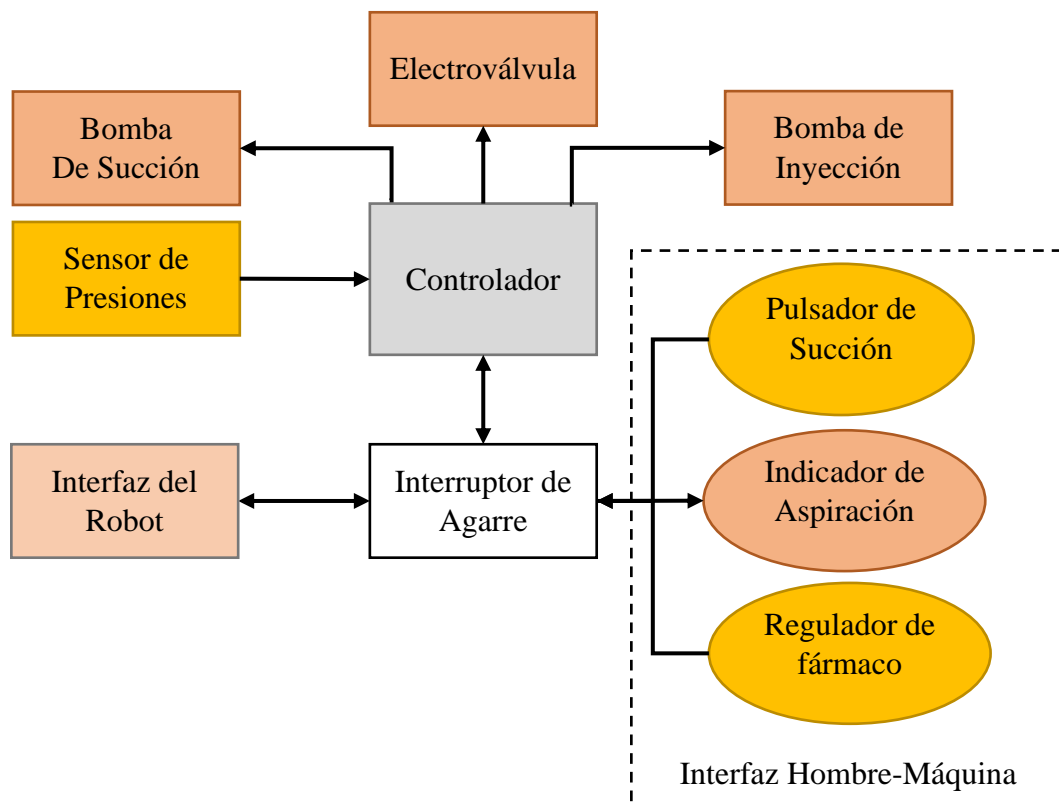


Figura 10. Esquema para el conexionado del circuito eléctrico

En el caso de detectarse el modo manual el proceso a seguir depende del pulsador de succión y el regulador de fármaco. Al presionar el pulsador de succión, éste envía una señal eléctrica al controlador para que active o desactive la bomba de succión y/o de inyección. Además, habilita el canal de la electroválvula adecuado para este proceso. Del mismo modo ocurre con el

Regulador de Fármaco, el cual controla la bomba de inyección activándola mientras establezca una señal no nula de manera indefinida, siempre y cuando el pulsador de succión también esté activado. El regulador de fármaco también habilita el canal de la electroválvula adecuado para la administración de fármaco. A su vez, el Sensor de Presiones manda una señal al controlador con la magnitud de la presión medida en el conducto. El controlador procesa la señal analógica procedente del sensor recogiendo valores entre 0 y 1023. A continuación, realiza una conversión de estos valores a kilopascales. Si se encuentra en el rango de valores donde hay succión de fluido el controlador envía una señal para encender el elemento de iluminación, de lo contrario permanece apagado.

4.3 Metodología de funcionamiento del sistema

La Figura 11 muestra cómo interaccionan los distintos elementos del sistema que se han definido anteriormente mediante un diagrama de bloques. El diagrama es válido tanto para el modo de manejo manual como automático. Inicialmente, el controlador del sistema realiza un proceso de Inicialización de Componentes, tras lo cual se encuentran en modo reposo. En este punto, el controlador espera a que el usuario active el pulsador de succión. En este momento, si la señal del regulador de fármaco es nula se verifica primero que la bomba de inyección esté parada. A continuación, se establece como activo el conducto de succión mediante una señal enviada a la electroválvula. En este momento, la herramienta está preparada para arrancar la bomba de succión y comenzar el proceso de aspiración. Dicho proceso puede terminar bajo dos circunstancias: que se deje de presionar el pulsador de succión; o bien, que se manipule el regulador de fármaco. En el primer caso, el controlador vuelve a establecer a todos los componentes del sistema en modo reposo. En el segundo caso, se procede a parar la bomba de succión y modificar el estado de la electroválvula para establecer el conducto del fármaco. En este momento, la herramienta está preparada para arrancar la bomba de inyección y comenzar el proceso de administración de fármaco. Dicho proceso terminará en el instante en el que el regulador de fármaco vuelva a establecer un valor nulo, o bien al dejar de presionar el pulsador de succión.

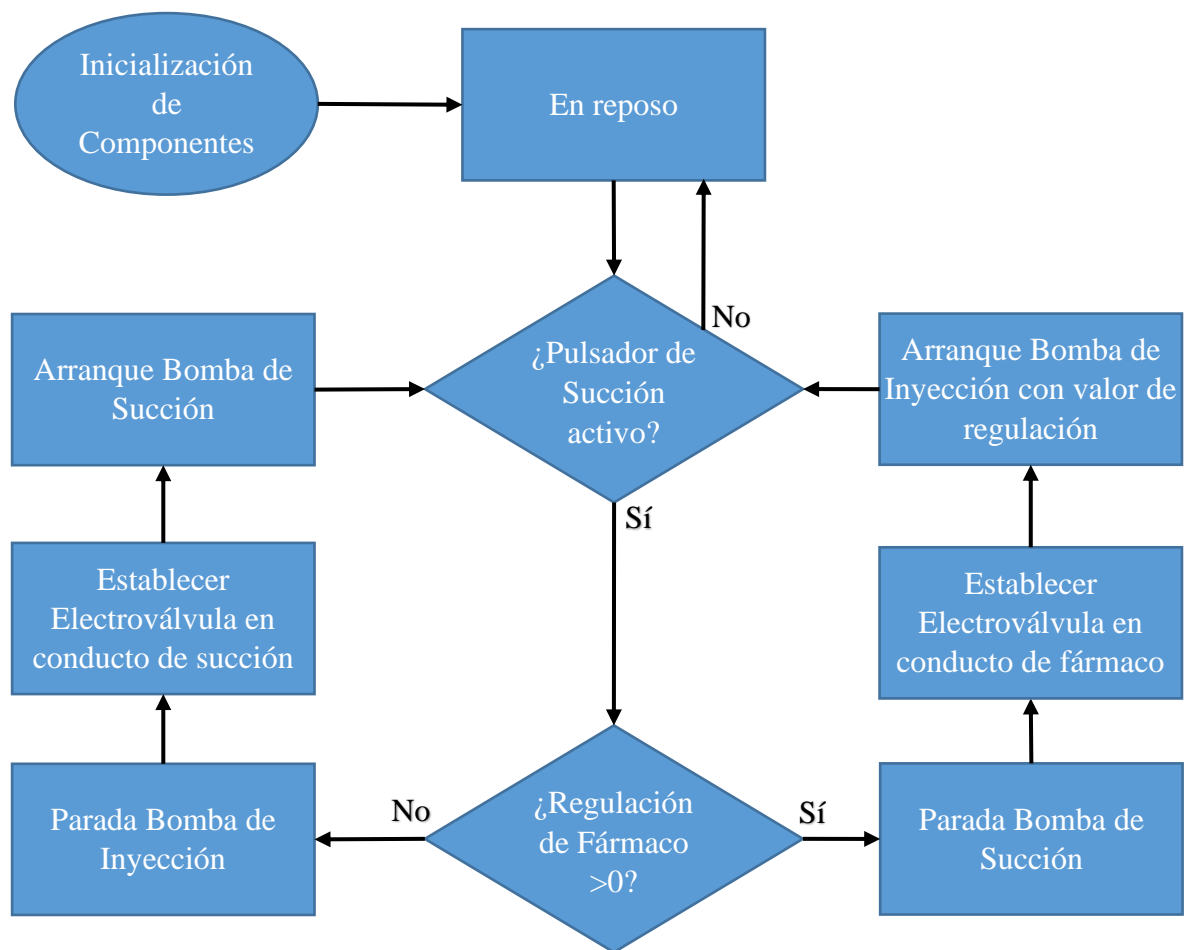


Figura 11. Diagrama de bloques que describe el funcionamiento del dispositivo de aspiración

El proceso de inicialización de componentes también arranca el sensor de presiones. El sensor de presiones siempre enviará una señal con el valor de la presión medida en el conducto de succión, independientemente del estado en que se encuentre el diagrama. En cuanto al indicador de aspiración, aunque el controlador envíe una señal que determine el estado de la misma en función de la medición del sensor de presiones (encendida/apagada), únicamente se activará en el modo de manejo manual de la herramienta. En el modo de manejo automático, será el controlador externo del robot quirúrgico el que se encargue de determinar cómo usar la señal asociada al indicador de aspiración.

Cabe destacar que el diseño del diagrama de estados propuesto en la Figura 11 evita que se administre fármaco en el paciente de forma involuntaria, ya que el pulsador de succión actúa como mecanismo de seguridad. De esta manera, se aumenta la seguridad en el sentido de que el usuario realmente tenga la intención de activar la administración de fármaco.

4.4 Diseño mecánico de la herramienta de aspiración

Para que el cirujano pueda realizar la tarea con mayor efectividad y facilidad, es necesario el diseño de la carcasa para dicha herramienta. Debido a que la arquitectura funcional propuesta en el apartado 3.3 permite que la herramienta pueda ser manejada tanto por un cirujano como por un robot, se propone una estructura principal o cabezal en el que se aloja la caña alargada que se introduce en el seno nasal del paciente. A este cabezal se le puede ensamblar uno de los dos elementos de agarre intercambiables disponibles, los cuales se diseñan con el objetivo de facilitar la ergonomía en la usabilidad de la herramienta según el tipo de usuario que la maneje (cirujano humano o robot manipulador).

La Figura 12 muestra el cabezal de la herramienta que, como ya se ha comentado, es común para los dos modos de manejo. En su interior se encuentra la electroválvula, la cual debe instalarse lo más cerca de la boquilla de la caña alargada para minimizar la contaminación de los fluidos que atraviesan los conductos de aspiración y de fármaco. Por ello, las dimensiones del cabezal estarán limitadas por la morfología de este componente. Para facilitar la instalación de la electroválvula, se ha diseñado el cabezal con una abertura lateral que se sella con una tapa para así mantener la electroválvula fija dentro de la carcasa. A su vez, esta tapa dispone de dos orificios: uno superior por el que pasan los conductos de succión y fármaco; y otro inferior por el que pasa el cableado para suministrar corriente eléctrica a la electroválvula. Por último, en la zona inferior existe un saliente o mecanismo de fijación macho, con una morfología específicamente diseñada para ensamblar cualquiera de los dos elementos de agarre disponibles para el modo de manejo manual o automático. El mecanismo de fijación integra un sensor de contacto para detectar si se encuentra acoplado el elemento de agarre para el modo de manejo manual, en caso contrario detecta el modo automático.

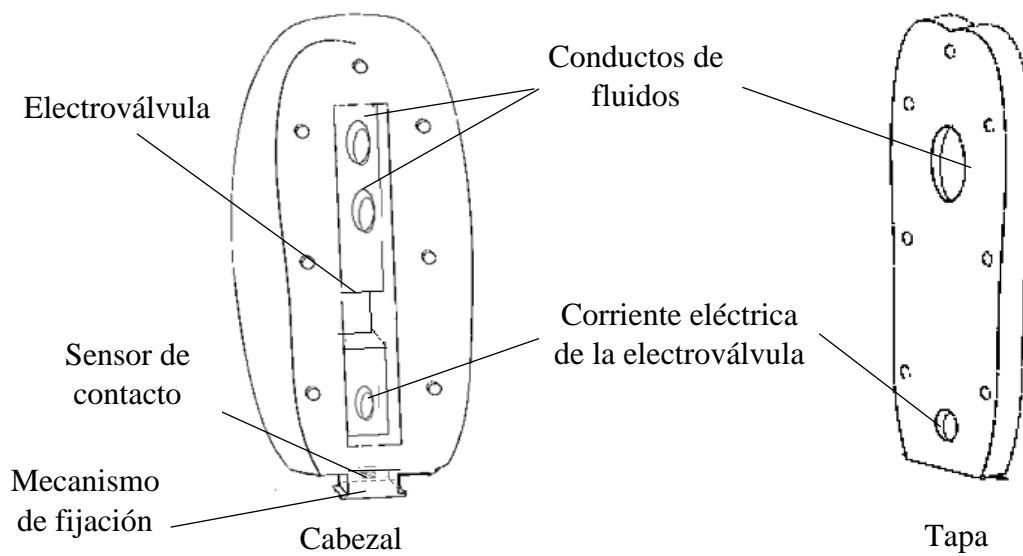


Figura 12. Diseño mecánico del cabezal de la herramienta

El extremo de la electroválvula opuesto al que se instala junto con la tapa posee una boquilla de salida que se conecta a la caña alargada, la cual es la parte de la herramienta que realmente se introduce a través de las vías respiratorias. Tal y como se muestra en la Figura 13, la caña alargada es una pieza independiente del cabezal con un conector diseñado para que encaje en la boquilla de salida de la electroválvula. De esta manera, la caña alargada puede ser intercambiada por otra de distintas dimensiones según lo requiera la intervención quirúrgica.

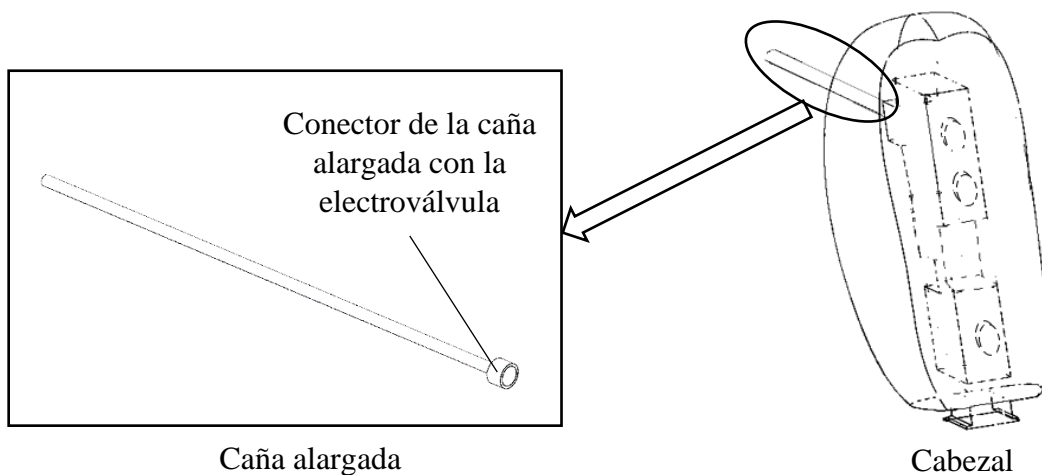


Figura 13. Integración del cabezal con la caña alargada

Como ya se ha comentado, la electroválvula se integra en el cabezal para que esté lo más cerca posible de la caña alargada, para así acumular la menor cantidad de residuo posible en la zona

de conductos común. Esto puede ocurrir cuando se detiene el proceso de aspirado de un fluido. En ese momento, la electroválvula cierra el canal de succión, pero la parte de fluido que no ha sobrepasado la electroválvula puede verse impulsada de nuevo hacia el paciente si se pasa al modo de administración de fármaco. Integrando la electroválvula cerca de la caña se disminuye la cantidad de sangre que puede retroceder hacia el paciente.

Desde el punto de vista de los modos de manejo, como se ha mencionado anteriormente, se han diseñado dos elementos de agarre para cada uno de ellos. La Figura 14 representa el elemento de agarre para el modo de manejo manual, cuya morfología se ha diseñado para facilitar la sujeción con la mano. Como puede observarse, el elemento de agarre manual posee dos orificios para el pulsador de succión y el regulador de fármaco en una zona accesible para los dedos del cirujano. Debajo de ellos se encuentra el indicador de aspiración. Este mango posee un mecanismo de fijación hembra inverso al macho del cabezal. En el mecanismo de fijación aparece un resorte para activar el sensor de contacto instalado en el cabezal de la herramienta y que permite detectar el modo de manejo manual, de lo contrario se selecciona por defecto el modo de manejo automático. Además, en la parte inferior de la pieza hay un orificio que permite pasar el cableado eléctrico que alimenta la corriente de los elementos integrados en el elemento de agarre manual.

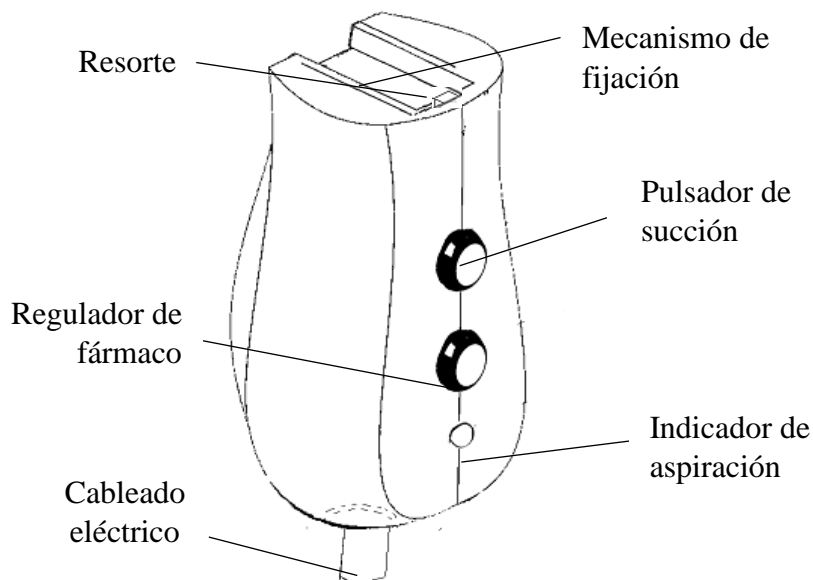


Figura 14. Elemento de agarre para el modo de manejo manual

La Figura 15 representa el elemento de agarre automático utilizado para ensamblar el cabezal a un robot quirúrgico, y que así pueda usar la herramienta de aspiración de forma automática.

Dicha pieza posee en la parte superior el mismo mecanismo de fijación que la del elemento de agarre manual. El elemento de agarre automático se ensambla con el robot mediante cuatro tornillos pasantes. El conexionado eléctrico transmite al controlador las señales procedentes del sensor de presión, del pulsador y del regulador. Estas señales también se transmiten del controlador al robot quirúrgico mediante dicho conexionado.

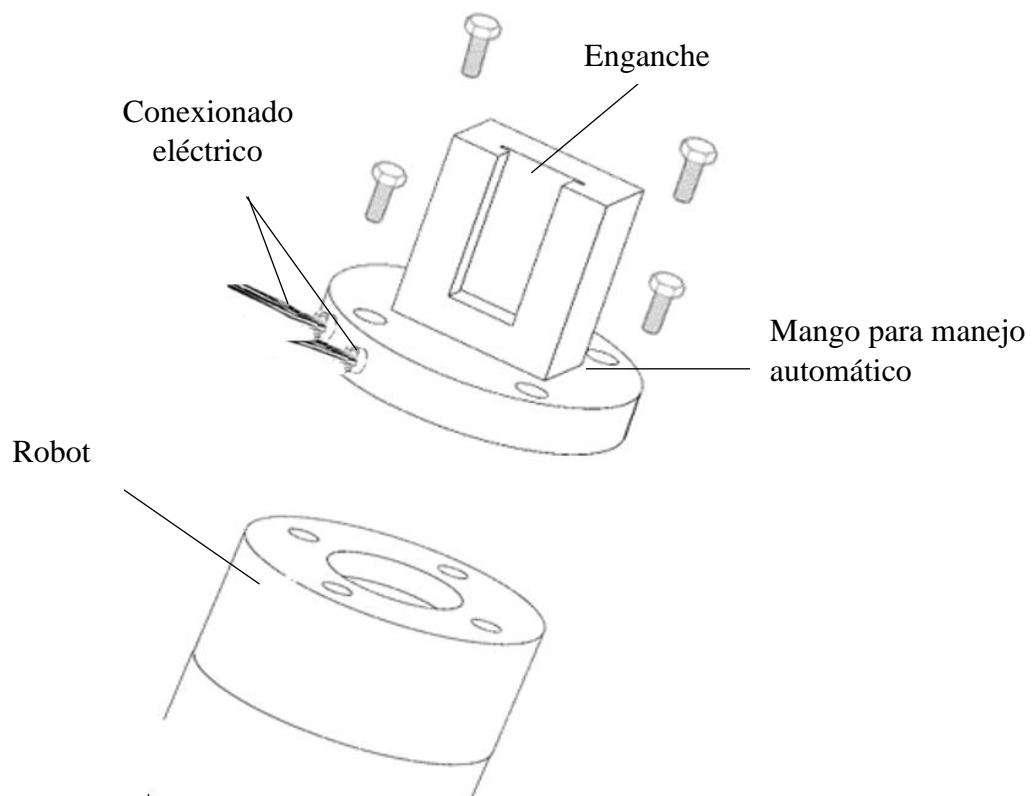
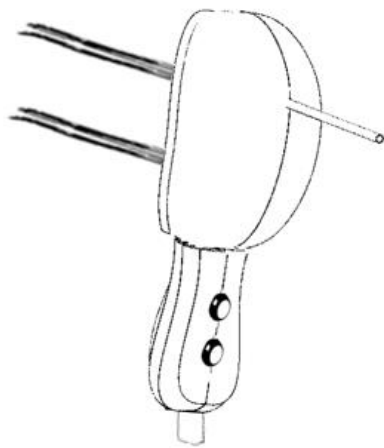
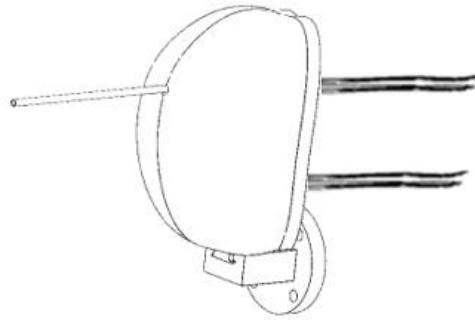


Figura 15. Enganche para el modo de manejo manual

La Figura 16 muestra la herramienta de aspiración con los elementos de agarre manual y automático ensamblados. Como se ha comentado, la electroválvula aumenta considerablemente las dimensiones del cabezal. Por este motivo, el resto de componentes se encuentran instalados en una caja externa. A continuación, a modo de recordatorio se enumeran estos componentes: el sensor de vacío, la bomba de inyección peristáltica, la bomba de succión, el controlador y fuentes de alimentación eléctricas.



Elemento de agarre Manual



Elemento de agarre Automático

Figura 16. Herramientas de aspiración con los elementos de agarre ensamblados

4.5 Conclusiones

En este capítulo se ha descrito inicialmente el sistema de canalización de los fluidos, bajo el que el fármaco y el material aspirado deben ir por dos circuitos distintos, pero se unen en la caña alargada que es la que se introducirá por las fosas nasales del paciente. A continuación, se ha presentado un esquema eléctrico en el que aparecen todos los elementos necesarios para el funcionamiento de la herramienta. Estos elementos están gobernados por un controlador bajo el cual se ha programado el proceso de funcionamiento, que se ha presentado en este documento como un diagrama de bloques. En dicho proceso se han tenido en cuenta los cambios entre el modo de reposo, de aspiración y de administración de fármaco, de cara a evitar problemas en el correcto funcionamiento de la herramienta. Por último, se ha presentado el diseño mecánico de cada una de las piezas funcionales de la herramienta, que se ha dividido en: cabezal, caña alargada intercambiable, y los elementos de agarre manual y automático.

Implantación del sistema y experimentos

5.1 Introducción

En este capítulo se describe cómo se ha realizado la implantación e integración del dispositivo de aspiración quirúrgica teniendo en cuenta los dos modos de manejo (manual y automático). Se ha incluido una descripción detallada de qué elementos de actuación y sensorizado que se han empleado, así como el software para la programación del comportamiento coordinado de todos ellos. Para validar el funcionamiento de la herramienta, se propone una batería de experimentos in-vitro en los que demostrar que el comportamiento de la herramienta es el esperado. Finalmente, el capítulo cierra con una discusión sobre los resultados obtenidos.

5.2 Componentes hardware y software

Cada uno de los componentes elegidos para realizar las funciones propuestas en la herramienta de aspiración se presentan en este apartado como paso previo a la descripción de la implantación del sistema de experimentación.

- **Controlador**

Las acciones de control las realiza una placa Arduino Uno Rev3, la cual dispone de un número suficiente de pines de entrada y salida tanto digitales como analógicos (véase Figura 17). Este proyecto utiliza estos pines para la conexión del pulsador de succión (entrada digital), la señal con la magnitud leída por el sensor de presiones (entrada analógica), el indicador de succión y la señal de la magnitud seleccionada en el regulador de caudal para la administración de fármaco. En cuanto al comportamiento de la herramienta según las acciones realizadas a través de la interfaz integrada en los elementos de agarre, la placa ha sido programada a través de su software Arduino IDE.

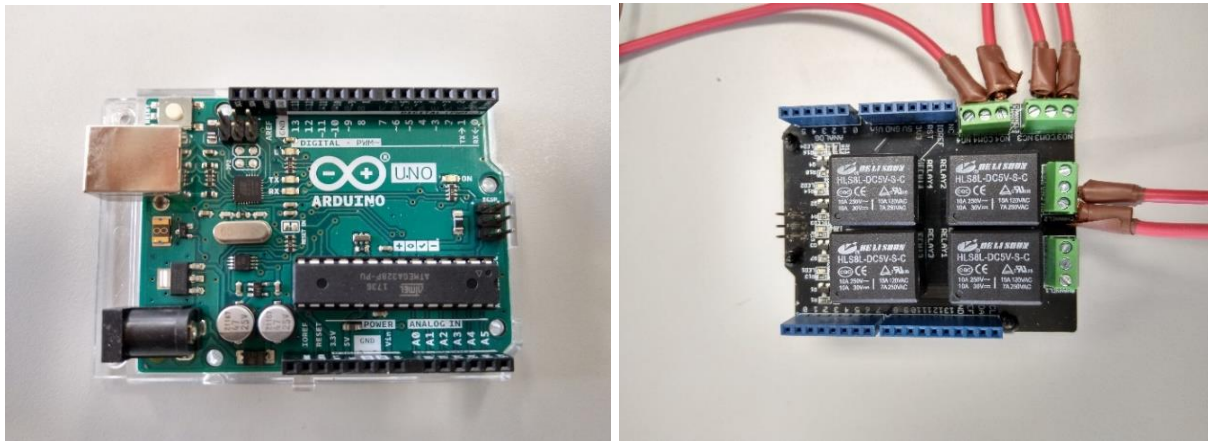


Figura 17. Placa programable Arduino Uno Rev3 (izquierda) y Relay Shield v3.0 (derecha)

La mayor limitación encontrada para la implantación de la herramienta de aspiración reside en que la placa Arduino no es capaz por sí sola de manejar conexiones eléctricas de alto voltaje o intensidad. Sin embargo, existen placas denominadas shield que extienden la funcionalidad de Arduino en distintas áreas. En concreto, se ha empleado una placa Relay Shield v3.0 compatible con Arduino Uno, la cual incluye cuatro relés magnéticos para controlar el paso de corriente eléctrica que trabajan con un voltaje de 5 Vdc y permiten un paso de potencia de hasta 8 W, voltaje de 30 Vdc o 70 W (lo más restrictivo). Con esta extensión, Arduino puede abrir o cerrar el paso de corriente a los elementos de potencia como la bomba de succión, de inyección, la electroválvula o el sensor de presiones. Cabe destacar que cada uno de los relés dispone de leds que se iluminan si se encuentra activo, y pueden configurarse como puertas normalmente abiertas o normalmente cerradas. En este proyecto se ha utilizado la opción de normalmente cerrado.

- **Bombas de succión e inyección**

La bomba de inyección consiste en una bomba Verderflex peristáltica de desplazamiento positivo con caudal máximo de 0.24 l/min a 1 bar de presión y accionamiento eléctrico (ver Figura 18). Su misión consiste en bombear el fármaco (en este caso simulado por el fluido de color amarillo), aplicando un caudal que varía según el voltaje que se aplique sobre la misma. Al ser un dispositivo que requiere un voltaje de hasta 12 Vdc, se encuentra conectado a través del relé de la fuente de alimentación.

La bomba de aspiración New Aspiret de CA-MI, con una presión máxima de 0.75 bar y un depósito de 1000 ml (ver Figura 18) se encarga de succionar fluidos corporales, es decir, está indicada para uso en medicina. Además, posee un filtro antibacteriano para proteger el dispositivo y un depósito donde se almacena todo el fluido succionado.

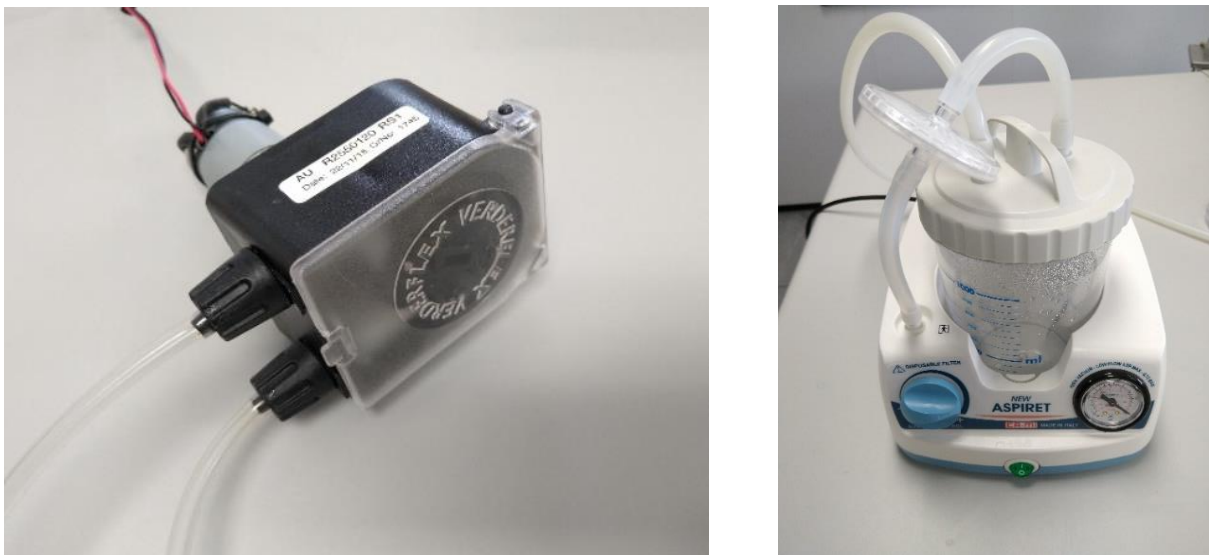


Figura 18. Bomba peristáltica (izquierda) y bomba de aspiración (derecha)

- **Electroválvula**

La electroválvula 3/2 activable por solenoide/resorte (ver Figura 19) permite pasar un caudal de hasta 450 l/min y se utiliza para manipular líquidos, en concreto para aquellos que como los fármacos necesitan estar hechos de un material especial para que no se corroan. Esta electroválvula tiene dos vías las cuales tienen un camino en común el cual se unirá en la electroválvula. Esto permite controlar ambos canales por los que circula el fluido.

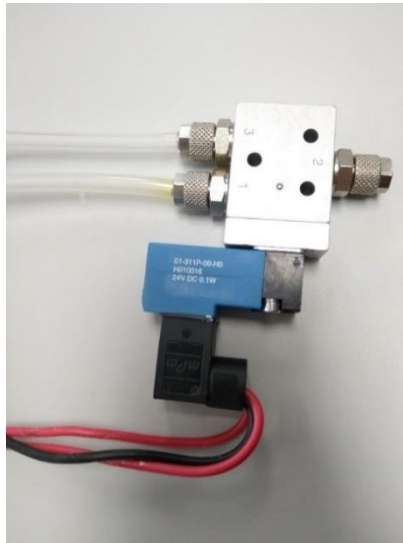


Figura 19. Electroválvula

- **Sensor de presiones**

El sensor de presión de vacío (ver Figura 20) tiene un IP40 y sirve para medir la presión de diversos fluidos entre 0 KPa y -101 KPa. Esta presión es captada por el sensor a través de un led de cuatro dígitos de lectura que se encarga de enviar la señal a la placa de Arduino quien la procesa y muestra el valor medido.

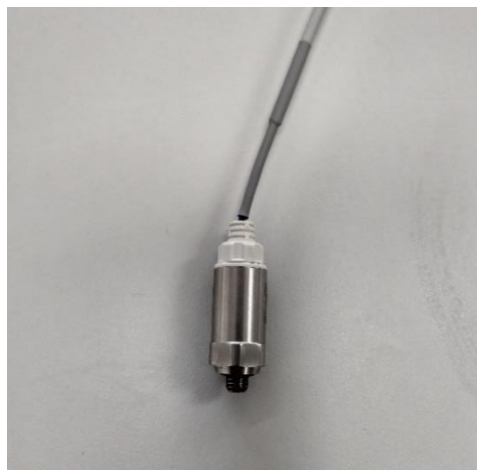


Figura 20. Sensor de presiones

- **Fuentes de alimentación**

Se utiliza una fuente de alimentación de corriente continua para alimentar al sensor de presiones y la bomba peristáltica con un voltaje de 12V, estando este último elemento controlado por un

relé magnético. Esta misma fuente de alimentación suministra corriente eléctrica a 24V a la electroválvula, el cual también está controlado por un relé magnético. En particular, la bomba de aspiración funciona con alimentación de corriente alterna de 230V, por lo que directamente se controla su alimentación mediante uno de los relés magnéticos. Hay que destacar que la tierra de la fuente de alimentación de 12V es común a la tierra de la placa de Arduino, para que así el sensor de presiones tenga la misma referencia de voltaje que el controlador y no haya errores en las mediciones.

- **Robot e interfaz de teleoperación**

Las pruebas para el modo de manejo automático de la herramienta de aspiración se realizan con un sistema robótico teleoperado. El brazo manipulador empleado es el UR3 de Universal Robots (ver Figura 21), con 6 grados de libertad y un alcance máximo de 500 mm y carga nominal de 3 Kg. Algunas de las ventajas de este manipulador son que el último grado de libertad gira de forma infinita y que su reducido tamaño lo hace idóneo para tareas con espacios de trabajo reducidos como ocurre en cirugía endonasal.

Este manipulador es teleoperado a través de un dispositivo háptico Phantom Omni de 3D System, con 6 grados de libertad, 3 de los cuales permiten realimentación de fuerzas. Además, dispone de 2 pulsadores cuya funcionalidad puede personalizarse. En este proyecto se utilizan para emular las funciones del pulsador de succión y regulador de fármaco.



Figura 21. Brazo manipulador UR3 de Universal Robots (izquierda) y dispositivo háptico Phantom Omni de 3D Systems (derecha)

- **Integración software**

Como se ha comentado anteriormente, el controlador de la herramienta basado en Arduino se programa en su propia plataforma de desarrollo. Sin embargo, para poder realizar las comunicaciones con el robot existen herramientas que facilitan esta tarea. En este trabajo se ha empleado el sistema ROS, un framework cuya finalidad reside en comunicar diversos componentes de un sistema robótico. Así, la plataforma Arduino instala un paquete de software que permite el envío de datos hasta el controlador del robot teleoperado y viceversa. Toda la información necesaria puede ser grabada en tiempo real en un fichero gracias a una extensión de ROS denominada Rosbag. Finalmente, el análisis de los datos grabados se realiza bajo el software Matlab.

5.3 Integración del sistema

La plataforma de laboratorio propuesta para realizar los experimentos de validación de la herramienta de aspiración puede verse en la Figura 17. La figura de la izquierda representa la plataforma de experimentación en modo manual. La figura de la derecha representa la plataforma de experimentación en modo automático. Ambas plataformas poseen una bomba de inyección para la administración de fármaco y una bomba de succión, indispensables para bombear fluido. Además, el sensor de vacío se encarga de detectar la presión durante la succión. Los distintos elementos que constituyen estas plataformas necesitan ser controlados y alimentados con cierta tensión, por lo que están conectados al controlador y a la fuente de alimentación. En la zona de trabajo hay dos vasos con fluido, uno de ellos de color amarillo que simula el fármaco y otro de color azul que simula el fluido aspirado. Estas dos plataformas se diferencian en los elementos que constituyen el modo de manejo. En el modo manual, el cabezal de la herramienta, la parte común para los dos modos de manejo, se encuentra conectada al mango manual. Sin embargo, el cabezal de la herramienta en modo automático va conectado al robot y es controlado con el dispositivo háptico.



Figura 22. Plataforma de experimentación in-vitro para validar el funcionamiento de la herramienta de aspiración junto con los elementos de agarre

Para la implantación del conexionado de los conductos de aspiración y administración de fármaco se ha seguido el esquema propuesto en el apartado 4.2 (véase Figura 9). Así, la Figura 23 muestra en la salida del cabezal de la herramienta dos conductos. Uno de ellos lleva directamente a la bomba peristáltica, que impulsa el fluido amarillo almacenado en el depósito del medicamento. El segundo conducto está conectado al sensor de presiones, y éste a su vez va hasta la bomba de aspiración donde se acumula el fluido azul succionado en su depósito correspondiente.

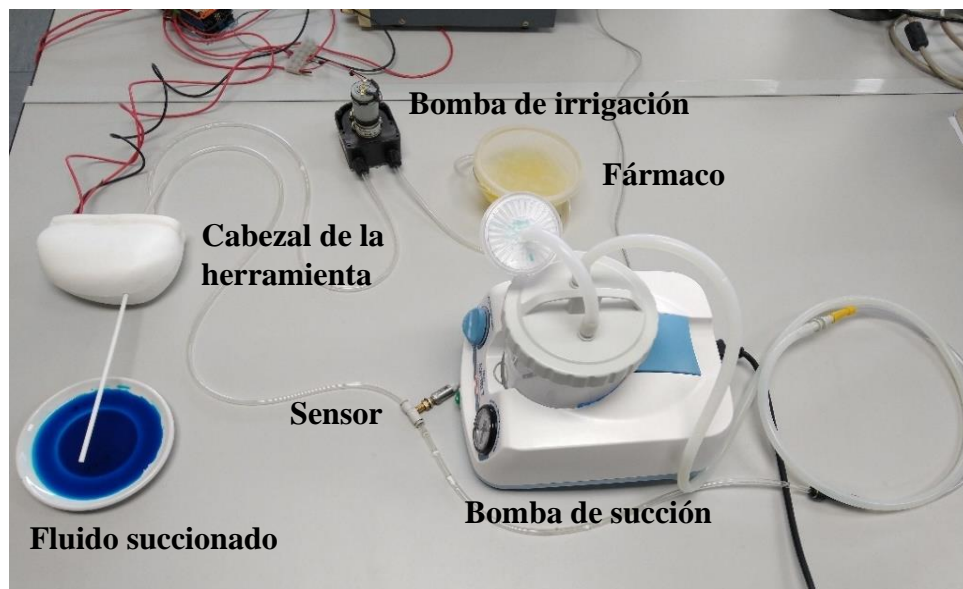


Figura 23. Conexionado de los conductos de aspiración e irrigación

Análogamente, para el conexionado eléctrico se parte del esquema eléctrico presentado en el apartado 4.3 (véase Figura 10). De este modo, la Figura 24 muestra cómo el controlador de Arduino tiene ensamblada la placa de relés para actuar sobre la corriente eléctrica que llega a cada uno de los elementos de la herramienta: electroválvula, bomba peristáltica, bomba de aspiración y sensor de fuerzas. A su vez, al controlador también se conectan los elementos asociados con la interfaz hombre-máquina, los cuales no requieren de actuación mediante el uso de relés magnéticos. Cabe destacar a partir de las fotos mostradas para el conexionado, cómo la parte eléctrica y la canalización y depósitos de los fluidos se encuentran separadas entre sí por motivos de seguridad.

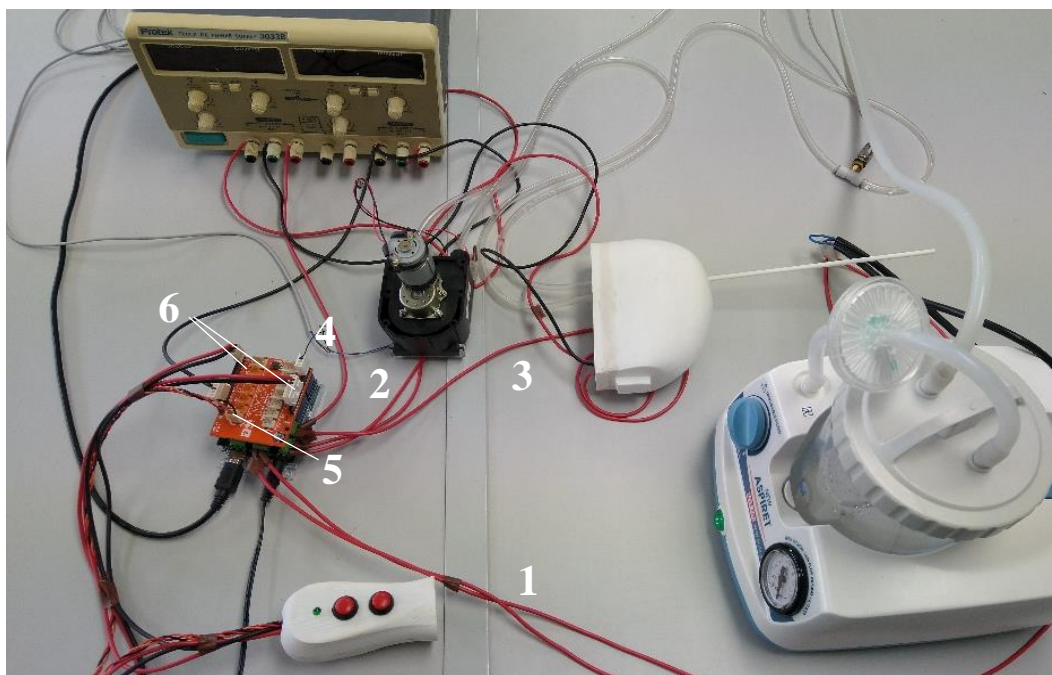


Figura 24. Conexión eléctrica de los elementos de la herramienta: 1. Conexión de la bomba de succión. 2. Conexión de la bomba de irrigación 3. Conexión de la electroválvula. 4. Señal analógica procedente del sensor. 5. Conexión del elemento de iluminación. 6. Conexión de los botones de succión e irrigación.

5.4 Experimentos

En este apartado se explica en qué consisten los experimentos que validan el comportamiento de la herramienta de aspiración, así como los resultados obtenidos. En concreto, en un primer experimento se pretende comprobar el correcto funcionamiento de los elementos del sistema de aspiración. En un segundo experimento se propone simular un proceso de aspiración manual de

un sangrado in-vitro para posteriormente realizar una administración de fármaco. Por último, el tercer experimento es similar al segundo, pero utilizando un brazo manipulador en lugar del modo de manejo manual.

5.3.1 Experimento 1

El primer experimento consiste en verificar el funcionamiento de cada una de las acciones de la herramienta: aspiración e inyección. El manejo de la herramienta se establece en modo manual, para así testear el pulsador de succión, el regulador de fármaco y el indicador de aspiración. Como ya se comentó en el apartado anterior, los conductos son transparentes y se puede visualizar el color y la cantidad de fluido que los atraviesa en cada momento. Así, se puede comprobar si hay algún retroceso de fluido, ya que al mezclarse cambian de color. En concreto, el fluido de color azul simula el fluido succionado (sangrado), mientras que el de color amarillo simula el inyectado (fármaco).

La primera parte del experimento (modo de aspiración) pretende definir los distintos estados de presión de succión que pueden aparecer: inicio de la herramienta en reposo sin fluido y succión apagada; herramienta sin fluido y con la bomba de succión en funcionamiento; y bomba de succión en funcionamiento y herramienta con fluido. El banco de pruebas se realiza empleando el vaso con el fluido azul, tal y como aparece en la Figura 25.

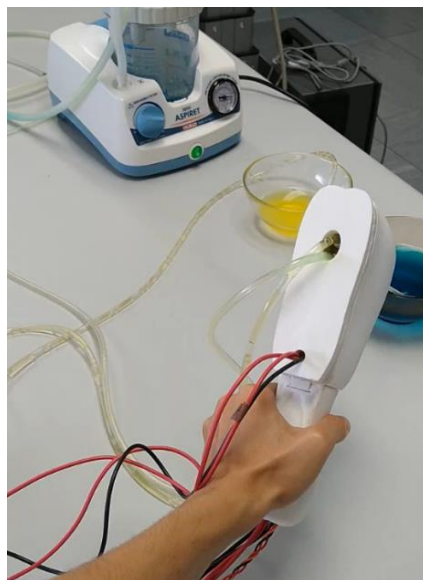


Figura 25. Prueba de aspiración

La segunda parte del experimento (modo de inyección) pretende definir el estado de presión con la bomba de succión parada y la bomba de inyección activada, tras aspirar fluido; y la desactivación de la bomba de inyección y activación de la bomba de succión. Como puede verse en la Figura 26, el fluido amarillo se desplaza por su conducto y la herramienta lo expulsa a través de la caña alargada en el vaso de salida. Segundos después del comienzo de la activación del regulador, el fluido sale de color azul y seguidamente amarillo. Esto se debe a la retención de fluido azul en la caña cuando es desactivada la aspiración e iniciada la administración de fármaco. Una situación parecida ocurre cuando se corta la inyección de fármaco. La parte de fármaco que no ha sido expulsada queda retenida en la caña alargada y es succionada siempre y cuando el pulsador este activado.



Figura 26. Prueba de administración de fármaco

La presión de succión que genera este flujo se mide con el sensor de presiones. Los resultados recogidos en esta prueba para esta medida se muestran en la Figura 27. En esta gráfica se distinguen 5 zonas, cada una con los casos de succión expuestos anteriormente. En la primera zona la herramienta se encuentra en estado de reposo con la aspiración desactivada, por eso los valores se mantienen estables en -20 KPa. En la segunda zona comienza la aspiración sin succión de fluido. El cambio de no aspiración a aspiración se realiza al presionar el pulsador de succión. La presión disminuye cuando el sensor detecta un cambio de presión provocado por la bomba de succión. En este tramo los valores se mantienen estables, con mínimas variaciones en los distintos experimentos. En la tercera zona los valores disminuyen drásticamente cuando

comienza la aspiración de fluido. Dichos valores oscilan dependiendo de la cantidad de fluido succionado por la herramienta. Cuando deja de haber aspiración de fluido los valores van aumentando. En la cuarta zona se activa la inyección de fármaco con la aspiración desactivada. El cambio de aspiración a irrigación se realiza al presionar el pulsador de irrigación. Si se analiza por separado la presión de cada experimento los valores se mantienen estables al desactivarse la succión. Estos valores varían en cada experimento debido a la cantidad de fluido retenido en el conducto cuando se corta la succión. Por ello, el promedio de presiones en esta zona no se mantiene estable, no hay un valor determinado en este tramo. Por último, en la quinta zona la bomba de inyección se desactiva y la bomba de activación vuelve a activarse sin succión de fluido. El cambio de inyección a aspiración se realiza al presionar de nuevo el regulador. En este tramo la presión disminuye ligeramente al succionarse el fármaco retenido en la caña. A partir de estos resultados, se puede establecer un nivel de presiones en el cual la aspiración de líquido es relevante. Dicho nivel se aplica posteriormente para activar o desactivar el indicador de succión.

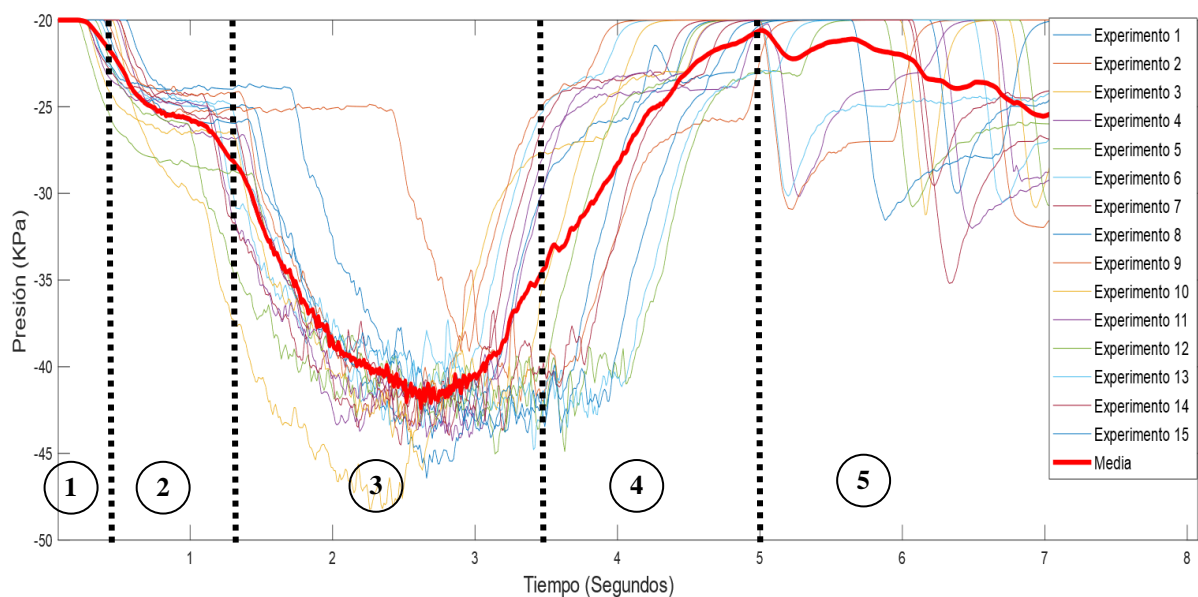


Figura 27. Medidas de presión durante la prueba de succión.

5.3.2 Experimento 2

Una vez comprobado el funcionamiento básico de la herramienta, en este segundo experimento se propone simular un procedimiento de aspiración de sangrado y posterior aplicación de fármaco para ayudar en la cicatrización del tejido. Para realizar la simulación in-vitro, se ha

utilizado una superficie en la que se ha depositado una lámina de fluido azul (sangrado), tal y como puede verse en la Figura 22. El proceso comienza arrancando el modo de aspiración. A continuación, se succiona todo el fluido azul hasta quedar limpia la superficie. Tras ello, se detiene la aspiración y comienza la inyección de fármaco. En este caso, todo el proceso se realiza mediante el modo de manejo manual de la herramienta.

Los resultados obtenidos en este experimento se muestran en la gráfica de la Figura 28. Los estados de este experimento son: herramienta en estado de reposo con la bomba de succión desactivada; bomba de succión activada con aspiración de fluido; bomba de succión desactivada y bomba de irrigación activada; y desactivación de la bomba de succión y la bomba de inyección. En esta gráfica se distinguen 5 zonas. En la primera zona la herramienta se encuentra en estado de reposo con la aspiración apagada. Al igual que el experimento anterior la presión se mantiene constante a -20 KPa. En la segunda zona se activa la aspiración. Si se comparan estas presiones con las del experimento anterior se aprecia como en los dos casos disminuyen, pero en este caso en menor medida. Esto se debe a que al succionar sobre una superficie el caudal aspirado es menor, y consecuentemente la presión no disminuye tanto. En la tercera zona se activa la bomba de inyección. Las presiones se mantienen estables, pero varían dependiendo del experimento realizado dependiendo de la cantidad de fluido retenido en el canal de succión. En la cuarta zona cuando se desactiva la administración de fármaco y comienza de nuevo la succión las presiones vuelven a disminuir debido a la succión el fármaco que no ha sido expulsado y ha quedado retenido en la caña. Por último, en la quinta zona, la herramienta se encuentra de nuevo en estado de reposo, por lo que la presión vuelve a ser -20 KPa.

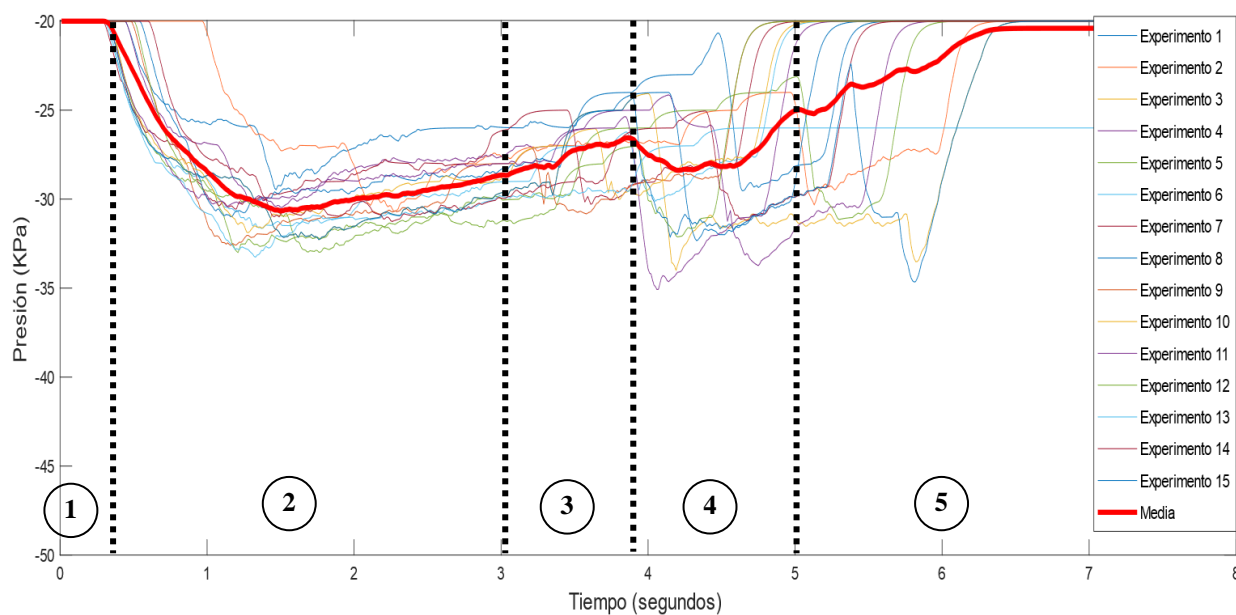


Figura 28. Evolución de presiones en cada fase del proceso de succión y administración de fármaco en el modo de manejo manual de la herramienta

En la succión se aspiran 5 ml de fluido sobre una superficie plana. La tabla 1 muestra el tiempo de succión de estos 5ml en cada experimento realizado. El rango de tiempo que tarda en succionar oscila entre 1,76 y 3,37 segundos, por lo que el valor promedio que emplea la herramienta en succionar estos 5 ml fluido es de 2,53 segundos.

Tabla 1. Resultados obtenidos al succionar 0.5 ml

Experimento	Tiempo de succión (segundos)
1	2,64
2	2,07
3	2,54
4	1.89
5	2,44
6	2,70
7	2,71

8	3,37
9	2,8
10	2,73
11	2,18
12	3,13
13	1,73
14	3,23
15	1,79

En la tabla 2 se han recogido los resultados de caudal irrigado y tiempo de irrigación para realizar una estimación del caudal promedio que el dispositivo tarda en administrar fármaco. El caudal promedio irrigado es de 8,08 ml/s. En este caso, la intensidad de corriente aplicada sobre el motor de la bomba peristáltica define el caudal de fluido transmitido. Esto quiere decir que si la bomba a su máxima potencia, 12 voltios, administra 10,67 ml/s, para administrar un caudal de 0,5 ml la bomba se encuentra a 9,08 voltios.

Tabla 2. Resultados obtenidos durante la validación en la irrigación

Experimento	Caudal irrigado (ml)	Tiempo de irrigación (segundos)	Caudal irrigado por segundo (ml/s)
1	9	0,97	9,28
2	8,1	0,95	8,53
3	11,9	1,8	6,61
4	7,8	0,87	8,97
5	7,9	0,9	8,78
6	7	0,77	9,09

7	6,7	0,72	9,31
8	10,1	1,05	9,62
9	10,2	1,03	9,90
10	10,7	1,05	10,19
11	3,9	0,56	6,96
12	7,1	0,73	9,73
13	5,1	0,6	8,50
14	14,5	2,5	5,80
15	8	0,72	11,11

La figura 29 representa el caudal administrado según el tiempo que tarda la herramienta en inyectar fármaco en cada uno de los experimentos realizados. Dicha gráfica también representa la recta de regresión de estos valores, $y = 4,737x + 3,727$. Por lo que, el aumento del caudal es proporcional al tiempo que esta activa la acción de irrigación.

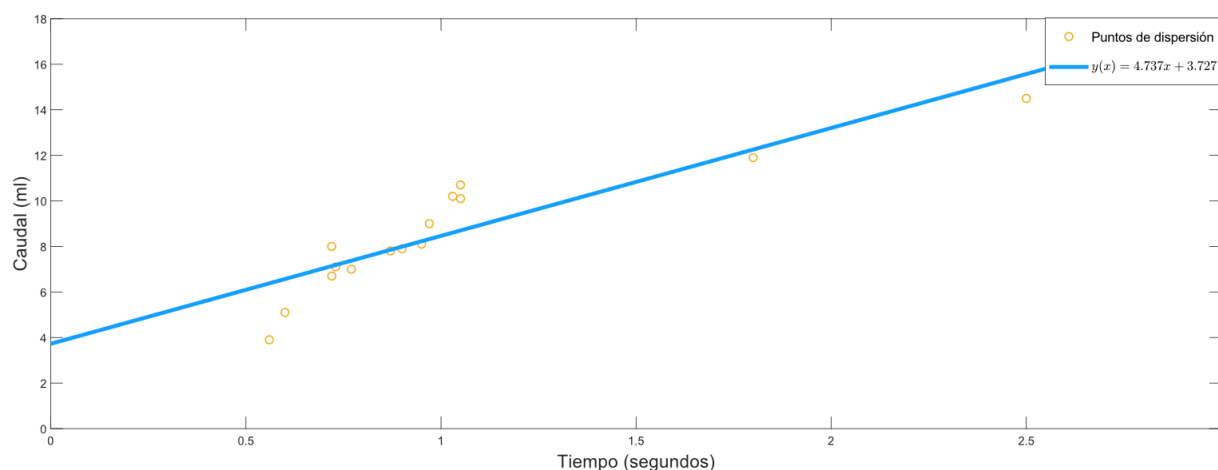


Figura 29. Representación gráfica de variación de caudales a lo largo del tiempo en la irrigación

5.3.3 Experimento 3

El tercer y último experimento es similar al anterior en cuanto al procedimiento quirúrgico a simular. La principal diferencia reside en que la herramienta de aspiración es manejada a través de un robot teleoperado, como puede verse en la Figura 22. El objetivo consiste en probar el funcionamiento de la herramienta de aspiración con el sistema robótico. Idealmente, el robot debería asistir al cirujano realizando la aspiración de sangrado de forma autónoma. Sin embargo, esta planificación y toma de decisiones requiere de la recopilación de datos de entrenamiento previos, por lo que resulta necesario utilizar primero el robot de forma teleoperada,

Los resultados obtenidos en este experimento se muestran en la gráfica de la Figura 30. En la gráfica se distinguen 5 zonas. La primera zona, al igual que en el resto de los experimentos debida al estado de reposo de la herramienta, la presión es de -20 KPa. En la segunda zona la presión disminuye con la activación de la bomba de succión. A continuación, con la activación de la bomba de inyección, en la tercera zona los valores aumentan. En la cuarta zona se desactiva la bomba de inyección y se activa la de succión por lo que el fármaco retenido en la caña alargada se succiona y la presión baja. En la quinta zona la presión aumenta con la succión sin fluido activada.

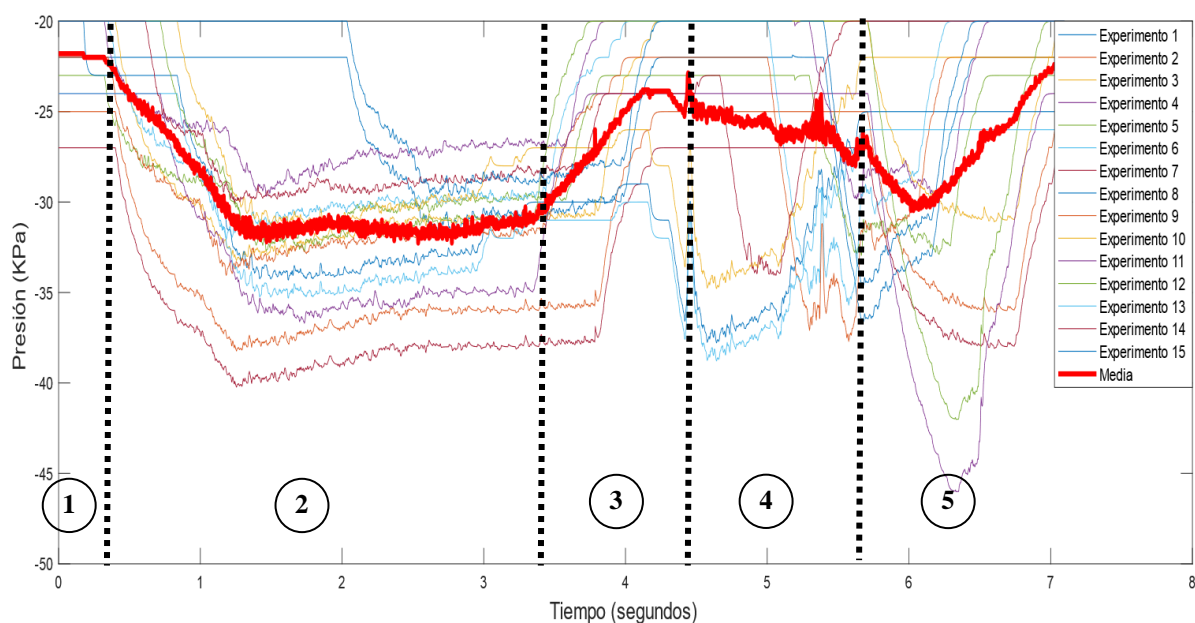


Figura 30. Evolución de presiones en cada fase del proceso de succión y administración de fármaco en el modo de manejo tele-operado de la herramienta

En este experimento el robot se desplaza durante la succión e inyección de fármaco. El movimiento del robot se activa cuando el botón de succión del hepatic es presionado incluso cuando se administra fármaco. En caso contrario, el robot se mantiene quieto. Este mecanismo de seguridad permite al cirujano no realizar movimientos bruscos que pueden dañar al paciente. El desplazamiento del robot a lo largo del tiempo se representa en la Figura 31. El robot tiene un desplazamiento entre 0 y 0,023 metros como máximo, aunque habitualmente el rango de desplazamiento oscila entre los 0 a 0,015 metros. El desplazamiento del robot no es muy grande, pero esta restricción de movimiento proporciona cierta seguridad tanto al cirujano como al paciente.

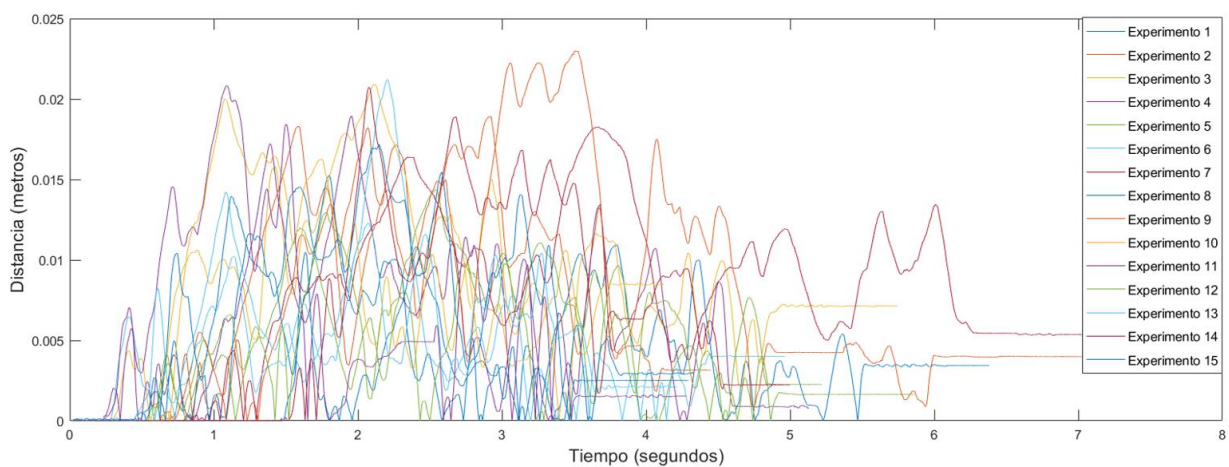


Figura 31. Desplazamiento del robot a lo largo del tiempo

5.4 Discusión de los resultados

En este capítulo se ha descrito como se integran los distintos elementos que forman la herramienta tanto el conexionado hidráulico como eléctrico. A continuación, se han realizado tres experimentos (modo de manejo manual y automático) para comprobar el correcto funcionamiento del sistema. El modo de manejo no influye a la hora de succionar fluido, las presiones varían según la cantidad de fluido succionado. Las presiones nos indican el estado en el que se encuentra la herramienta: estado de reposo con succión apagada; succión sin fluido; succión con fluido; e inyección de fármaco. Por otra parte, a la hora de inyectar fármaco los resultados obtenidos son similares en los dos modos de manejo. Por último, en el modo de manejo automático el desplazamiento del robot está restringido para proporcionar cierta seguridad al paciente.

Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

El principal objetivo del proyecto consiste en el desarrollo y diseño de un prototipo de herramienta híbrida para la aspiración de sangrado y administración de fármaco en intervenciones de cirugía endonasal, Pese a que el dispositivo no tiene la capacidad de realizar las dos funciones al mismo tiempo, sí que se pueden alternar de manera inmediata según las necesidades del cirujano, El disponer de aspiración y administración de fármaco en una misma herramienta supone disminuir el número de instrumentos que manipula el cirujano, simplificando su labor y ahorrando tiempo durante la intervención,

El trabajo necesario para la realización de la herramienta previamente comentada ha comenzado con el análisis del estado del arte de los dispositivos con características similares que actualmente existen en la literatura, A partir de esta información, así como la del protocolo quirúrgico y espacio de trabajo de la cirugía endonasal, se ha establecido una arquitectura funcional como punto de partida del desarrollo del dispositivo, Así, se han definido diversos esquemas de diseño para los circuitos hidráulicos de aspiración y fármaco, el esquema eléctrico de conexionado y el diseño ergonómico de la herramienta junto con los accesorios necesarios para su manipulación, ya sea manual o automática,

Para la validación del diseño propuesto, se ha fabricado un prototipo funcional de la herramienta, el cual se ha probado en el laboratorio mediante una serie de experimentos in-

vitro, Estos experimentos sirven para plasmar no sólo el correcto funcionamiento de los elementos funcionales de la herramienta, sino para demostrar su comportamiento bajo unas condiciones de trabajo que puedan tener cierta similitud con la cirugía real, al menos respecto a los procesos de aspiración y administración de fármaco, No se han considerado aspectos cinemáticos ni de restricción de movimientos en la cavidad nasal puesto que quedarían fuera del ámbito del proyecto, No obstante, las dimensiones de la herramienta se han elegido para que sean totalmente similares a las que se emplean actualmente en cirugía endonasal, En conclusión, los resultados de los experimentos han validado la funcionalidad que se pretendía conseguir con el diseño de la herramienta de aspiración propuesto inicialmente en los objetivos del proyecto,

6.2 Futuras líneas de trabajo

La herramienta de aspiración desarrollada en este TFG supone un primer prototipo que valida a nivel funcional las características que se pretendían obtener, Sin embargo, deben mejorarse ciertos aspectos para poder trasladar estos resultados a clínica humana, A continuación, se presentan una serie de posibles mejoras que se podrían implementar sobre la herramienta de cara a realizar trabajos futuros,

En primer lugar, las dimensiones del cabezal de la herramienta son demasiado grandes para una cómoda maniobrabilidad debido tanto a su tamaño como al peso, La búsqueda de componentes más pequeños, o bien una alternativa para minimizar la longitud del conducto común donde se produce la mezcla de fluidos, puede solucionar este problema, Idealmente, el resto de componentes debería ubicarse en una única caja de control,

Desde el punto de vista eléctrico, el prototipo utiliza cableado para el cabezal y los accesorios de manejo manual y automático, Esto podría simplificarse añadiendo un conector entre estos accesorios y el cabezal, Así, tan sólo saldría un cable desde el cabezal, No se contempla eliminar este cable por un sistema sin cables por dos motivos: 1) deben existir siempre los conductos de fluidos, por lo que nunca se podrán eliminar por completo; y 2) los componentes requieren potencia eléctrica (no únicamente señales), por lo que habría que incluir una batería que aumenta el peso y puede limitar el uso de la herramienta en términos de tiempo (debe durar toda la intervención),

El diseño mecánico de los accesorios de manejo manual y automático también puede estar sujeto a mejoras, El mecanismo de fijación debe mejorarse para garantizar la seguridad al conectarlo y desconectarlo, de manera que no pueda soltarse si no es de forma realmente voluntaria, Además, la detección del tipo de agarre usado (manual o automático) actualmente podría activarse accidentalmente al ser un simple sensor de contacto, Existen multitud de opciones como lecturas de códigos de barras, chips NFC... que pueden combinarse y aumentar la seguridad en este sentido,

En cuanto a la electrónica y los componentes empleados, estos están diseñados para la realización de experimentos a nivel de laboratorio, El diseño de placas, sensores y actuadores específicos para un diseño óptimo de la herramienta mejorarían tanto el comportamiento a nivel de señales como la compacidad general de la herramienta, Además, todo este diseño debería realizarse siguiendo las indicaciones de la normativa vigente para aparatos eléctricos compatibles para su uso en quirófanos,

Idealmente, una de las aplicaciones principales de esta herramienta de aspiración consiste en su utilización mediante el manejo de un robot quirúrgico colaborativo, que trabaje de forma autónoma para asistir al cirujano durante la intervención, Por ello, habría que centrar una línea de trabajo futura en diseñar un sistema de planificación de movimientos autónomo que detecte la presencia de sangrado (mediante algoritmos de visión, inteligencia artificial...) para realizar una aspiración de forma automática, todo ello sin interferir en las labores principales del cirujano, Para alcanzar este reto, el robot debe conocer el comportamiento exacto del sistema de aspiración para realizar correctamente esta tarea,

Por último, y no menos relevante, habría que estudiar como línea de trabajo la ergonomía de la herramienta, Mejoras como la morfología del accesorio de agarre manual, la ubicación de los pulsadores o el indicador de aspiración pueden ayudar enormemente a manejar correctamente la herramienta, Pero también las dimensiones o ubicar la posición del centro de masas de la herramienta al unir el cabezal con el elemento de agarre son aspectos a tener en cuenta, Del mismo modo, estos aspectos deben ser analizados en el uso automático de la herramienta, para conocer el espacio de trabajo en el que el robot mueve la herramienta y así evitar posibles configuraciones cinemáticas forzadas,

En base a las anteriores conclusiones, es posible ampliar el proyecto realizando una serie de modificaciones o extensiones que permitirán aumentar el número de acciones que puede

realizar el dispositivo, De esta forma este proyecto es el inicio de un proceso de innovación en la cirugía endonasal,

Bibliografía

- [1] GONZÁLEZ-DARDER, José Manuel, Historia de la craneotomía, *Neurocirugía*, 2016, vol. 27, no 5, p. 245-257.
- [2] CAVALLO, Luigi M., et al, Cirugía endonasal endoscópica de la línea media del cráneo: estudio anatómico y consideraciones clínicas, *Enfoque neuroquirúrgico*, 2005, vol. 19, no 1, p. 1-14.
- [3] CAPPABIANCA, Paolo; CAVALLO, Luigi María; DE DIVITIIS, Enrico, Cirugía endoscópica transnasfenoidal endonasal, *Neurocirugía*, 2004, vol. 55, no 4, p. 933-941.
- [4] García Fernández, Alfredo; Mata Castro, Nieves; CIRUGÍA DE FOSA NASAL Y SENOS PARANASALES: INDICACIONES DE ABORDAJE EXTERNO Y ENDOSCÓPICO, Asociación Madrileña de Otorrinolaringología, 2014.
- [5] MIN XIAOLI; CAO YI, Multifunctional aspirator head dedicated to minimally invasive neurosurgery, China Patent, NO. 08815592, 2018-11-16.
- [6]ZHANG QIUHANG; FENG YANJU, Multifunctional aspirator for nasal endoscope surgeries, China, Patent, NO. 103977497, 2014-08-13.
- [7] ZHANG QIUHANG; FENG YANJUN, Multifunctional aspirator of nasal endoscope surgery, China, Patent, No. 203842163, 2014-09-24.
- [8] JUN WOO KEUM [KR], A HANDPIECE AVAILABLE INJECTION AND SUCTION, China, Patent, NO. 20150407, 2016-10-17.
- [9] PU HAIJING [CN] ; HAIJING PU, Nasal septum ablation device, China, Patent, NO 20060220, 2007-03-07.
- [10] KRESPI YOSEF P., Apparatus for administering local anesthetics and therapeutic medications during endoscopic surgery, U.S., Patent, NO. 5817073, 1998-10-06.
- [11] KRESPI YOSEF P, Apparatus for administering local anesthetics and therapeutic medications during endoscopic surgery, U.S., Patent, NO. 5817073, 1998-10-06.

- [12] NEWHAUSER JR RICHARD R; GOLDFARB ERIC A; WHITE JOHN W; LIN ARTHUR M., Devices and Methods for Transnasal Irrigation or Suctioning of the Sinuses, U.S., Patent, NO. 2017224907, 2017-08-10.
- [13] WANG ZHAOLING; LIU YINGXIN; ZHANG JINGTAO., Cerebral surgery multifunctional suction tube, China, Patent, NO. 203315515, 2013-12-04.
- [14] FERNÁNDEZ, Benjamín Macías; FERNÁNDEZ, Luis A, Macías, Cirugía de mínima invasión en nariz y senos paranasales con instrumentación motorizada, *Revista Mexicana de Cirugía Endoscópica*, 2001, vol. 2, no 2, p. 97-102.
- [15] GUZMÁN-ROMERO, Ana Karla; MACÍAS-FERNÁNDEZ, Benjamin, Cirugía endoscópica nasosinusal: efecto en población pediátrica y el crecimiento facial, En *Anales de Otorrinolaringología Mexicana*, 2016, p. 139-145.
- [16] PARENTE HERNÁNDEZ, B.; SENTIERI OMARREMENTERÍA, A.; JUNCEDA MORENO, J, Técnicas correctoras de la obstrucción del sistema lagrimal en el sistema vertical, *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*, 2012, vol. 87, no 5, p. 139-144.
- [17] ABARCA, Alfredo, et al, Reparación endoscópica endonasal de fístulas de líquido cefalorraquídeo no quirúrgicas: Experiencia Hospital Clínico Universidad de Chile, *Revista de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello*, 2010, vol. 70, no 3, p. 205-214.
- [18] PERAIO, Simone, et al, From above or from below? That is the question, Comparison of the supraorbital approach with the endonasal approach, A cadaveric study, *British journal of neurosurgery*, 2018, vol. 32, no 5, p. 548-552.
- [19] RE, Massimo, et al, Traditional endonasal and microscopic sinus surgery complications versus endoscopic sinus surgery complications: a meta-analysis, *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 2012, vol. 269, no 3, p. 721-729.
- [20] RUBIO, D^a Concepción Sosa, ABORDAJE ENDONASAL EXPANDIDO (AEE) CUIDADOS DE ENFERMERÍA.
- [21] SaludNews, La cirugía endoscópica transesfenoidal, la mejor opción para extraer los tumores hipofisarios, SaludNews, 8 de abril, 2019.

- [22] MOYANO, JA Márquez, et al, Shock tóxico estafilocócico asociado a cirugía nasal, *Acta Otorrinolaringológica Española*, 2005, vol. 56, no 8, p. 376-378.
- [23] BURGNER, Jessica, et al, A telerobotic system for transnasal surgery, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, vol, 19, no 3, p. 996-1006.
- [24] MINOR, A., et al, Robot para cirugía laparoscópica, *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 2002, vol. 23, no 1, p. 27-32.
- [25] MANDHANI, Anil; BERRYHILL JR, Roy; TEWARI, Ash K, Prostectomía robótica atérmica: perspectiva del ayudante quirúrgico, *Archivos Españoles de Urología (Ed, impresa)*, 2007, vol. 60, no 4, p. 375-382.
- [26] GRANELL, José; GUTIÉRREZ, Raimundo, Introducción a la cirugía robótica en cabeza y cuello, 2015.
- [27] HE YUCHENG; ZHANG PENG; SUN XIANGQUAN; HU YING; GAO PENG; ZHANG JIANWEI, Passive type nasal endoscopic surgery assisting robot, China, Patent, NO. 104546066, 2015-04-29.
- [28] BURGNER, Jessica, et al, Un sistema teleoperado bimanual para la cirugía endonasal de la base del cráneo, En *2011 IEEE / RSJ conferencia internacional sobre robots inteligentes y sistemas*, IEEE, 2011, p. 2517-2523.
- [29] Amores Elena, Marta; Muñoz-Martínez, Víctor Fernando; Bauzano-Núñez, Enrique; Diseño y desarrollo de la simulación de las señales de la actividad cerebral para cirugía endoscópica endonasal, *Ingeniería de Sistemas y Automática*, 2018-02.
- [30] Karl Storz, KARL STORZ SE & Co. KG. Recuperado de <https://www.karlstorz.com/es/es/neurosurgery.htm>
- [31] DE, CIRUGÍA ENDOSCÓPICA AVANZADA DE BASE; ESPACIOS, CRÁNEO Y, Abordajes endoscópicos endonasaes transpterigoideos, *Otorrinolaringológica*, 2007, vol. 58, no Supl 1, p. 41-9.
- [32] XU DINGYUAN, Multi-head suction device for paranasal sinus endoscopic surgery, China, Patent, NO. 107440747, 2017-12-08.

- [33] MIN XIAOLI; CAO YI, Multifunctional aspirator head dedicated to minimally invasive neurosurgery, China Patent, NO. 08815592, 2018-11-16.
- [34] ZHANG QIUHANG; FENG YANJU, Multifunctional aspirator for nasal endoscope surgeries, China, Patent, NO. 103977497, 2014-08-13.
- [35] MORFELD DIANE E; CHARMASSON HENRI J A., Blood-loss measurement apparatus, U.S., Patent, NO. 4562842, 1986-01-07.
- [36] BRUMBACH JOSEPH F; MURRY EDWARD J., Valued device for controlling vacuum in surgery, U.S., Patent, NO. 4184510, 1980-01-22.
- [37] CHOW MINA W B; HA HUNG V; MUNI KETAN P; GOLDFARB ERIC A., Devices and Methods for Transnasal Dilation and Irrigation of the Sinuses, U.S., Patent, No, 2015328394, 2015-11-19.
- [38] NEWHAUSER JR RICHARD R; GOLDFARB ERIC A; WHITE JOHN W; LIN ARTHUR M., Devices and Methods for Transnasal Irrigation or Suctioning of the Sinuses, U.S., Patent, NO, 2017224907, 2017-08-10.
- [39] TARABRIN V I; STARYKH V S., ORGANISM CAVITY RINSING APPARATUS, Rusia, Patent, NO. 2202373, 2003-04-20.
- [40] WANG ZHAOLING; LIU YINGXIN; ZHANG JINGTAO, Cerebral surgery multifunctional suction tube, China, Patent, NO. 203315515, 2013-12.
- [41] Generalitat Valenciana, Guía de Actuación de Enfermería, Manual de procedimientos generales, Valencia, 2007.
- [42] Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS), Plan Nacional de resistencia a antibióticos, recomendaciones para la desinfección y esterilización de los materiales sanitarios, Madrid, Junio de 2017.
- [43] AJLER, Pablo, et al, Cirugía transnasal endoscópica para tumores de hipófisis, *Surgical Neurology International*, 2012, vol. 3, no Suppl 6, p. S389.
- [44] V, F, Muñoz Martínez, Proyecto de investigación con título: Sistema robótico colaborativo para la corrección del brain-shift en aplicaciones de neurocirugía endoscópica endonasal, Plan

Nacional de Investigación, programa retos de la sociedad, R, DPI2016-80391-C3-1-R., Ed. 2016

[45] SHEN, Chiung Chyi, SIIC TV, 2011.

[46] Enseñat Nora, Joaquim, Ferrer Rodríguez, Enrique, Abordaje transfenoidal endoscópico en patología sellar, Descripción y análisis de una nueva técnica en nuestro ámbito hospitalario, Comparación respecto a la vía transfenoidal clásica, Departamento de cirugía y especialidades quirúrgicas, Universidad de Barcelona.

Anexo

- **Modo manual**

```
#include <TinkerKit.h>

int relay1 = 5; //bomba de inyección

int relay2 = 4; //electroválvula

int relay3 = 6; //bomba de succión

int pulsador_irrigador = 0;

int pulsador_seguridad = 1;

float sensor = A4;

int estado_Actual = 0;

int estado_Anterior = 0;

int x = 0;

TKLed LED(O0);

void setup()

{

    Serial.begin(9600);

    pinMode(pulsador_irrigador, INPUT);

    pinMode(pulsador_seguridad, INPUT);

    pinMode(relay1, OUTPUT);

    pinMode(relay2, OUTPUT);

    pinMode(relay3, OUTPUT);
```

```

pinMode(sensor, INPUT);

}

void loop()

{

float valor_sensor = analogRead(sensor);

float valor = map(valor_sensor, 0, 1023, 0, -101);

int estado = digitalRead(pulsador_seguridad);

if ((estado == HIGH) && (estado_Anterior == LOW) && (digitalRead(pulsador_irrigador)
!= 0) ) {

    x = 1 - x;

    delay(21);

}

estado_Anterior = estado;

if (x == 0) {

    if (digitalRead(pulsador_irrigador) == 0) {

        digitalWrite(relay1, HIGH);

        digitalWrite(relay2, HIGH);

        digitalWrite(relay3, LOW);

    } else if (digitalRead(pulsador_irrigador) == 1) {

        digitalWrite(relay1, LOW);

        digitalWrite(relay2, LOW);

        digitalWrite(relay3, HIGH);

    }

} else if (x == 1) {

```

```

    digitalWrite(relay1, LOW);

    digitalWrite(relay2, LOW);

    digitalWrite(relay3, LOW);

}

if (valor >= -27) {

    LED.off();

} else {

    LED.on();

}

Serial.print("La presion es ");

Serial.print(valor_sensor, 2);

Serial.print(" ");

Serial.print(valor, 2);

Serial.print(" KPa ");

Serial.println("");

delay(100);

}

```

- **Modo automático**

```

#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >=100

    #include <Arduino.h>

#else

    #include <WProgram.h>

#endif

```

```

#include <ros.h>

#include <std_msgs/Bool.h>

#include <std_msgs/Float32.h>

bool x;

bool irr;

int sensor=A4;

std_msgs::Float32 pres_msg;

ros::Publisher pub_pres("presion", &pres_msg);

void aspirador2( const std_msgs::Bool& aspirador1){

    x=aspirador1.data;

}

ros::Subscriber<std_msgs::Bool> sub("aspirador", &aspirador2);

void irrigador2( const std_msgs::Bool& irrigador1){

    irr=irrigador1.data;

}

ros::Subscriber<std_msgs::Bool> sub2("irrigador", &irrigador2);

ros::NodeHandle nh;

void setup()

{

    pinMode(4, OUTPUT);

    pinMode(5, OUTPUT);

    pinMode(6, OUTPUT);

    pinMode(sensor,INPUT);

```

```

nh.initNode();

nh.subscribe(sub);

nh.subscribe(sub2);

nh.advertise(pub_pres);
}

long publisher_timer;

void loop()
{
    if(x==1 && irr==1){
        digitalWrite(5,HIGH);
        digitalWrite(4,HIGH);
        digitalWrite(6,LOW);
    }else if(x==1 && irr==0){
        digitalWrite(5,LOW);
        digitalWrite(4,LOW);
        digitalWrite(6,HIGH);

    }else if(x==0 && irr==0){
        digitalWrite(5,LOW);
        digitalWrite(4,LOW);
        digitalWrite(6,LOW);
    }else if(x==0 && irr==1){
        digitalWrite(5,LOW);

```



```
digitalWrite(4,LOW);  
digitalWrite(6,LOW);  
}  
float r=analogRead(sensor);  
if (millis() > publisher_timer) {  
    pres_msg.data=map(r,0,1023,0,-101);  
    pub_pres.publish(&pres_msg);  
    publisher_timer = millis() + 100;  
}  
nh.spinOnce();  
delay(10);  
}
```