



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA ACTIVACIÓN EN LA DESINFECCIÓN DE CANALES DENTALES CON VAPOR LOCK

Autor: Lucía Manzano García

Director: Jesús R. Jiménez Octavio

Director: Saúl M. Dorado Nuño

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Análisis del efecto de la activación en la desinfección de canales dentales con vapor
lock

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

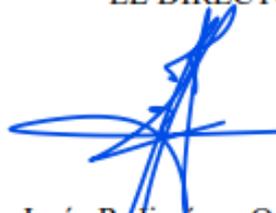
Fdo.: Lucía Manzano García

Fecha: 18 / 07 / 2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Jesús R. Jiménez Octavio

Fecha: 18 / 07 / 2022



Fdo.: Saúl M. Dorado Nuño

Fecha: 18 / 07 / 2022



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA ACTIVACIÓN EN LA
DESINFECCIÓN DE CANALES DENTALES CON
VAPOR LOCK

Autor: Lucía Manzano García

Director: Jesús R. Jiménez Octavio

Director: Saúl M. Dorado Nuño

Madrid

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA ACTIVACIÓN EN LA DESINFECCIÓN DE CANALES DENTALES CON VAPOR LOCK.

Autor: Manzano García, Lucía.

Directores: Jiménez Octavio, Jesús. Dorado Nuño, Saúl.

Entidad Colaboradora: ICAI.

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: Vapor lock, irrigación, activación, ensayos experimentales, ensayos computacionales.

1. Introducción

Los fracasos en las endodoncias se producen mayoritariamente por reinfecciones bacterianas que ocurren por la presencia de tejido pulpar infectado que no ha sido eliminado durante el tratamiento. La limpieza en las endodoncias tiene como fin eliminar cualquier resto de tejido pulpar dejando las cavidades totalmente vacías mediante la irrigación de un líquido en los canales radiculares.

El proceso de limpieza hoy en día no es totalmente eficaz debido a la complejidad anatómica de los canales dentales, la presencia de dentritus y la aparición de burbujas de aire tras el proceso de irrigación. Al fenómeno de aparición de burbujas de aire se denomina vapor lock y la principal implicación que tiene sobre la limpieza es que esas burbujas impiden al líquido irrigante acceder a todas las paredes de los canales. Independientemente del tipo de irrigación que se utilice en la limpieza, este efecto aparece y por ello se están estudiando distintas técnicas para conseguir eliminar ese volumen de gas. Una de las soluciones y la que va a tratar este trabajo es la activación sónica del líquido irrigante mediante un EndoActivador. Concretamente, este trabajo propone un proyecto para dar respuesta a la eficacia de la activación del irrigante tras la irrigación en la eliminación de las burbujas de aire.

2. Definición del Proyecto

El proyecto plantea la realización de varios ensayos tanto de irrigación sónica como de posterior activación utilizando dos técnicas para los mismos. Las dos técnicas serán ensayos experimentales y computacionales. El proyecto propone realizar los mismos ensayos con ambas técnicas y realizar una posterior validación de estos a través de la medición de la

presión en distintos puntos de las geometrías. Además, el proyecto hace un estudio económico de las dos técnicas para ajustar el balance entre costes y precisión de resultados. Para conseguir extraer conclusiones, se proponen por objetivos: diseñar una bancada de ensayo con los elementos necesarios para replicar el proceso de irrigación y activación, realizar simulaciones de irrigación a través de ANSYS Fluent, simular la evacuación de las burbujas de aire por simulación y realizar un análisis económico de los gastos de cada tipo de ensayo.

Por un lado, se plantea la realización de unos ensayos experimentales donde se podrá obtener unas conclusiones cualitativas sobre la reducción del volumen de aire tras la activación. Para realizar esos ensayos, este trabajo ha elaborado una bancada de ensayo completa que replica el proceso de limpieza endodóntica. La bancada de ensayo se divide en tres partes concretas: bombeo de agua regulable, cubo central donde se realizan los propios ensayos, medición de la presión.

Por otro lado, se plantea la obtención de los resultados a través de simulaciones computacionales. Se utilizará en software ANSYS Fluent para resolver el flujo problema mediante la dinámica de fluidos computacional. Para realizar las simulaciones, se generarán unas mallas que se adecúen a las geometrías al mismo tiempo que permitan que el proceso de resolución no sea muy costoso. El balance entre el coste computacional y la validez de los resultados es importante para este proyecto.

3. Resultados y conclusiones

Para los ensayos experimentales, se ha creado una bancada completa diseñada en función del coste y de la funcionalidad y adecuación a los objetivos de los ensayos. Por una parte, se ha elegido para bombear el agua una microbomba de motor de corriente continua sin escobillas que será controlada a través de una electrónica que utiliza la modulación por ancho de pulso (PWM). La electrónica, compuesta de una conexión entre una placa Arduino y un Módulo L298N, permite alimentar el motor de la bomba a diferentes tensiones y así variar la velocidad del motor y por lo tanto el flujo de trabajo. El agua que sale de la bomba será conducida mediante unos tubos de plástico hasta el cubo central.

El cubo central está diseñado con un soporte base al que se le han unido distintos elementos y piezas para conseguir poder realizar los ensayos. Además del soporte central, se han diseñado por una parte la pieza que recibirá el flujo de agua y permitirá irrigar las geometrías a través de una aguja, una estructura que soporte el cubo con los canales radiculares a escala,

y una estructura que permita sostener el sistema de medida de presión. Todas las uniones se realizan a través de varillas roscadas enroscados en distintos agujeros del soporte central y que serán bloqueadas con tornillos prisioneros. Además, los movimientos relativos entre las piezas se han conseguido replicando el movimiento tuerca-tornillo con varillas roscadas con manillares enroscados a las piezas que se moverán. Este conjunto de elementos permite movimientos longitudinales con un control de 0,5mm que corresponden a la mitad del paso de la rosca con la que se roscarán las varillas. Por último, como técnica de fabricación, se ha decidido imprimir en 3D la mayoría de las piezas de la bancada y por otra parte, comprar varillas y tornillos prisioneros comerciales que serán sometidos a un mecanizado para conseguir las piezas finales.

Para tomar las medidas de presión se han elegido unos sensores de presión como instrumento para realizarlas. Los sensores de presión tienen salidas digitales y una precisión del 0,5% por lo que son adecuados para tomar los valores de presión.

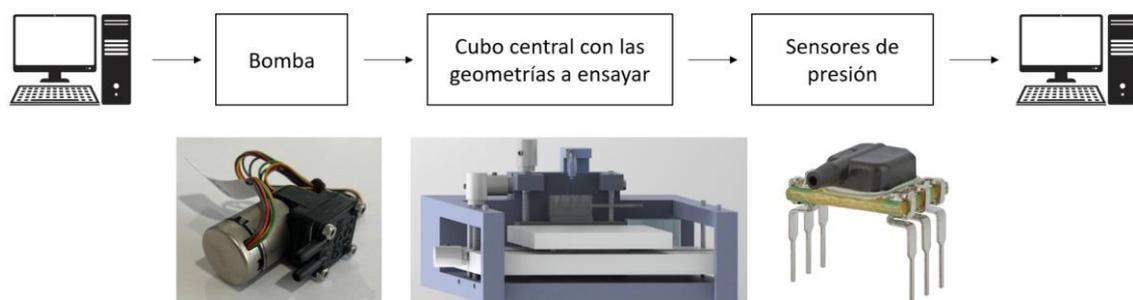


Figura 1. Esquema de la bancada de ensayo para los ensayos experimentales.

Por otra parte, las simulaciones se planifican en el entorno ANSYS Fluent. Para conseguir un balance entre el coste computacional y la precisión de las simulaciones, se ha realizado un análisis de sensibilidad con 3 mallas creadas para cada geometría. Finalmente se han ensayado para la primera geometría una malla con 718.976 elementos y un valor máximo de oblicuidad de 0,952 y para la segunda geometría una malla con 529.126 elementos y 0.845 como valor máximo de oblicuidad. Las simulaciones se han realizado siguiendo como método de solución el modelo viscoso SST-k-omega con opción de corrección de curvatura con un paso de tiempo de 0.0002 segundos consiguiendo una solución que converge con errores residuales de valor menor a 1e-02.

Las simulaciones de irrigación se han realizado en las geometrías 1 y 2 obteniendo para la parte superior del tercio apical valores de presión 500Pa y 600Pa y valores de tensión de cizalladura del fluido en las capas próximas a las paredes 45Pa y 65Pa respectivamente.

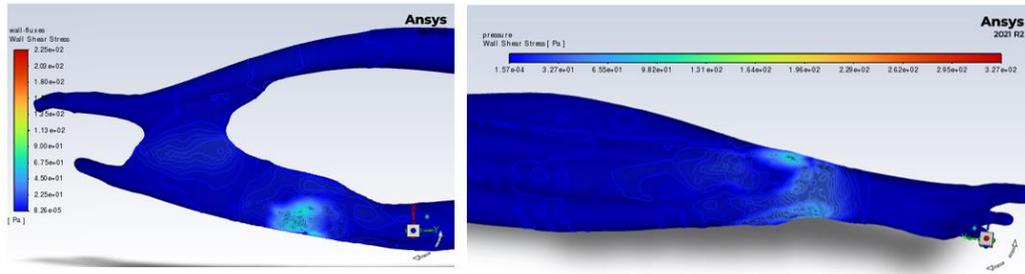


Figura 2. Distribución de wall shear stress

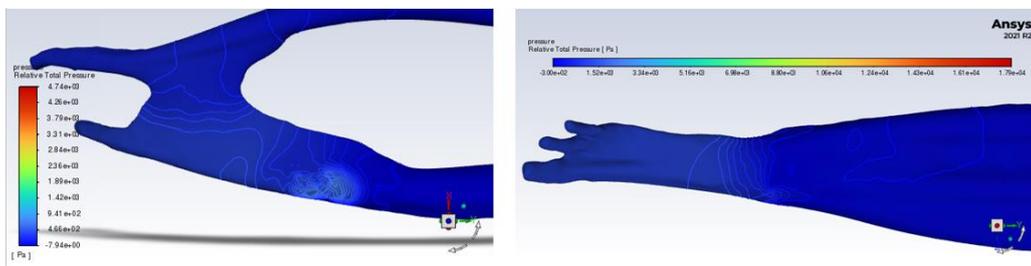


Figura 3. Distribuciones de presiones.

Por último, tras realizar el análisis de todos los costes que conlleva la realización de ambos tipos de ensayos, se ha determinado que la realización de los ensayos experimentales suma una cifra de 1.420,98€ mientras que los computacionales suman una cuantía de 802,08€.

Tras la realización del trabajo, no se pueden obtener conclusiones respecto la validación de los dos tipos de ensayos pues no se han realizado los ensayos experimentales y por tanto no se tienen los valores de presión requeridos para hacer la comparación y el análisis. Queda por tanto como trabajos futuros terminar los ensayos para poder proceder a la validación de los ensayos computacionales.

4. Referencias

- [1] Reyes Suarez, B. E. (2019-09). Tesis. Factores asociados al fracaso del tratamiento endodóntico.
- [2] Agarwal, A., Deore, R. B., Rudagi, K., Nanda, Z., Baig, M. O., & Fareez, M. A. (2017). Evaluation of Apical Vapor Lock Formation and comparative Evaluation of its Elimination using Three different Techniques: An in vitro Study. *The journal of contemporary dental practice*, 18(9), 790-794.

- [3] Boutsoukis, C.; Kastrinakis, E.; Lambrianidis, T.; Verhaagen, B.; Versluis, M.; van der Sluis, L.W. Formation and removal of apical vapor lock during syringe irrigation: A combined experimental and Computational Fluid Dynamics approach. *Int. Endod. J.* 2014, 47, 191–201.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF ACTIVATION IN THE DISINFECTION OF DENTAL CANALS WITH VAPOR LOCK.

Author: Manzano García, Lucía.

Supervisor: Jiménez Octavio, Jesús. Dorado Nuño, Saúl.

Collaborating Entity: ICAI.

ABSTRACT

Keywords: Vapor lock, irrigation, activation, experimental tests, computational tests.

1. Introduction

Endodontic failures are mostly caused by bacterial reinfections that occur due to the presence of infected pulp tissue that has not been removed during treatment. The purpose of endodontic cleaning is to eliminate any remaining pulp tissue, leaving the cavities completely empty by irrigating the root canals with a liquid.

The cleaning process today is not totally effective due to the anatomical complexity of the dental canals, the presence of dentritus and the appearance of air bubbles after the irrigation process. The phenomenon of the appearance of air bubbles is called vapor lock and the main implication it has on cleaning is that these bubbles prevent the irrigating liquid from accessing all the walls of the canals. Regardless of the type of irrigation used in cleaning, this effect appears and for this reason different techniques are being studied to eliminate this volume of gas. One of the solutions and the one that this work is going to deal with is the sonic activation of the irrigant liquid by means of an EndoActivator. Specifically, this work proposes a project to provide an answer to the effectiveness of the activation of the irrigant after irrigation in the elimination of air bubbles.

2. Project Definition

The project proposes to carry out several tests of both sonic irrigation and subsequent activation using two techniques for the same. The two techniques will be experimental and computational tests. The project proposes to perform the same tests with both techniques and to perform a subsequent validation of these tests by measuring the pressure at different points of the geometries. In addition, the project makes an economic study of the two techniques to adjust the balance between costs and accuracy of results. In order to draw conclusions, the following objectives are proposed: to design a test bench with the necessary elements to replicate the irrigation and activation process, to perform irrigation simulations using

ANSYS Fluent, to simulate the evacuation of air bubbles by simulation and to perform an economic analysis of the costs of each type of test.

On the one hand, experimental tests will be carried out to obtain qualitative conclusions on the reduction of the air volume after activation. In order to carry out these tests, this work has developed a complete test bench that replicates the endodontic cleaning process. The test bench is divided into three specific parts: adjustable water pumping, central bucket where the tests themselves are performed, pressure measurement.

On the other hand, the results will be obtained through computational simulations. ANSYS Fluent software will be used to solve the flow problem by means of computational fluid dynamics. To carry out the simulations, meshes will be generated that are adapted to the geometries while at the same time allowing the resolution process to be inexpensive. The balance between computational cost and validity of the results is important for this project.

3. Results and conclusions

For the experimental tests, a complete bench has been designed according to the cost, functionality and suitability for the test objectives. On the one hand, a brushless DC motor micro-pump has been chosen to pump the water, which will be controlled through an electronic system using pulse width modulation (PWM). The electronics, composed of a connection between an Arduino board and an L298N Module, allows to feed the pump motor at different voltages and thus vary the motor speed and therefore the working flow. The water coming out of the pump will be conducted through plastic pipes to the central bucket.

The central bucket is designed with a base support to which different elements and parts have been attached in order to be able to carry out the tests. In addition to the central support, we have designed the part that will receive the water flow and will allow irrigation of the geometries through a needle, a structure that supports the cube with the root canals to scale, and a structure that will support the pressure measurement system. All the connections are made by means of threaded rods screwed into different holes of the central support and which will be locked with grub screws. In addition, the relative movements between the parts have been achieved by replicating the nut-screw movement with threaded rods with handlebars screwed to the parts to be moved. This set of elements allows longitudinal movements with a control of 0.5mm corresponding to half the pitch of the thread with which the rods will be threaded. Finally, as a manufacturing technique, it has been decided to 3D print most of the

parts of the bedplate and, on the other hand, to buy commercial rods and set screws that will be subjected to machining to obtain the final parts.

To take the pressure measurements, pressure sensors have been chosen as the instrument to perform them. The pressure sensors have digital outputs and an accuracy of 0.5% so they are suitable for taking pressure values.

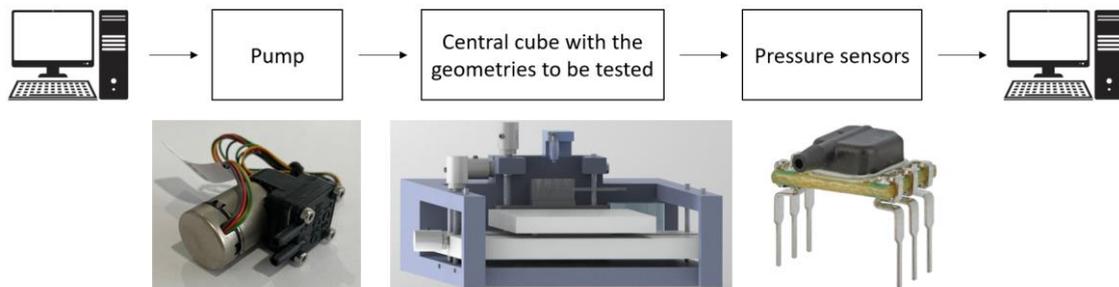


Figure 1. Schematic of the test bench for experimental tests.

Moreover, the simulations are planned in the ANSYS Fluent environment. In order to achieve a balance between computational cost and accuracy of the simulations, a sensitivity analysis has been performed with 3 meshes created for each geometry. Finally, for the first geometry a mesh with 718,976 elements and a maximum obliquity value of 0.952 and for the second geometry a mesh with 529,126 elements and 0.845 as maximum obliquity value have been tested. The simulations have been carried out following as solution method the viscous model SST-k-omega with curvature correction option with a time step of 0.0002 seconds obtaining a solution that converges with residual errors of value less than $1e-02$.

The irrigation simulations have been performed in geometries 1 and 2 obtaining for the upper part of the apical third pressure values 500Pa and 600Pa and fluid shear stress values in the layers close to the walls 45Pa and 65Pa respectively.

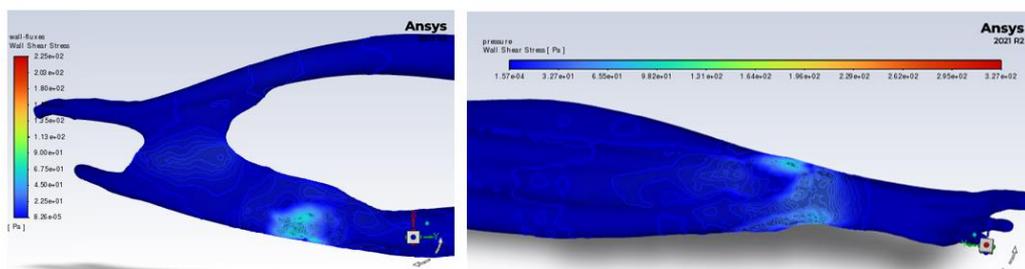


Figure 2. Wall shear stress distribution.

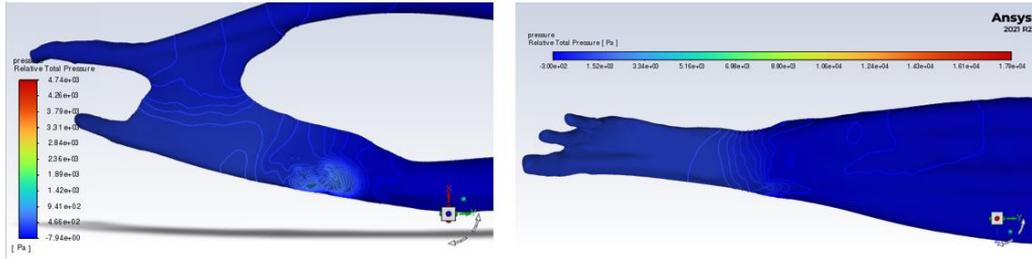


Figure 3. Pressure distribution.

Finally, after analyzing all the costs involved in carrying out both types of tests, it was determined that the experimental tests amounted to €1,420.98 while the computational tests amounted to €802.08.

After carrying out the work, no conclusions can be drawn regarding the validation of the two types of tests because the experimental tests have not been carried out and therefore the pressure values required for comparison and analysis are not available.

4. Referencias

- [1] Reyes Suarez, B. E. (2019-09). Tesis. Factores asociados al fracaso del tratamiento endodóntico.
- [2] Agarwal, A., Deore, R. B., Rudagi, K., Nanda, Z., Baig, M. O., & Fareez, M. A. (2017). Evaluation of Apical Vapor Lock Formation and comparative Evaluation of its Elimination using Three different Techniques: An in vitro Study. *The journal of contemporary dental practice*, 18(9), 790-794.
- [3] Boutsoukias, C.; Kastrinakis, E.; Lambrianidis, T.; Verhaagen, B.; Versluis, M.; van der Sluis, L.W. Formation and removal of apical vapor lock during syringe irrigation: A combined experimental and Computational Fluid Dynamics approach. *Int. Endod. J.* 2014, 47, 191–201.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Introducción a la endodoncia.....	6
1.2 Definición del trabajo	9
1.2.1 Motivación y justificación	9
1.2.2 Objetivos y metodología	11
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	14
2.1 Fracaso en las endodoncias	14
2.2 Factores que dificultan la limpieza total en la irrigación.....	15
2.2.1 Complejidad anatómica de los canales dentales.....	15
2.2.2 Presencia de istmos	16
2.2.3 Presencia de detritus	16
2.2.4 Vapor lock o burbujas de aire atrapadas.....	16
2.3 Métodos para eliminar las burbujas de aire	17
2.3.1 Tipos de irrigación	17
2.3.2 Activación del irrigante.....	18
2.3.3 Otros métodos.....	19
Capítulo 3. Ensayo experimental	21
3.1 Definición del ensayo	21
3.2 Metodología.....	22
3.3 Bancada de ensayo	22
3.3.1 Bomba.....	23
3.3.2 Cubo central	32
3.3.3 Toma de medidas de presión	46
Capítulo 4. Ensayo computacional	51
4.1 Definición del ensayo	51
4.2 Metodología.....	52
4.2.1 Geometrías	53
4.2.2 Mallado	53
4.2.3 Setups.....	56

4.3	Análisis de sensibilidad para mallas.....	60
4.3.1	Geometría 1:.....	61
4.3.2	Geometría 2:.....	62
4.4	Resultados	62
4.4.1	Geometría 1:.....	62
4.4.2	Geometría 2:.....	65
Capítulo 5. Análisis económico.....		68
5.1	Análisis económico bancada de ensayo	68
5.1.1	Elección de la bomba	68
5.1.2	Elección de la técnica de impresión 3D.....	69
5.1.3	Costes totales de la bancada de ensayo	70
5.2	Análisis económico ensayo computacional.....	72
5.3	Comparación	73
Capítulo 6. Trabajos futuros		74
6.1	Ensayos Experimentales.....	74
6.2	Ensayos computacionales de activación.....	74
6.2.1	Tipo de flujo.....	75
6.2.2	Malla variable	76
Capítulo 7. Conclusiones.....		77
Capítulo 8. Objetivos de desarrollo sostenible.....		79
8.1	ODS 3.....	79
8.2	ODS 9.....	79
Capítulo 9. Bibliografía.....		80
ANEXO I 87		
ANEXO II 88		

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de la bancada de ensayo para los ensayos experimentales.....	6
Figura 2. Distribución de wall shear stress.....	7
Figura 3. Distribuciones de presiones.....	7
Figura 4. Fases de un tratamiento endodóntico.[6]	8
Figura 5. Irrigación por presión positiva. [24].	18
Figura 6. Efecto vapor lock.[24].....	18
Figura 7. Irrigación por presión negativa.[24].....	18
Figura 8. Esquema de las partes de la bancada de ensayo.....	23
Figura 9. Microbomba S220BL.....	24
Figura 10. Módulo L298N.....	27
Figura 11. Descripciones de los cables de la bomba. [45].	28
Figura 12. Conexión electrónica del control de la bomba.....	29
Figura 13. Vista frontal del cubo central de la bancada de ensayo.	32
Figura 14. Cubo central con elementos numerados.....	33
Figura 15. Representación del movimiento tuerca – tornillo.	35
Figura 16. Pomo	36
Figura 17. Primera parte del cubo central: control del cubo de ensayo.	37
Figura 18. Cubo de ensayo con las geometrías.	37
Figura 19. Detalle del adaptador de aguja y su conexión al soporte.	39
Figura 20. Segunda parte del cubo central: Estructura para la medición de la presión.....	40
Figura 21. Corte ampliado de la unión de las dos placas para protoboard	41
Figura 22. Sujeción de varillas.	41
Figura 23. División del soporte principal.	44
Figura 24. Sensor de presión.	48
Figura 25. Esquema de conexión del sensor de presión con Arduino.....	49
Figura 26. Pieza empalme para medidas de presión.....	50

Figura 27. Geometría 1.....	52
Figura 28. Geometría 2.....	52
Figura 29. División de las geometrías para distintas zonas de malla.	55
Figura 30. Errores residuales de la simulación 1 tras la convergencia de la solución.....	63
Figura 31. Esfuerzo de cizalladura en las proximidades de la pared de la geometría 1.....	63
Figura 32. Ampliación de los esfuerzos de cizalladura para la geometría 1.	64
Figura 33. Diagrama de presiones relativas de la geometría 1.....	64
Figura 34. Representación de la presión relativa por planos de interés de la geometría 1..	65
Figura 35. Errores residuales de la simulación para la geometría 2.	65
Figura 36. Esfuerzo de cizalladura de la geometría 2, vista 1.	66
Figura 37. Esfuerzo de cizalladura de la geometría 2, vista 2.	66
Figura 38. Distribución de presiones en la geometría 2.	67
Figura 39. Bomba peristáltica BT100M.	68
Figura 40. Código Arduino para el sensor de presión.[60].	88

Índice de tablas

Tabla 1. Tensiones de salida en función del ciclo de trabajo y de la alimentación.....	31
Tabla 2. Flujos en función del ciclo de trabajo.	31
Tabla 3. Elementos de la bancada	33
Tabla 4. Comparación de mallas para la Geometría 1.....	61
Tabla 5. Comparación de la presión para la Geometría 1.	61
Tabla 6. Comparación de mallas para la Geometría 2.....	62
Tabla 7. Comparación de la presión para la Geometría 2.	62
Tabla 8. Comparación de costes entre PETG y una resina resistente.....	70
Tabla 9. Desglose de costes de los ensayos experimentales.....	71
Tabla 10. Desglose de costes de los ensayos computacionales.	72

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la salud bucal ha ido tomando cada vez más importancia, pero la preocupación por la misma siempre ha existido. Una de las afecciones dentales más relevantes y extendidas entre la población es aquella que afecta a la pulpa del interior del diente desde la corona hasta la raíz del mismo y se denomina absceso dental periapical. [38]. La endodoncia es la ciencia que se encarga de estudiar la pulpa dental y los tejidos que rodean al diente, así como las enfermedades y condiciones clínicas asociadas a los mismos y los tratamientos que permiten conservar y curar las piezas dentales.

La primera endodoncia se sitúa temporalmente hace 2,200 años, lo que confirma que es un problema recurrente desde la antigüedad y para el que se han buscado soluciones desde hace muchos siglos. Desde entonces, muchas culturas han intentado dar explicación a estos dolores y métodos para tratarlos. Estas explicaciones han pasado desde la utilización de alambres de bronce para bloquear la entrada de los conductos radiculares para evitar que un gusano entrase y causase dolor hasta las nuevas tecnologías que permiten eliminar el tejido de la pulpa dental y reemplazarlo por otros materiales. [39].

1.1 INTRODUCCIÓN A LA ENDODONCIA

Según expone la Asociación Española de Endodoncia, la endodoncia, es la rama dentro de la odontología que se encarga de tratar la morfología, fisiología y patología de la pulpa y los tejidos cercanos a la raíz de los dientes. [4]. La pulpa, es un tejido blando que alimenta al diente durante su formación. La pulpa entonces es importante durante el crecimiento del diente, pero después pierde su utilidad y, en casos de infección, se puede eliminar a través de tratamientos endodónticos también llamados endodoncias que, en el caso de no realizarse correctamente, pueden conllevar malas consecuencias como dolores y reinfecciones.

Una endodoncia permite conservar una pieza dental quitando la menor cantidad posible de material nativo, incluyendo el hueso y la encía, que está infectado o dañado. Es un

tratamiento que se hace necesario debido a las infecciones por bacterias que forman las caries, traumatismos, desgastes o infecciones. El principal objetivo de un tratamiento endodóntico es eliminar el tejido infectado de la pulpa en los conductos radiculares de los dientes que presentan una infección o un gran deterioro y renovar ese material con otro inerte y biocompatible. [5]. Se consigue así, eliminar la infección y el dolor dental sin necesidad de extraer el diente por completo.

Este proceso dental consta de distintos pasos. Primero, se debe administrar anestesia local en el diente y aislar este mismo. Después, se levanta el techo cameral y se localizan los conductos radiculares que son los que llegan hasta la raíz del diente. El siguiente paso consiste en eliminar el tejido pulpar con ayuda de elementos mecánicos y limar los canales. Antes de seguir con el proceso, es muy importante hacer una buena limpieza de los canales ya vacíos para poder eliminar las bacterias y dejar el conducto completamente limpio para poder reducir el riesgo de otras infecciones futuras. Este paso normalmente incluye la irrigación de las cavidades ya vacías con soluciones irrigantes que permiten retirar los restos de tejidos pulpar y su posterior aspiración. Tras este paso, las cavidades se rellenan con materiales termoplásticos, habitualmente con gutapercha y se terminan sellando. En ocasiones, es necesario incluir un refuerzo adicional en la raíz. [6][7][8].

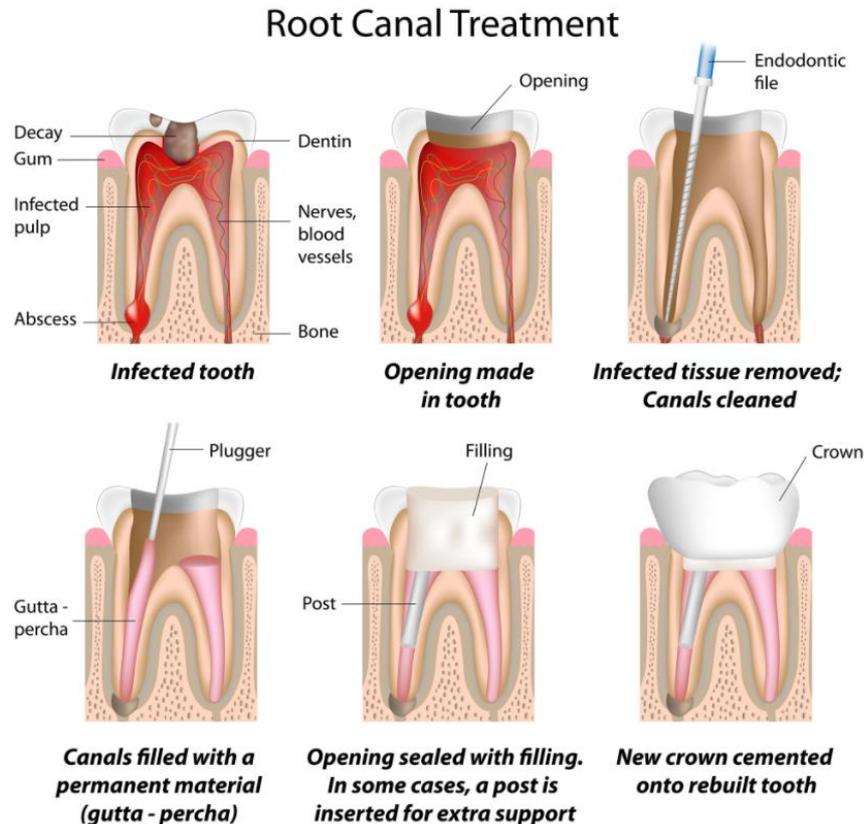


Figura 4. Fases de un tratamiento endodóntico.[9]

En los últimos años, debido a un aumento del nivel socioeconómico de la población y un aumento de la tecnología, las técnicas y tecnologías en medicina y, específicamente en odontología, han sufrido un gran avance. En especial, se han realizado mejoras para aumentar el nivel de éxito en estas intervenciones. A pesar de ello, las endodoncias hoy en día no son siempre efectivas al ya que entre el 5 y 14% de ellas fracasan según la literatura.

El fracaso de una endodoncia implica presencia de dolor, inflamación e infección remanente. Algunos factores que causan el fracaso de las endodoncias son: una evaluación radiográfica pobre, una limpieza ineficiente de los conductos radiculares, una reinfección o falta de control post-tratamiento. La causa más frecuente es la infección bacteriana. Aquellos dientes en los cuales el espacio del tercio apical no contiene en su totalidad material de obturación, suelen ser los más propensos a reinfectarse. Además, la imposibilidad de eliminar todos los microorganismos es lo que provoca la patología. [41]. Para evitar que esto ocurra, se debe

prestar especial atención a hacer un estudio previo de la geometría de los conductos para posteriormente durante la endodoncia tener en cuenta que se han de limpiar y rellenar bien todas las cavidades.

Numerosos estudios posteriormente desarrollados en Parte I2.1, han concluido que la mayoría de los fracasos de tratamientos endodónticos son causados por una ineficiente limpieza y desinfección de los conductos dentales. Las complejas geometrías de los conductos sumadas a la aparición de burbujas de aire o vapor lock que hacen que el irrigante no pueda llegar a la totalidad del diente, son factores que dificultan la limpieza. La desinfección de los conductos es un paso importante en las endodoncias ya que permite liberar el conducto completamente y eliminar los restos de pulpa, microorganismos o subproductos para evitar posibles reinfecciones. Se han ido creando nuevas técnicas que han mejorado esta eficacia, pero todavía no se ha conseguido el 100% de éxito.

1.2 DEFINICIÓN DEL TRABAJO

1.2.1 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Siguiendo la línea de mejorar las endodoncias y específicamente conseguir que la limpieza de los conductos radiculares de los dientes sea óptima, este proyecto pretende plantear un proyecto que sea capaz de analizar el efecto de la activación del irrigante en la eliminación del efecto vapor lock que es uno de los principales causantes de la deficiencia del proceso de irrigación. Dicho proyecto se preparará para poder dar respuesta y comprobar si gracias a la activación sónica trans la irrigación de los conductos radiculares se consigue o no mejorar el proceso de limpieza gracias a la eliminación del efecto vapor lock.

El efecto de vapor lock o burbuja de aire es un efecto que se produce durante la irrigación de los conductos dentales. Consiste en la aparición de pequeñas burbujas de aire que no permiten a los irrigantes llegar al tercio apical del conducto radicular. [10]. Este fenómeno se ha intentado reducir utilizando distintas técnicas de irrigación (de las que se hablará en el Estado de la Cuestión Tipos de irrigación) resultando algunas más efectivas que otras, pero

ninguna al completo. Es, por tanto, que las últimas investigaciones se han centrado en la activación de los irrigantes para comprobar si se reduce la cantidad de aire atrapado.

La base fundamental y primera motivación y justificación del proyecto es poder comprobar si gracias a la activación se desaloja de forma óptima la cantidad de burbujas de aire atrapadas en los conductos radiculares y con ello se mejora la limpieza de los canales. Tras revisar la literatura y saber que el efecto vapor lock es uno de los principales factores que afectan al proceso de limpieza del sistema de conductos radiculares, se sabe que si se consigue disminuir la cantidad de vapor atrapado, se conseguirá también mejorar la limpieza.

La segunda justificación del proyecto se relaciona con la exactitud de replicar las condiciones de las endodoncias reales. Las investigaciones que se han hecho hasta día de hoy han tenido en cuenta muchas simplificaciones y por eso los resultados no son tan fiables como se desea, de hecho, algunos de los ensayos han sido no concluyentes por este motivo como [29] . Este proyecto persigue conseguir simular las condiciones reales de las endodoncias, tanto en ensayos experimentales como en computacionales, en cuanto a geometría de los canales radiculares y a las condiciones de contorno y factores que influyen en los tratamientos.

Como se ha expuesto en el Parte I Capítulo 2. Estado de la Cuestión, hasta día de hoy, las investigaciones se han realizado mediante ensayos experimentales con distintas técnicas de activación y distintos métodos de simular la realidad, pero ninguno de ellos lo ha hecho a través de un software. Es por tanto que uno de los objetivos de este trabajo y motivación de este, es encontrar la manera de simular el ensayo experimental a través de ANSYS Fluent, un software de dinámica de fluidos computacional que permite simular el comportamiento de los fluidos. A partir de un ensayo experimental, se va a intentar reproducir en Ansys el mismo efecto. Cuando se tengan los resultados de ambos ensayos, se compararán los resultados para ver si la simulación se ajusta a lo ocurrido en la realidad.

La simulación es una herramienta muy útil en el ámbito de la ingeniería ya que permite predecir comportamientos de manera más rápida que si se tuviese que hacer experimentalmente además de promover el desarrollo tecnológico y la sustentabilidad.

Gracias a las simulaciones, las investigaciones son mucho más rápidas y permiten obtener los efectos de ciertas modificaciones sobre el ensayo base sin necesidad de crear un nuevo experimento. Hoy en día, la efectividad y la rapidez son claves en las investigaciones y permiten un menor coste final en los procesos. Las simulaciones permiten conocer mejor los sistemas ensayados y predecir su comportamiento con diferentes condiciones y circunstancias. [34].

1.2.2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

Para conseguir entonces llegar al objetivo principal que es la obtención de resultado que permitan ver el efecto de la activación en la desinfección de conductos radiculares, se ha propuesto un proyecto dividido en dos partes.

Este proyecto tendrá por partes unos ensayos experimentales y otros computacionales. Gracias a la realización de ambas partes se podrá obtener una comparativa de resultados para, por una parte, verificar los resultados de los dos tipos de ensayos y, por otra parte, y si de la primera se obtienen conclusiones correctas, poder dar respuesta a la pregunta de si la activación mejora la limpieza.

El proyecto tiene distintos objetivos finales que van a permitir planificar un proyecto de estudio completo. Los objetivos más generales son los siguientes:

- Diseño de una bancada de ensayo.
 - o Elección de los mejores métodos que imiten la irrigación y activación de los canales.
 - o Creación de una bancada teniendo en cuenta todos los elementos mecánicos necesarios para su fabricación.
- Simulación de irrigación a través de ANSYS Fluent.
- Evacuación de las burbujas de aire a través de simulación en ANSYS Fluent.
- Análisis económico entre ambos ensayos y discusión de las ventajas de los ensayos computacionales frente a los experimentales.

La metodología del trabajo sigue la línea de los objetivos. El proyecto pretende diseñar y planificar el sistema completo para validar las simulaciones y comprobar las consecuencias de la acción de irrigación y activación el líquido irrigante inyectado en las cavidades de los canales radiculares. El sistema para cumplirlo se divide en tres partes.

La primera consiste en el diseño y creación de una bancada de ensayo que sea capaz de replicar las condiciones que se dan en una clínica durante una endodoncia. Dicha bancada tiene que cumplir una serie de requisitos como bombear agua de manera constante y precisa como si fuera una irrigación mediante una aguja, conseguir la manera de observar cualitativamente qué ocurre con el líquido irrigante una vez inundadas las cavidades y por último, la técnica de medición de distintas presiones para luego poder validar. Además, en el diseño de la bancada también se tendrán que analizar los distintos métodos de fabricación y elegir el más adecuado. La metodología que tendrán los ensayos en dicha bancada siguen los siguientes pasos: inyección del agua como líquido irrigante en las geometrías, observación cualitativa de aparición de burbujas de aire y toma de medidas de presión, activación del líquido, observación cualitativa y toma de medidas de presión.

La segunda parte consiste en la realización de las simulaciones de irrigación y activación a través del software ANSYS Fluent. Para realizar esas simulaciones se debe partir de la geometría a ensayar y crear un conjunto junto a la aguja que se va a introducir. Posteriormente, se debe crear una malla que se ajuste a la geometría para poder obtener resultados válidos y precisos. Se hará un análisis de sensibilidad para ver si una malla menos precisa sigue siendo válida y por lo tanto poder realizar simulaciones con menor coste computacional sin verse alterados los resultados finales por la precisión de la malla. Tras mallar las geometrías, se realizarán los ensayos configurando los parámetros necesarios. Para finalizar, se estudiará el comportamiento del fluido para obtener resultados como la presión.

Por último, la tercera parte del proyecto consistirá en la realización de un estudio económico de las dos partes anteriores descritas. El proyecto planteado conlleva costes de distinta naturaleza y siempre se intentarán tomar las decisiones necesarias en base a la relación calidad-coste. Como finalidad del estudio económico aparte de computar un coste final a

cada parte, será ver si la realización de ensayos computacionales conlleva una mayor ventaja que hacerlo experimentalmente con la creación de la bancada de ensayo.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 FRACASO EN LAS ENDODONCIAS

Los tratamientos endodónticos no siempre son exitosos y es importante ver cuáles son las principales causas de fracaso para intentar evitar esas situaciones.

En todo el proceso, hay muchos factores que pueden producir complicaciones y resultan en fracasos. Algunos de estos factores son: conductos no tratados, errores producidos con la instrumentación, errores en la obturación, instrumentación apical insuficiente (complicado llegar al tercio apical del conducto radicular) y errores de procedimientos iatrogénicos. [11]. Además, se establece que la presencia de microorganismos que no han sido eliminados en el proceso de desinfección es la principal causa de fracaso.

Los estudios de Kerekes y Tronstad en 1979 ya concluían que las bacterias localizadas en sitios inaccesibles podrían ser la causa del mayor índice de fracaso. Obtuvieron esas conclusiones tras analizar los resultados de sus experimentos los cuales dieron índices de éxito de 96% cuando los dientes tenían pulpas vitales, 86% cuando estas se encontraban necróticas y 62% si el tratamiento fue repetido. [13]

En 2016 El Journal of Clinical & Diagnostic Research realizó otro estudio en el que se concluyó que los factores que más influyen en el fracaso de las endodoncias son: la falta de relleno de los conductos (33,3%) y los conductos no rellenados u omitidos (17,7%). [15] A su vez, la falta de relleno se debe a dos causas, una es la falta de presión en la medición de los conductos y la otra es una inadecuada irrigación de los conductos (para dejarlos completamente vacíos).

En una investigación en 2001, Peters y Cols demostraron que entre el 35% y el 40% de la totalidad de las paredes de los conductos no son tocados por la instrumentación mecánica lo que significa que, en esas áreas, la bacterias, infecciones o resto no pueden ser retirados del

conducto. [16]. Por esto mismo, es importante la existencia de una buena irrigación que permita llegar a esas zonas para poder dejar completamente limpio el canal.

Todos estos estudios concluyen en que es necesario realizar una buena limpieza de los canales para poder evitar futuras re infecciones o que los microorganismos que no han conseguido ser eliminados, causen daños. A este proceso de limpieza, se llama irrigación. Consiste en introducir soluciones desinfectantes en los conductos radiculares durante los tratamientos endodónticos con la finalidad de desinfectar y limpiar todo el sistema de conductos y garantizar buenos resultados del tratamiento. [17]

2.2 FACTORES QUE DIFICULTAN LA LIMPIEZA TOTAL EN LA IRRIGACIÓN

La irrigación en la mayoría de los casos no es eficiente ya que, debido a distintos factores, el irrigante no consigue llegar al tercio apical del conducto. Cuando el irrigante no mantiene contacto directo con la pared del conducto radicular, la acción de este no es efectiva.[19].

Son diversos los factores que dificultan la irrigación. A continuación, se exponen aquellos que según la literatura son los más influyentes.

2.2.1 COMPLEJIDAD ANATÓMICA DE LOS CANALES DENTALES

Cada conducto radicular tiene una geometría distinta y muy complejas debido a las formas geométricas y al reducido tamaño de los conductos. Además de los conductos principales, hay conductos accesorios de pequeño tamaño que también pueden contener remanentes bacterianos. Según la literatura, la irrigación es efectiva en la zona central del conducto, pero en las ramificaciones esta efectividad cae y, dado que cada geometría es distinta, no se sabe empíricamente cuál va a ser el comportamiento del fluido de irrigante dentro de la cavidad.

Tras saber que el primer molar inferior tiene una geometría anatómica más compleja que otros dientes, (Swartz et al) Swartz demostró que la tasa de éxito endodóntico para 1007 dientes tratados fue de un 87,79% mientras que para los molares, la tasa de éxito fue de

81,48%. [21]. Estos resultados confirman la hipótesis de que cuanto más compleja sea la geometría, más difícil es la limpieza de sus canales ya que no se consigue una eliminación completa de microorganismos y remanentes de tejido pulpar. [22].

2.2.2 PRESENCIA DE ISTMOS

Un istmo es un espacio estrecho que comunica dos conductos radiculares dentro de la misma raíz dental. La comunicación puede ser completa o parcial y contiene tejido pulpar que puede incluir microorganismos y subproductos que pueden generar una infección de los conductos. [20]. Debido a su localización y tamaño en la geometría total, las herramientas mecánicas como las limas no son capaces de actuar en ellos por lo tanto, es necesario que se limpien a través de la irrigación. De todas formas, estos istmos son especialmente complicados de limpiar y desinfectar ya que son cavidades pequeñas de difícil acceso.

2.2.3 PRESENCIA DE DETRITUS

Al utilizar herramientas endodónticas para tratar de eliminar la pulpa y la infección de los conductos radiculares, se crean detritus y barro dentinario al accionar dichas herramientas sobras las paredes del canal. [24]. Según la literatura, no hay evidencias de que la presencia de estos elementos pueda disminuir el éxito de la endodoncia de forma directa, pero sí hay evidencia de que reduce la penetración de los desinfectantes y esto último si que afecta directamente al éxito del tratamiento.

2.2.4 VAPOR LOCK O BURBUJAS DE AIRE ATRAPADAS

La habilidad de penetración de un líquido en microcanales con extremos cerrados, depende del ángulo de contacto del líquido y de la profundidad y tamaño del canal. En la penetración del mismo, se da un efecto de atrapamiento de aire, un efecto físico ya conocido. Si se espera un tiempo suficiente, los microcanales se acabarán inundando, pero se requiere de tiempos muy largos desde horas hasta días. [25].

A causa del ligamento periodontal y el hueso que rodean y “cierran” el foramen apical de las raíces de los dientes, el sistema de conductos dentales tiene un comportamiento similar a

una cavidad de extremo cerrado y esto hace que al inyectar una solución irrigadora en el diente se quede aire atrapado que no permita al irrigante llegar a todos puntos de la geometría del canal. Estas burbujas de aire se denominan vapor lock. Debido a este fenómeno, muchas veces el irrigante no es capaz de alcanzar el tercio apical del conducto lo que supone que la desinfección no es completa. [26].

Cuando hablamos de endodoncias, no se dispone del tiempo necesario para que desaparezcan las burbujas de aire, es por eso por lo que se han estudiado distintos métodos para conseguir eliminarlas.

2.3 MÉTODOS PARA ELIMINAR LAS BURBUJAS DE AIRE

2.3.1 TIPOS DE IRRIGACIÓN

Existen distintos tipos de irrigación como técnicas manuales con agujas y jeringuillas, técnicas con elementos mecánicos o sistemas de presión negativas. [31]. En la literatura [30][27][32], se ha comprobado que hay algunos tipos de irrigación que favorecen a la formación de burbujas de aire y otros en cambio reducen la cantidad del vapor.

Boutsiouskis confirmó con sus investigaciones que la formación de vapor lock depende del tipo de irrigación utilizada, aunque en todas se forman burbujas, el volumen de las mismas es lo que depende de la técnica de irrigación. Concluyó que las agujas de aperturas laterales favorecen la formación de burbujas de aire en comparación con las agujas de apertura apical con presión positiva. [32].

Siguiendo las conclusiones del estudio anterior y otros estudios de la literatura, la irrigación por presión positiva no consigue irrigar la región apical debido a la aparición del efecto vapor lock. [27]. La irrigación por presión positiva, se realiza introduciendo una jeringuilla que aplicando presión sobre ella introduce el irrigante dentro de los conductos radiculares. Con este tipo de irrigación, el irrigante no llega a completar la longitud de trabajo Figura 5, debido al efecto del vapor lock que no permite el avance de la solución debido a la formación de burbujas de aire Figura 6. Por otro lado, si se utiliza presión negativa, se introduce una cánula

de aspiración introduciendo el irrigante desde la corona lo que permite introducir la cánula mayor longitud de manera segura y el irrigante entonces llega más lejos como se ve en Figura 7. [27].

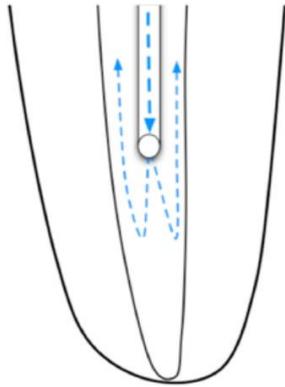


Figura 5. Irrigación por presión positiva. [27].

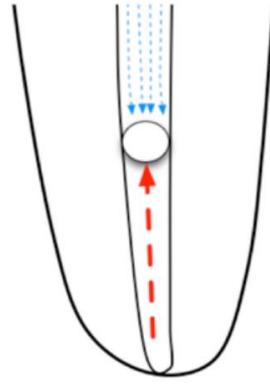


Figura 6. Efecto vapor lock.[27].

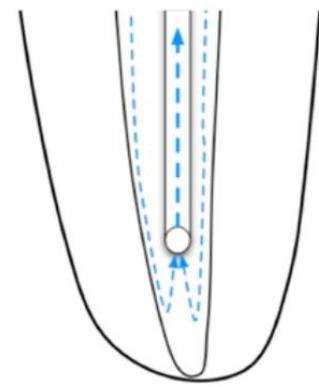


Figura 7. Irrigación por presión negativa.[27].

2.3.2 ACTIVACIÓN DEL IRRIGANTE

Además de utilizar distintas técnicas de irrigación, en los últimos años se ha profundizado más en la investigación de utilizar activadores que permitan reducir la cantidad de aire atrapado. Hay diversas técnicas de activación de irrigantes entre las cuales se encuentran la irrigación con jeringuilla y cánulas, la agitación dinámica manual, irrigación continua durante instrumentación rotatoria, endoactivadores sónicos, irrigación pasiva ultrasónica etc. El principal objetivo de la activación es introducir un elemento que tenga movimiento en el líquido irrigante de tal forma que este último se mueva.

Gracias a la activación de las soluciones desinfectantes, se consigue el alcance a las zonas más inaccesibles del conjunto de conductos radiculares.[33]. Según la literatura, el uso de la activación permite mejorar la limpieza, pero la cuestión que se va a tratar en este proyecto es si también reduce la cantidad de burbujas de aire atrapadas en los conductos radiculares.

En 2014, un grupo de investigación de la Universidad de Sevilla, realizó una investigación sobre el efecto que tienen los sistemas ultrasónicos en la irrigación de los conductos radiculares. [29]. Tras analizar los resultados, llegaron a la conclusión de que, gracias a la activación ultrasónica, se consiguió eliminar bacterias (aunque no de todas las paredes del conducto), eliminar los detritus y también el barrillo dentinario. Por otra parte, concluyeron que no había evidencias claras de que gracias a la activación se consiga el alcance del irrigante a la longitud de trabajo, pero atribuyeron esta falta de evidencia a la dificultad de replicar la situación real con exactitud.

En un estudio realizado por The Journal of Contemporary Dental Practice, se estudió el efecto que tenían en la desaparición del vapor lock tras la irrigación distintas técnicas de activación. Concretamente, se utilizaron como técnicas un Endoactivador (activación sónica), activación ultrasónica y la activación manual dinámica. Sus resultados fueron para todas las técnicas buenos en cuanto a eliminación de las burbujas de aire con un 90% de éxito para el grupo de muestras que se ensayaron con endoactivadores, un 80% para el grupo con irrigación ultrasónica, y un 50% para la activación manual. A pesar de esto, cabe mencionar que los dientes no quedaron exentos de burbujas de aire al 100% aunque si se redujo su cantidad. [28].

En 2016, Dioguardi. M. et ell. [30], hicieron un estudio para comparar la eficacia de dos distintos métodos de activación en la eliminación del vapor lock. Compararon la activación manual dinámica y la irrigación pasiva ultrasónica. Después de comparar los resultados, concluyeron que con la activación ultrasónica, no se consigue eliminar el efecto de bloqueo de vapor ya que sólo puede reducir ligeramente las burbujas de fragmentación, en cambio, el método de activación manual fue mucho más eficaz ya que produjo una reducción del 80% de las burbujas de aire comparado con el 55% del otro método. Esto no quiere decir, que con la activación ultrasónica no se consiguiese una mejora en la limpieza.

2.3.3 OTROS MÉTODOS

Según Darcey, J et all. [27], un método simple de evitar el boqueo de vapor, sería utilizando un material de relleno radicular como la gutapercha ajustado y activado a mano. El proceso

sería sencillo, después de la utilización de los instrumentos mecánicos para eliminar la pulpa y la infección, se introduciría el material de relleno en los espacios de aire.

Capítulo 3. ENSAYO EXPERIMENTAL

3.1 DEFINICIÓN DEL ENSAYO

El objetivo de la limpieza en la endodoncia es conseguir limpiar y eliminar cualquier resto pulpar y tejido infectado de los canales dentales. Para conseguir este objetivo, es necesario inyectar una solución en los canales después de retirar el tejido pulpar para que esta termine de vaciar y limpiar las cavidades. Para garantizar una eficiente limpieza, se debe conseguir que la solución irrigante llegue a todos los puntos de las geometrías complejas de los canales dentales. Las burbujas de aire que se originan tras una primera irrigación impiden que el irrigante cumpla su función en toda la cavidad dental y para lograr el objetivo, se puede realizar un proceso de activación con la ayuda de un Endoactivador. En los ensayos experimentales se van a simular las dos acciones de irrigación y activación para posteriormente poder analizar los resultados.

En esta primera parte del proyecto, los ensayos serán experimentales y se reproducirán las condiciones que se dan en un clínica durante una endodoncia. Para que los resultados sean más precisos, los ensayos se van a realizar en una escala a tamaño real. Se va a utilizar un cubo de ensayo el cual contiene distintas geometrías de canales dentales y que es transparente para poder analizar cualitativamente si hay presencia de burbujas de aire tras la irrigación y si estas desaparecen o se ven reducidas tras activar el líquido irrigante.

Estos ensayos, además de ofrecer resultados cualitativos sobre la eficacia de la activación en la eliminación del vapor lock, también va a permitir obtener unas medidas de presión de distintos puntos de los canales dentales. Estas medidas de presión servirán para conseguir dos objetivos distintos. Por una parte, se compararán los valores con la literatura para comprobar que los ensayos experimentales son correctos y, por otra parte, se utilizarán para compararlos con los valores obtenidos en las simulaciones computacionales.

3.2 METODOLOGÍA

Se va a reproducir con la mayor exactitud las condiciones reales que se dan en el proceso de limpieza durante una endodoncia. Para ello, es necesario crear una bancada que permita reproducir las acciones de irrigación y activación del líquido irrigante. Por lo tanto, primero se ha de diseñar una bancada de ensayo con una preparación de los distintos elementos mecánicos que serán necesarios para llevar a cabo los ensayos. Posteriormente, se elegirá la técnica de fabricación de dicha bancada y una vez obtenida esta, se procederá a conectar y montar todos los elementos mecánicos exteriores que hagan posible el funcionamiento de la estructura. Por último, se realizarán los ensayos de irrigación y activación para cada una de las geometrías y se obtendrán resultados cualitativos de la cantidad de vapor lock presente en los geometrías y resultados cuantitativos de las presiones en los distintos puntos seleccionados.

3.3 BANCADA DE ENSAYO

Para poder realizar los ensayos experimentales, la creación de una bancada eficiente y práctica es necesaria. La bancada de ensayo tendrá distintos componentes:

- Bomba hidráulica para poder impulsar el líquido irrigante a utilizar.
- Cubo central que soporte el cubo de impresión con las geometrías a ensayar y los elementos necesarios para sujetar agujas, endoactivadores y distintos elementos necesarios.
- Sensores de presión para poder obtener valores de presión tras los ensayos.
- Aguja: Endodontic Irrigation Syringe with Needle. 27Gx 1-1/4”.
- Endoactivador: EndoActivator Handpiece / Driver.
- Puntas activadoras: EndoActivator. Activator Tips.

La Figura 8, muestra un esquema de las partes de la bancada final que permitirá realizar los ensayos. El funcionamiento es sencillo. Una bomba hidráulica impulsará un caudal de líquido irrigante a la velocidad deseada para cada ensayo. Posteriormente, este caudal será conducido a través de unos tubos hasta un bloque que sujetará una aguja. El irrigante saldrá por la aguja e inundará las distintas geometrías. En este punto, se tomarán las distintas medidas de presión con los sensores y se llevará un registro de la situación del flujo tras la

irrigación. Una vez tomadas las medidas, la aguja será retirada y se procederá a activar el líquido irrigante con un Endoactivador. Posteriormente, se volverá a repetir la toma de resultados.

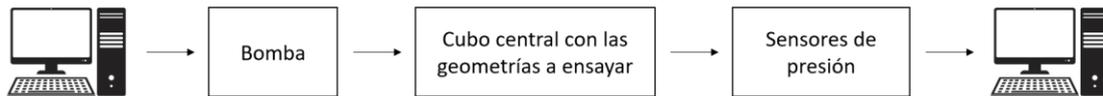


Figura 8. Esquema de las partes de la bancada de ensayo.

3.3.1 BOMBA

Para poder irrigar los canales dentales del cubo de impresión, se precisa una fuente de flujo de agua. Se requiere de una bomba hidráulica que permita bombear agua con un flujo constante. Esto es importante para obtener resultados más precisos y obtener repetibilidad en los ensayos evitando factores humanos que puedan alterar los resultados.

La elección de la bomba se ha realizado en base a el tamaño, precisión, y adaptabilidad. Dado que se trabaja con flujos de agua muy pequeños, la bomba tiene que ser pequeña y coherente con flujos del orden de ml/min. Por otra parte, la precisión en el flujo es necesaria, ya que al tratarse de flujos pequeños y querer aproximarse a la realidad lo máximo posible, no conviene tener poca precisión. Por último, se necesita que la bomba sea adaptable y que tengo un flujo variable para poder realizar distintos ensayos a distintos valores de caudal.

Se ha discutido la viabilidad de dos bombas distintas, una peristáltica digital y otra microbomba de acoplamiento directo y motor DC. En cuanto a funcionalidad ambas son válidas para el proyecto y por eso su elección se ha enfocado al coste de cada una.

Tras hacer el análisis económico en Capítulo 5. Parte I5.1.1 se ha decidido utilizar la microbomba de agua de acoplamiento directo y con motor de corriente continua sin escobillas. La Figura 9 muestra la bomba que se utilizará en los ensayos RS D220BL Micro Pump.

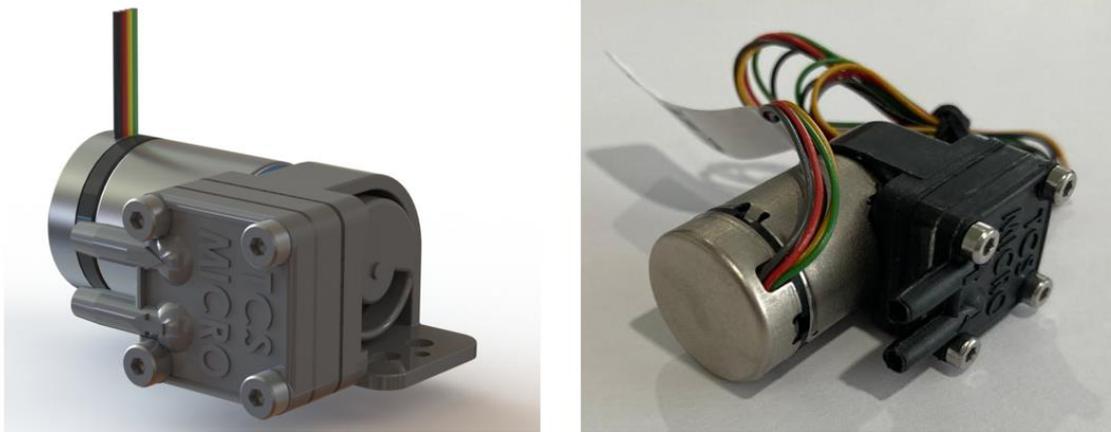


Figura 9. Microbomba S220BL.

Es una microbomba que ofrece un caudal uniforme y sin pulsos lo que supone una gran ventaja. El flujo es variable y puede modificarse cambiando la velocidad de bombeo ajustando la tensión de entrada. Además, al ser una bomba con motor DC sin escobillas, será necesario un driver o una electrónica de control para poder conmutar las bobinas del motor y así accionarlo. La ventaja que ofrecen este tipo de motores es que, al tenerse que controlar con electrónica se puede ir ajustando a las necesidades de caudal y realizar distintos ensayos con distintas velocidades de entrada del agua. [40]

3.3.1.1 Control de la bomba

La bomba a utilizar puede generar flujos variables de caudal, pero para ello, es necesario modificar la velocidad del motor de la misma. La bomba se acciona al recibir una tensión de alimentación. Dependiendo del valor que tome esa tensión, la velocidad del motor de la bomba varía. Que la velocidad del motor varíe, hace que el flujo obtenido a la salida de la bomba varíe también. Por este mismo razonamiento, se consigue variar el flujo de la bomba gracias a la modificación de la tensión de alimentación del motor DC.

El módulo L298N es un driver de puente en H que permite manejar motores DC. Concretamente, permite controlar tanto el sentido como la velocidad de giro de hasta 2 motores DC que funcionen con menos de 2A. Controla estas dos variables a través de señales

TTL (lógica transistor a transistor) que se obtienen a partir de microcontroladores o tarjetas de desarrollo como Arduino. [43].

El uso de este módulo para el control de la bomba es imprescindible. Muchos automatismos no son capaces de proporcionar señales analógicas ya que funcionan a partir de salidas digitales. Este es el caso de Arduino. Arduino trabaja en binario con señales digitales por lo que puede dar dos valores de señal, un valor alto y otro bajo. En el caso de Arduino, los valores de tensión que puede dar son $+V_{cc}=5V$ para el valor alto y $-V_{cc}=0V$ para el valor bajo. Para conseguir entonces un valor de tensión a la salida que esté entre los dos valores de tensión máxima y mínima se necesita utilizar la modulación por ancho de pulso (PWM) y por lo tanto, el módulo L298N.

La técnica utilizada para conseguir un valor de tensión entre 2 valores binarios se llama modulación por ancho de pulso PWM. Esta técnica permite transmitir señales analógicas cuya señal portadora sea digital. Para lograrlo, se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (en este caso será una señal cuadrada periódica) para poder controlar la cantidad de energía que se envía a una carga, en este caso a nuestra bomba. [44][45].

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho de la parte positiva de la misma en relación con el periodo y se suele expresar en porcentaje.

$$\text{Ecuación 1: Ciclo de trabajo} = \frac{t}{T} \cdot 100$$

Siendo t el tiempo de la señal en la parte positiva y T el periodo de la misma.

Para la señal periódica, el periodo y la frecuencia son constantes mientras que lo que varía es el tiempo en el que esa señal está en estado alto y estado bajo (5V y 0V respectivamente para el caso de Arduino). La tensión media final de la señal periódica se puede expresar en función del ciclo de trabajo. Esa tensión media de la señal es la tensión que es capaz de suministrar el módulo L289N a la bomba mientras que los valores de tensión altos y bajos y el tiempo que se suministra cada uno los aporta Arduino.

$$\text{Ecuación 2: } V_{\text{promedio}} = (V_H - V_L) \cdot \frac{\text{ciclo de trabajo}}{100}$$

La ecuación Ecuación 3 indica la expresión de la tensión media a la salida del módulo para el caso concreto de Arduino.

$$\text{Ecuación 3: } V_{\text{promedio}} = (5 - 0) \cdot \frac{\text{ciclo de trabajo}}{100}$$

3.3.1.2 Conexión eléctrica

La Figura 10 presenta el módulo L298N con los distintos pines y conexiones y su significado. Existen 4 salidas en el driver, los pines OUT1 y OUT2 controlan al motor 1 siendo la salida 1 el terminal positivo y la salida 2 el terminal negativo, por otra parte, los pines OUT3 y OUT4 controlan al motor 2. Además, el módulo tiene 4 entradas distintas que permiten controlar los motores (2 para cada uno) además de dos jumpers para el control PWM de los motores correspondientes a los pines ENA y ENB. Estos jumpers si son desactivados (abiertos) permiten controlar la velocidad de giro del motor y tendrán que estar conectados a la placa Arduino para poder recibir la información del ciclo de trabajo. [46].

También presenta un pin para la tensión de alimentación Vcc, otro para conectarlo a tierra, y un último pin V_{lógico} cuyo terminal se debe encontrar entre 4.5 y 5.5V para que funcione la placa. Este último pin, puede actuar como entrada y como salida dependiendo del estado del jumper regulador. El jumper regulador es un regulador de voltaje que se encarga de suministrar la tensión necesaria en el pin V_{lógico}. Si el jumper regulador está conectado (cerrado), el pin se comporta como una salida, por el contrario, si el jumper regulador fuera retirado, el pin de tensión entonces se comportaría como una entrada de 5V que tendría que ser alimentada. Solo se debe retirar este jumper en los casos en los que la tensión de alimentación sea inferior a 5V o superior a 15V. En el caso de la conexión para controlar la microbomba de agua, el regulador deberá estar activado (jumper cerrado) ya que la bomba no necesita una alimentación mayor a 12V. Es por tanto que el pin V_{lógico} será una salida de 5V que será empleada para conectar los cables de alimentación de la bomba. [47].

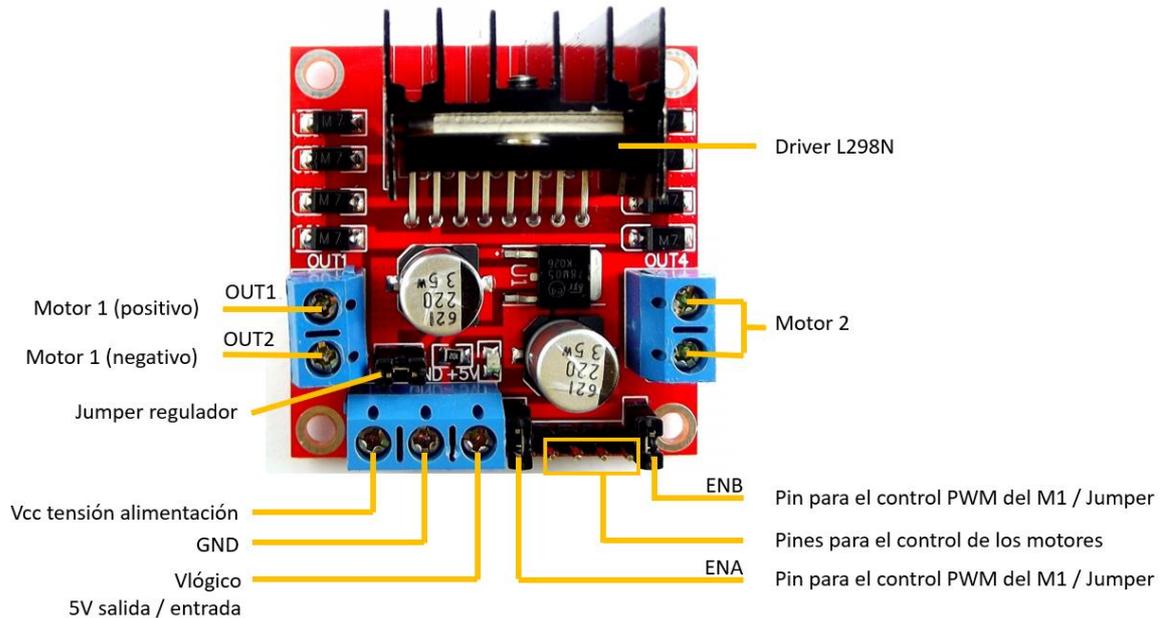
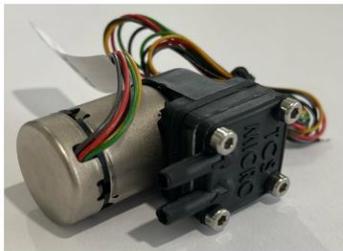


Figura 10. Módulo L298N.

Tras estudiar los componentes del driver, se debe de ver qué cables tiene la bomba y cuáles son sus conexiones adecuadas. La Figura 11 muestra la forma de conexión de cada cable. La bomba tiene 5 en total, uno con conexión opcional que en el caso de este proyecto no será utilizado, y otros 4 de conexión obligatoria. Los cables que se conectarán al módulo L298N son los siguientes:

- Cable negro. Es necesario conectarlo a tensión negativa y por eso será conectado al pin de salida del driver OUT2 ya que es el terminal negativo que controla el primer motor.
- Cable Gris. Es aquel que controla la velocidad del motor y debe ir conectado a pin con salida de tensión positiva OUT1.
- Cable rojo. Será conectado al pin de salida de 5V del driver ya que es el cable que debe ir conectado a la alimentación electrónica de la bomba. También se podría conectar al OUT1.

- Cable verde. Permite controlar el sentido de giro del motor. Si se conecta a tensión positiva, el motor girará en el sentido de las agujas del reloj. Por el contrario, si se conecta a tierra, el motor toma el sentido contrario a las agujas del reloj. Por especificaciones de la hoja de características e instrucciones de montaje, este cable irá conectado junto al cable gris al pin OUT1 del driver.



Wire Colour	Description	Connection	Status
Black	GRD The negative connection	-Ve	Required
Grey	VM Motor Power Supply	+Ve 3.0-6.0	Required
Red	Vcc Onboard Controller Supply Circuit	+Ve 3.0-6.0	Required
Green	CW/CCW Motor Rotation	+Ve 3.0-6.0	Required
Yellow	RPM Signal Wire	GND Vcc 4 pulse / revolution square wave signal	Optional

Figura 11. Descripciones de los cables de la bomba. [48].

Por último y tras haber estudiado la conexión de la bomba al módulo L298N, se realiza el esquema completo de conexión incluyendo todos los elementos necesarios para controlar la bomba.

La conexión entre el módulo L298N y Arduino es sencillo. Como se quiere controlar un único motor, Motor 1, habrá que conectar las entradas del módulo IN1 e IN2 a dos pines de Arduino cuales sea que serán declarados como salidas. En este caso, se conectarán a los pines 8 y 9 respectivamente. Adicionalmente, como se quiere controlar la velocidad del motor, el jumper en el pin ENA debe ser desactivado para permitir conectar este pin a la placa Arduino. Para este pin, la conexión a Arduino sí es importante ya que solo serán válidos los pines con entradas digitales marcados por el símbolo “~”, el pin elegido como salida será el 11.

Por último, se debe conectar la tensión electrónica. Para ello, se hará uso de una fuente de tensión que suministrará entre 6V y 8V y será regulada con el amperaje máximo que puede circular por la bomba que son 0,5A para que en caso de cortocircuito no se dañe ningún componente, en especial la bomba. El terminal negativo de la fuente de tensión se conectará a la tierra de la placa Arduino. Para que funcione todo el sistema electrónico y no se dañen

los componentes, todas las conexiones negativas deberán de estar conectadas a la misma tierra por lo que el pin GND del módulo en H también se conectará al pin GND de Arduino. Por otra parte, el terminador positivo de la fuente de tensión se conectará al pin Vcc del módulo L298N.

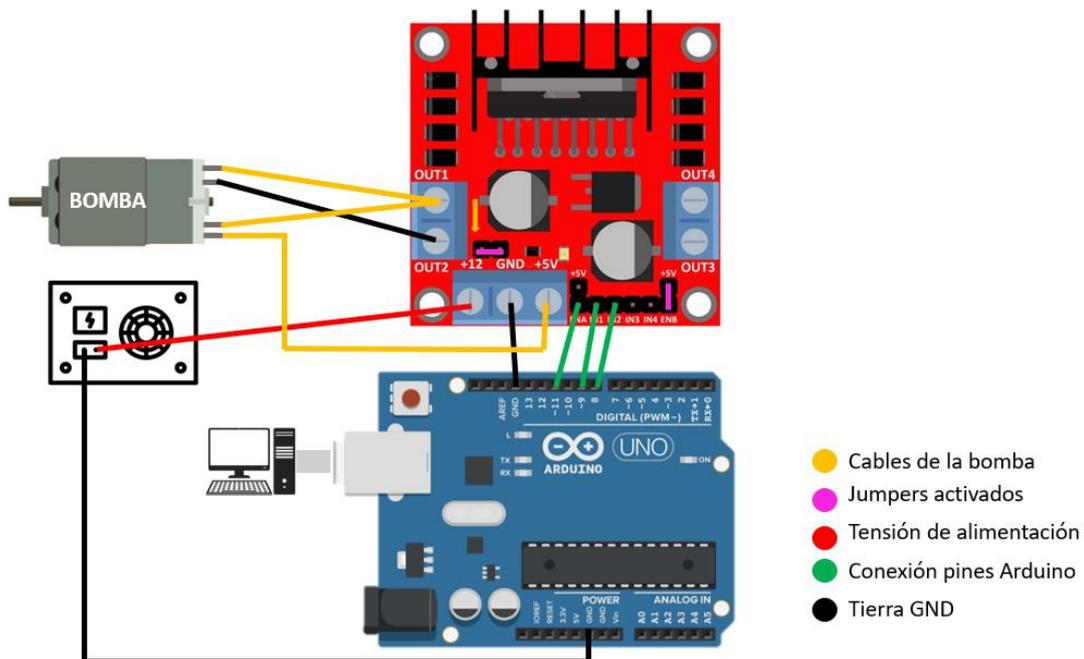


Figura 12. Conexión electrónica del control de la bomba.

3.3.1.3 Programación y parámetros

Como se ha presentado anteriormente, la bomba se controla con la señal que aporta el driver puente H y a su vez, la señal de salida del driver depende de las tensiones de salida de Arduino.

Arduino por su parte, permite enviar la información del ciclo de trabajo y la tensión de salida alta y baja al módulo. Para ello, se ha de programar y especificar el ciclo de trabajo que se quiere si queremos conseguir una tensión determinada. A su vez, la tensión será distinta en función del caudal que se quiera conseguir.

La información del ciclo de trabajo se la aporta al pin ENA del módulo L298N y lo que se envía es un valor entre 0 y 255 que controle la velocidad. Estos valores son los argumentos de la función lógica de Arduino que hay que programar y que equivale a un porcentaje de ciclo de trabajo y consecuentemente a un voltaje promedio y a un flujo de caudal. El código fuente que permite controlar la tensión de salida de Arduino se presenta en ANEXO I.

Es necesario convertir los flujos de caudal que se necesitan a argumentos de Arduino mediante la relación expresada en Ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4: Ciclo de trabajo [\%]} = \frac{\text{argumento Arduino del ciclo de trabajo}}{255}$$

El argumento en Arduino del ciclo de trabajo solo puede tomar valores de 0 a 255 de tal forma que se cumple:

- Argumento = 0 → ciclo de trabajo 0% → 0V de tensión de salida promedio
- Argumento = 255 → ciclo de trabajo 100% → 5V de tensión de salida promedio

Además, se debe de tener en cuenta que la resolución del Arduino es de 19,6mV lo que significa la mínima variación de voltaje que se puede lograr con una señal PWM con Arduino es de 19,6mV.

Teniendo en cuenta todo lo anterior y las especificaciones de la bomba que indican que para una alimentación de 6V el caudal que aporta es de 90ml/min, se han realizado unos ensayos para comprobar estos parámetros y poder obtener una tabla con los diferentes valores que hay que programar para obtener distintos flujos.

Se han tomado las medidas de la tensión de salida del módulo L298N a distintas tensiones de alimentación. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Argumento Arduino	Ciclo de trabajo real	Alimentación 6V	Alimentación 7,5V
255	100%	4,41	5,93
250	98%	4,36	5,87
240	94%	4,26	5,75
230	90%	4,16	5,59

220	86%	4,04	
210	82%	3,93	
200	78%	3,83	
180	71%	3,6	
170	67%	3,49	
150	59%	3,24	
130	51%	2,94	
100	39%	2,42	

Tabla 1. Tensiones de salida en función del ciclo de trabajo y de la alimentación.

Argumento Arduino	Ciclo de trabajo real	Tensión de salida	Flujo ml/min
255	100%	5,93	89,000
250	98%	5,87	87,479
240	94%	5,75	84,437
230	90%	5,59	80,381
220	86%	4,41	50,468
210	82%	4,36	49,201
200	78%	4,16	44,130
180	71%	4,04	41,088
170	67%	3,93	38,300
150	59%	3,83	35,765
130	51%	3,6	29,934
100	39%	3,49	27,146

Tabla 2. Flujos en función del ciclo de trabajo.

Es importante saber que, para hacer las simulaciones, el dato de entrada del irrigante no se aporta en términos de flujo sino en velocidades. Por lo tanto, hay que establecer la relación que permite pasar de flujo [ml/min] a velocidad [m/s].

Primero, se debe hacer un cambio de flujo másico [ml/min] a flujo volumétrico [m³/s].

$$\text{Ecuación 5. } \frac{1 \text{ ml}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \rightarrow 1 \left[\frac{\text{ml}}{\text{min}} \right] = \frac{1}{60000000} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

Después, mediante la relación de la Ecuación 6 se consigue pasar de flujo volumétrico a velocidad.

Ecuación 6. $Q = A \cdot v \left[\frac{m^3}{s} = m^2 \cdot \frac{m}{s} \right]$ siendo $A = A_{aguja} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$

3.3.2 CUBO CENTRAL

El bloque central de la bancada incluye un conjunto de piezas que permite conectar todas las partes de la bancada de ensayo. Este bloque central tiene por principales funciones sostener el cubo de ensayo con las distintas geometrías a ensayar, así como conducir el irrigante desde la bomba hasta los conductos radiculares preparados. Además, incluye la creación de un soporte para poder tomar las medidas necesarias de presión en los distintos puntos habilitados de las geometrías. El conjunto de los distintos elementos ha sido diseñado en Solidworks y se ha realizado su montaje en el mismo software para obtener un conjunto final.

El conjunto final del cubo central de la bancada se muestra en la Figura 14 y los elementos de esta se encuentran detallados en la Tabla 3. La bancada se puede dividir en varias partes, la sujeción central, el conjunto que hace posible la irrigación de las geometrías, el conjunto que mide la presión, distintos elementos que permiten movimientos relativos entre piezas y elementos de fijación de varias piezas para bloquear su movimiento.

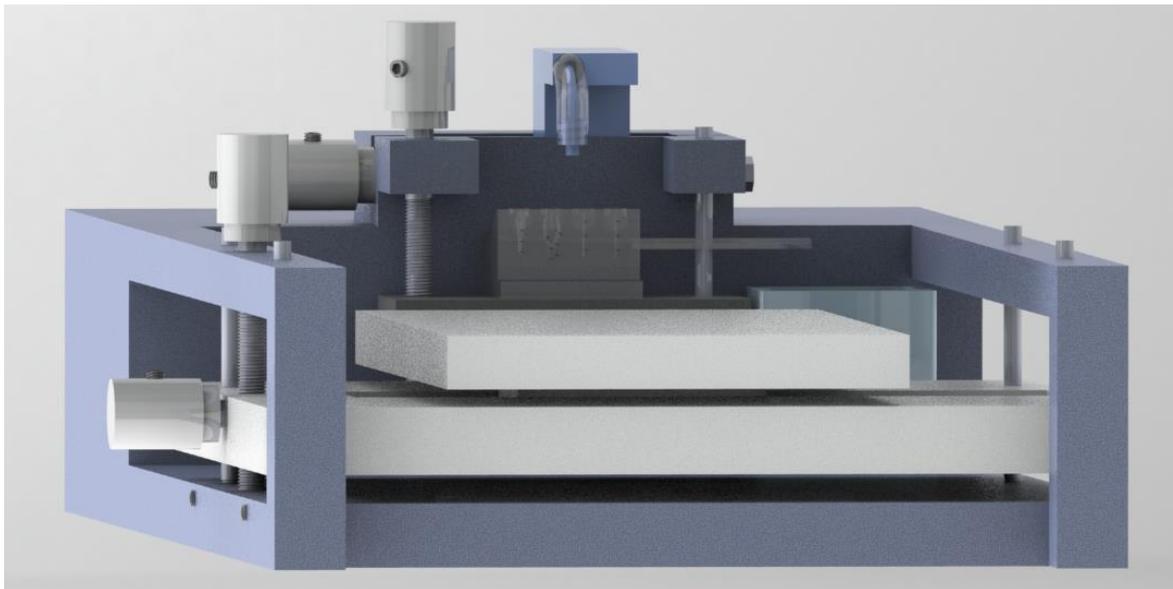


Figura 13. Vista frontal del cubo central de la bancada de ensayo.

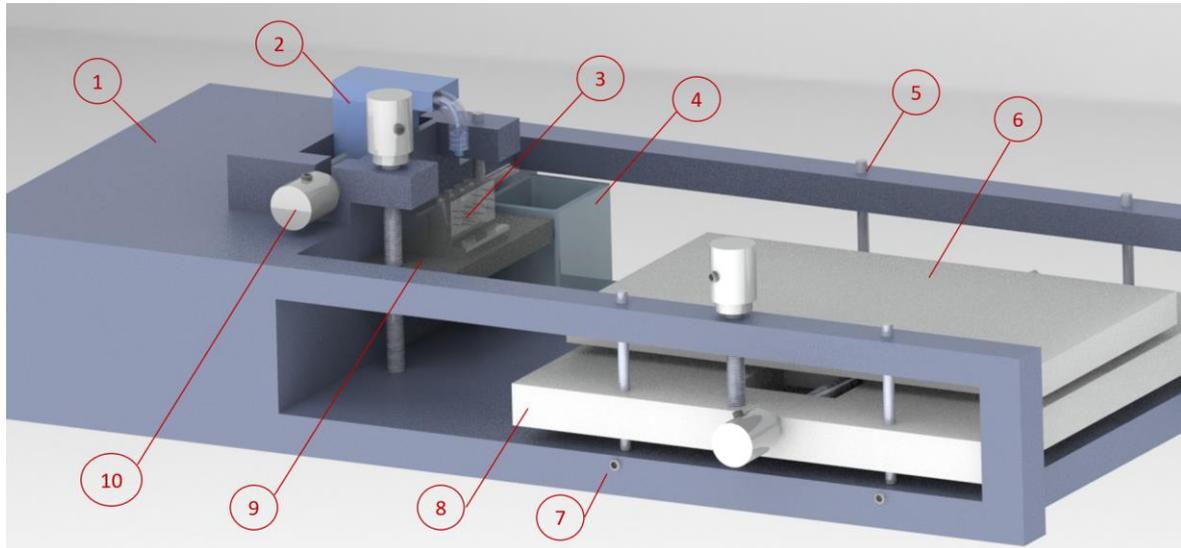


Figura 14. Cubo central con elementos numerados.

1	Soporte central
2	Soporte y adaptador de aguja
3	Cubo de impresión de ensayo con las geometrías
4	Recipiente para agua
5	Ejes de sujeción
6	Placa para protoboard 1
7	Tornillo prisionero
8	Placa para protoboard 2
9	Placa para cubo de ensayo
10	Conjunto pomo - varilla roscada

Tabla 3. Elementos de la bancada

3.3.2.1 Movimientos de las piezas

Para conseguir repetibilidad en los distintos ensayos, es muy importante que algunos de los elementos puedan moverse tanto vertical como horizontalmente respecto a otros. Además, como las dimensiones con las que se trabaja son muy pequeñas, el movimiento de las piezas debe ser controlado y preciso en cuando a distancias. Para realizar estos movimientos, se han considerado dos opciones posibles: guías lineales y el mecanismo tuerca-tornillo.

Para elegir el mejor método se ha tenido en cuenta la facilidad del mecanismo y del montaje y la adecuación a las medidas de la bancada de ensayo. Las guías lineales permiten el movimiento relativo entre dos piezas y este movimiento, según se coloque la guía, puede ser vertical u horizontal. Para los ensayos, además de necesitar ese movimiento, es imprescindible que, una vez elegida la posición final deseada, las piezas conectadas queden fijas en esa posición y no se muevan. Existen muchas guías lineales comerciales con variedad de longitudes, tamaños y distancias entre cada punto de bloqueo, de todas formas, aunque la precisión en el bloqueo sea muy exacta, la distancia entre esos puntos es mayor que la deseada. Se trata con geometrías cuyos elementos están separados pocos milímetros unas de otras y por ello la posibilidad de movimiento tiene que ser de ese orden de magnitud. Por su parte, el mecanismo tuerca-tornillo aunque es más simple y manual, permite cumplir con las condiciones necesarias ya que la distancia se puede ajustar mucho más.

Un mecanismo tuerca tornillo consiste en la transformación de un movimiento circular en otro rectilíneo. Si se hace girar un tornillo y se bloquea el movimiento de la tuerca, el tornillo se mueve longitudinalmente. Esta transformación también ocurre al contrario. Este simple sistema tiene la gran ventaja de que la distancia que se puede ir moviendo el elemento se puede ajustar a las medidas que se necesitan pues depende del paso que tenga la rosca del tornillo. El paso de la rosca será la distancia que se moverá la pieza deseada al hacer girar 360° el tornillo. Dada esta propiedad, la elección de este mecanismo resulta útil pues escogiendo una rosca con paso fino se puede conseguir un movimiento pequeño.

Este sistema se ha replicado utilizando una varilla roscada unida a un pomo para poder girarla y este conjunto unido a la pieza que se va a desplazar. El conjunto pomo-varilla solo

tendrá movimiento rotativo de tal forma que sus movimientos longitudinales estarán bloqueados. De esta forma, al dar vueltas al tornillo con ayuda del pomo, la pieza se desplazará. Para todos estos conjuntos se elige una rosca M8x1mm de tal forma que por cada vuelta que se le de al pomo, la pieza en cuestión se moverá 1mm de distancia. Este paso se ajusta a las dimensiones de cubo de ensayo pudiendo controlar como distancia mínima 0,5mm que correspondería a dar media vuelta al pomo. La varilla se comprará larga y sin roscar para poder ajustar la longitud deseada de diámetro 8mm. Además, se conseguirá roscar solo las longitudes específicas con una métrica M8x1mm y reducir tamaños de diámetro a las dimensiones deseadas en tratamientos mecánicos explicados en Parte I3.3.2.4. La pieza que se va a desplazar tendrá un agujero roscado de M8 por el que pasará la varilla roscada.

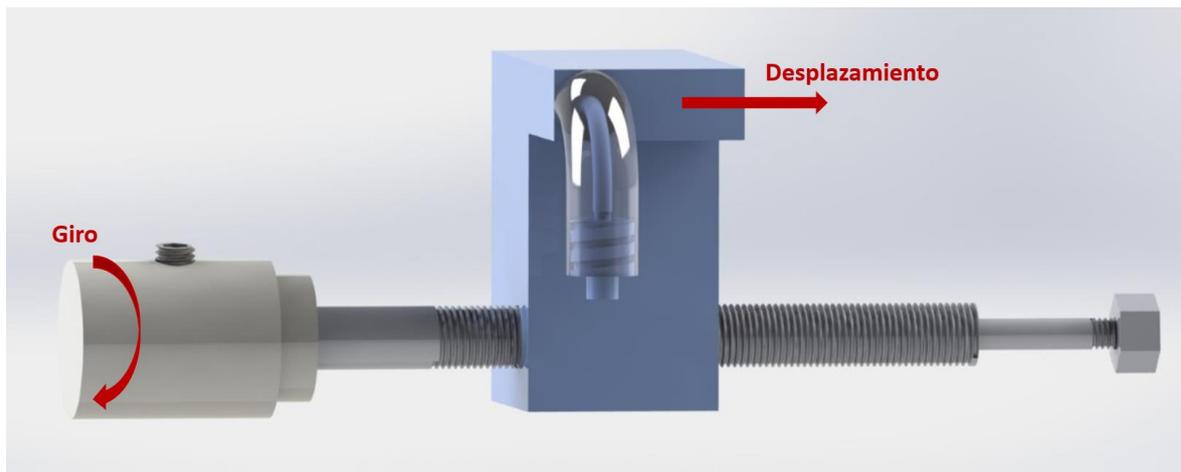


Figura 15. Representación del movimiento tuerca – tornillo.

El conjunto varilla roscada – pomo es bastante simple. La única función del pomo es ayudar a girar la varilla roscada ya que, al tener un diámetro pequeño, hacerlo manualmente dificulta el movimiento. El pomo consta de un cilindro con doble diámetro por estética y un agujero roscado en su interior para poder roscar la varilla cuyo extremo debe de estar roscado. Como se va a girar el conjunto desde el pomo, tiene sentido bloquear el giro relativo entre las dos piezas y esa función la realiza el tornillo prisionero que hay situado en el cabezal del pomo. Para que el tornillo pueda actuar, el pomo debe tener un agujero roscado en la dirección perpendicular al eje longitudinal que llegue hasta el agujero roscado. De esta forma, al apretar el tornillo prisionero, este entra en contacto con la varilla roscada.



Figura 16. Pomo

3.3.2.2 Parte 1: control del cubo de ensayo

La Figura 17. Primera parte del cubo central: control del cubo de ensayo. muestra la parte del cubo central encargado de transportar el agua hasta las agujas y poder manejar y controlar tanto el cubo de ensayos como el adaptador de la aguja. El líquido irrigante es transportado a través de unos tubos desde la salida de la bomba hasta el adaptador de aguja. Esa pieza permite colocar y descolocar las agujas necesarias con las que se van a irrigar las distintas geometrías. Las agujas inyectarán el líquido a cada una de las geometrías. Para conseguir ajustar las agujas en las posiciones correctas para irrigar cada una de las geometrías, se ha preparado un sistema mediante el adaptador de aguja puede moverse horizontalmente. Para el movimiento vertical del cubo de ensayo, se ha preparado una plataforma que sostenga ese cubo y que permita su movimiento vertical.

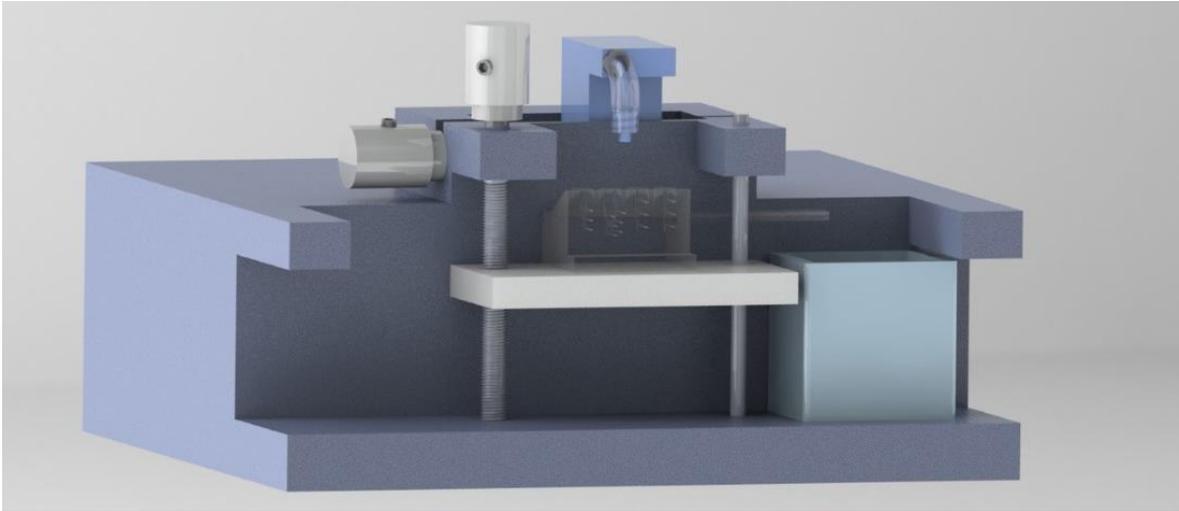


Figura 17. Primera parte del cubo central: control del cubo de ensayo.

En los ensayos, se pretende inundar la totalidad de cada cavidad por lo que se asume que parte del agua rebosará de las geometrías. Para controlar ese volumen de líquido, el cubo de impresión está preparado para desalojar el agua y así evitar el descontrol del agua. Como se muestra en Figura 18, el agua sobrante caerá debido a la inclinación del cubo hasta un pequeño conducto horizontal. El agua circulante por dicho conducto será almacenada en un recipiente de tal forma que no se produzca la pérdida del irrigante.

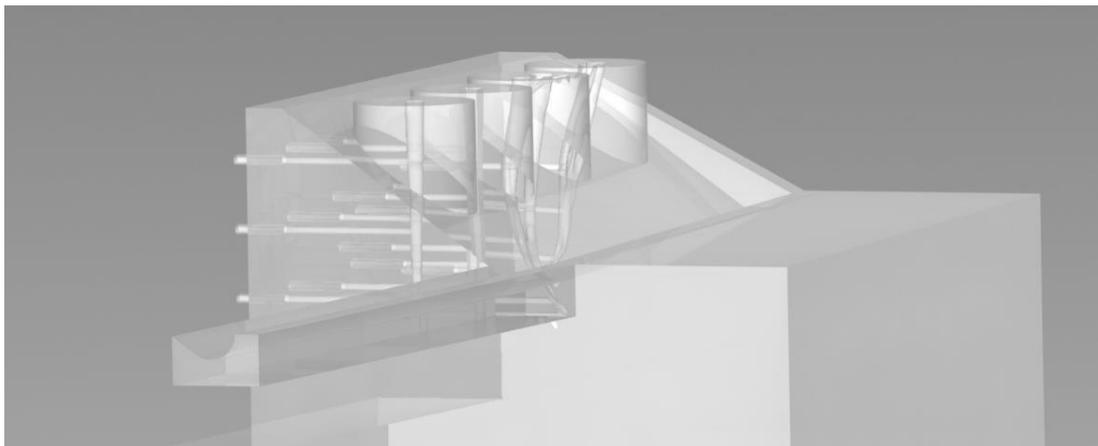


Figura 18. Cubo de ensayo con las geometrías.

En esta parte de la bancada, dos movimientos son necesarios: el movimiento vertical de la placa que sujeta el cubo de impresión y el movimiento horizontal del adaptador de aguja para poder inyectar el irrigante en las geometrías.

El movimiento vertical del cubo de ensayo se hace a través del movimiento de la placa que lo sostiene. A su vez, esa placa se moverá gracias al conjunto pomo-varilla roscada vertical que se muestra en Figura 17. La placa debe tener un agujero roscado para conseguir que, al girar el pomo, la placa suba o baje dependiendo de la dirección de giro. Además, para evitar problemas de flexión es necesario utilizar una guía lineal. Esta guía lineal se consigue con un eje vertical. Es importante también tener en cuenta que tanto el conjunto pomo-varilla como el eje que sirve de guía, deben estar fijos y sujetos para evitar su movimiento. Por una parte, el eje vertical tendrá que ser roscado en su parte posterior para poder encajarlo en un agujero roscado que se realice en el soporte principal de tal forma que este puede introducirse y retirarse gracias a su rosca y que, además, impide su movimiento longitudinal. Por su parte, el conjunto que permite el movimiento vertical de la placa, también debe ser introducido en el soporte, aunque esta vez el agujero no necesariamente tiene que ser roscado, pues el propio peso del pomo y la acción de la gravedad hace difícil que el conjunto se mueva para arriba. De todas formas, aunque como se acaba de explicar no sería necesario, para asegurar la posición fija del conjunto, se podría añadir un tornillo prisionero en la parte superior donde el conjunto se soporta en el soporte principal. En cambio, lo que sí se debe hacer es reducir el tamaño del diámetro de tal forma que la diferencia de diámetro de la varilla pueda apoyarse en el soporte central y así conseguir más estabilidad para el conjunto.

Para que la aguja incida sobre la superficie de las caras abiertas los conductos, es necesario ajustar horizontalmente la posición del adaptador de aguja. Se consigue con la transformación del movimiento circular del pomo en movimientos longitudinales del adaptador de agujas. Además, para impedir que el adaptador gire respecto al eje de su agujero roscado, es necesario incluir un eje que sirva como guía. Ese eje será igual que el vertical explicado anteriormente, una varilla de diámetro 5mm roscada en un extremo para permitir fijar su posición en el soporte principal. Por otra parte, la fijación del conjunto pomo-varilla en este caso cambia debido a que se encuentra en posición horizontal. Para poder mantener

la posición del conjunto fija, se debe alargar la varilla con un diámetro menor al de la rosca M4 sin roscar hasta que atravesase el soporte principal por completo, tras esta longitud, se debe roscar la varilla de forma que se pueda ajustar una tuerca. La función de la tuerca es impedir que el conjunto se desplace hacia la derecha y como la reducción de tamaño de diámetro restringe el movimiento hacia la derecha, el conjunto pomo-varilla queda correctamente ajustado al soporte principal.

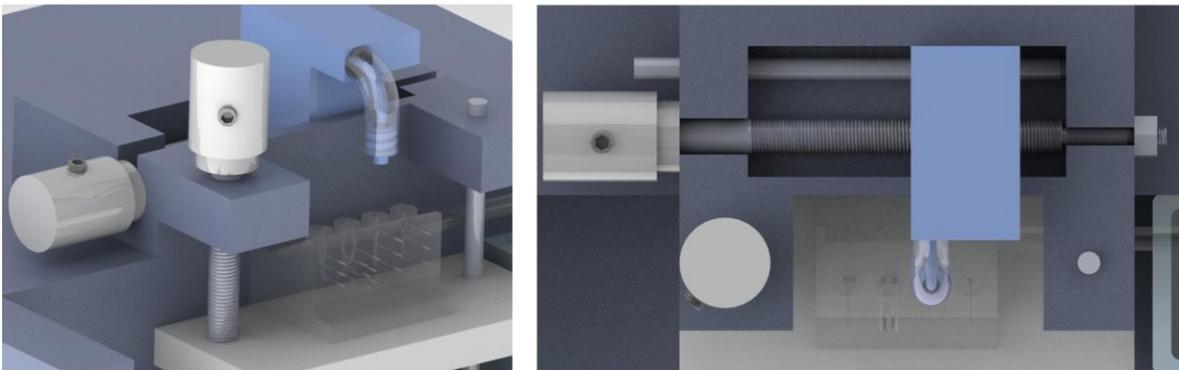


Figura 19. Detalle del adaptador de aguja y su conexión al soporte.

3.3.2.3 Parte 2: estructura para la medición de la presión

La segunda parte del bloque central de la bancada consiste en una estructura que sea capaz de sostener los elementos necesarios para medir las presiones. Las mediciones se van a hacer a través de sensores de presión que se unen a los conductos preparados en el cubo de impresión de ensayo mediante unos tubos que habrá que comprar. El sensor de presión necesita conectarse a una protoboard para poder obtener los resultados en el ordenador. Entonces, es preciso crear un soporte para esa placa. Adicionalmente, para evitar que las medidas tengan errores, se quiere conseguir que el sensor esté a la misma altura que la toma de presiones para evitar offsets y por eso el soporte que sujeta la protoboard tiene que poder desplazarse verticalmente. Por último, se debe tener en cuenta que hay distintas tomas de presión a distintas distancias horizontalmente y para evitar cambiar la conexión cada vez que se quiera cambiar la toma, será necesario también un movimiento horizontal. Para conseguir

esos dos movimientos se ha creado una estructura compuesta por dos placas distintas que se puede ver en la Figura 20.

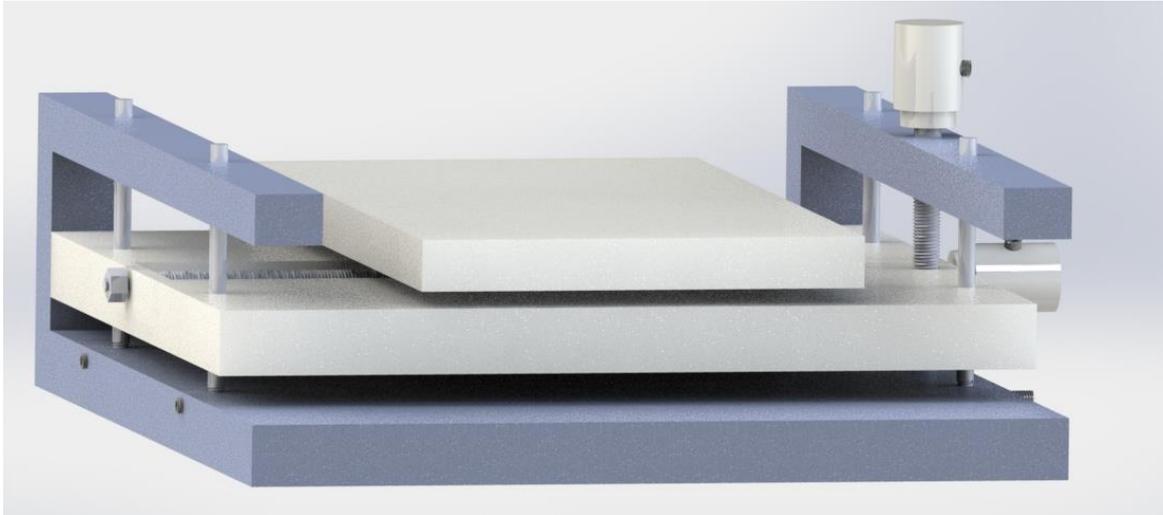


Figura 20. Segunda parte del cubo central: Estructura para la medición de la presión.

El movimiento horizontal se ha diseñado como un movimiento relativo entre las dos placas para protoboard. El movimiento es similar al de la pieza que sujeta las agujas. En este caso, el diseño de las placas es distinto, teniendo la inferior un hueco para poder encajar la placa superior que tiene una extrusión ajustada al tamaño del hueco. En la Figura 21 se muestra un corte de ambas placas para poder entender el diseño de las mismas. Para este movimiento relativo, no se necesita un eje que haga de guía entra ya que el ancho, el largo y la profundidad de unión entre ambas placas es suficiente para hacer que la placa de arriba no gire alrededor del eje de su agujero roscado. Además, la estabilidad aumenta al aumentar las dimensiones de las placas y asumiendo el peso de la protoboard con los instrumentos necesarios como los sensores y la placa Arduino.

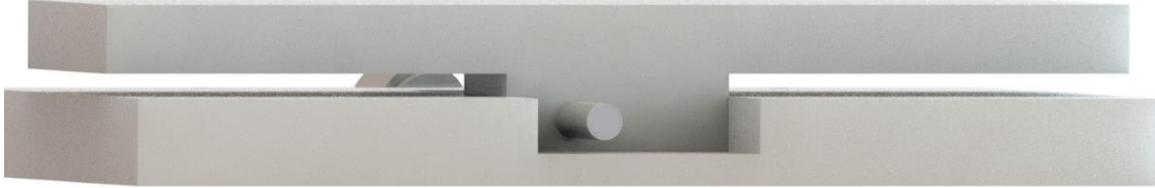


Figura 21. Corte ampliado de la unión de las dos placas para protoboard

El movimiento vertical se consigue entre el soporte principal y la placa para protoboard 2. La conexión es exactamente igual que el conjunto que permite el movimiento de la placa que soporta el cubo de impresión de ensayo. La diferencia en este caso es que se necesita más estructura para asegurar la estabilidad de todos los componentes. Para empezar, se necesitarán 4 ejes verticales que impidan la flexión de la estructura producida por el peso que ha de soportar la unión roscada entre la placa y el conjunto pomo-varilla. Tanto los ejes como la varilla roscada se deben bloquear con tornillos prisioneros en la parte inferior del soporte principal para evitar el pandeo. Para mejorar la estabilidad, el soporte principal también se ha diseñado de tal forma que las varillas atraviesen el mismo.



Figura 22. Sujeción de varillas.

3.3.2.4 Fabricación

Existen distintos métodos de fabricación que permiten realizar todos los elementos de esta parte de la bancada. En concreto, se ha estudiado la viabilidad de fabricar las piezas mediante arranque de material o mediante impresión 3D.

Los procesos de conformación por arranque de material consisten en obtener la pieza deseada a partir de un bloque de material del cual se va arrancando o cortando aquellos volúmenes de material sobrantes. Esta técnica de fabricación permite obtener piezas de gran

precisión, pero como desventajas obligan a tener la maquinaria suficiente como fresadoras, tornos o sierras para realizar las fases de mecanizado necesarias. Las principales desventajas que presenta este método de fabricación son la cantidad de material sobrante difícil de reciclar, limitaciones en las dimensiones y formas de las piezas debido a las limitaciones de la maquinaria y el superior coste que presenta frente a otras técnicas. En cuanto a materiales, la utilización de aluminios o cobras (materiales frecuentes en esta técnica) no serían los más apropiados ya que habría que realizar un post tratamiento de tipo anodizado o cromatizado para evitar la oxidación en las piezas ya que al estar en posible contacto con el agua pueden verse dañadas con el paso del tiempo. Es por esto que de elegirse esta técnica, habría que elegir mecanizar plásticos. Un posible plástico para utilizar es el Acetal polioximetileno también llamado POM o delrin ya que es un termoplástico fácil de mecanizar con dureza, estabilidad dimensional y apropiado para estar en contacto con el agua. [49][50].

La impresión 3D es una actual técnica de fabricación que permite convertir modelos digitales en objetivos sólidos dimensionales mediante la deposición de capas de material que se consolidan para formar el objeto final. Esta nueva tecnología permite realizar elementos y piezas de diversos tamaños y formas en distintos materiales con una buena calidad en cuanto a precisión. En cuanto a materiales se refiere, se pueden utilizar metales, resinas, plásticos etc. Los materiales estudiados para este proyecto son el ABS, las resinas para impresión SLA y el PETG. El ABS proporciona ligereza y buena resistencia material además de un bajo coste pero con la desventaja de que es sensible a la humedad. Como en los ensayos se va a tratar con agua, este material al ser muy poroso podría absorber el agua por lo que no es válido. La mejor opción entonces es imprimir en 3D con la técnica SLA (Estereolitografía). La tecnología SLA convierte una resina en un plástico sólido capa por capa. La mayor ventaja de utilizar esta técnica es que se consiguen piezas impermeables y se pueden utilizar diversos materiales con grandes propiedades mecánicas pero las resinas son mucho más costosas. Por último, el PETG es un filamento que se utiliza en la tecnología FDM y que une las características del ABS y el PLA y consigue así buena dureza, resistencia, facilidad de impresión, bajo coste y facilidad de mecanizado. Además, el PETG absorbe poca agua y humedad siempre prácticamente impermeable. Para poder elegir la técnica y el

material hay que estudiar la funcionalidad de las piezas que se quieren obtener para ver qué precisión necesitan y el coste que supone cada tecnología y cada materia prima. [53][54][55].

Para elegir el mejor método de fabricación y el más óptimo para fabricar la bancada se han dividido los elementos en dos grupos.

- Grupo 1: soporte principal, adaptador y soporte de aguja, placas y el cubo de impresión con las geometrías.
- Grupo 2: varillas roscadas, pomos, tuerca para fijar varilla y tornillos prisioneros.

Grupo1:

El primero grupo de elementos está compuesto por el bloque o soporte central, el adaptador de aguja y las distintas placas. Todos estos elementos serán fabricados mediante impresión 3D tras haber estudiado las distintas ventajas y desventajas de los distintos métodos de fabricación adaptados a estas piezas. En concreto, para el soporte principal, el adaptador de aguja y las placas se utilizará la tecnología FDM y el material escogido es el PETG tras hacer un análisis económico con distintos materiales en Capítulo 5. El cubo de impresión con las geometrías será impreso con la tecnología SLA.

El bloque que actúa como soporte central tiene un perfil irregular en cuanto a dimensiones se trata ya que se diferencia una zona más grande y voluminosa y otra mucho más fina y larga. Si se quisiera fabricar esta pieza por mecanizado, para evitar la pérdida de mucho material habría que dividir la pieza en las dos partes definidas anteriormente y que se muestran en distintos colores en la Figura 23. Con esta división, se conseguiría una fabricación más rápida, menos costosa y con menos material inservible y desechado. Pero, en cambio, obligaría a realizar una unión entre ambas piezas. Por una parte, una unión de soldadura no sería adecuada ni fiable debido a los finos espesores con los que se estaría trabajando ya que produciría cambios en las propiedades del material y produciría deformaciones que pueden afectar al soporte del resto de elementos. Por otra parte, unir las piezas mediante elementos mecánicos sería una opción válida, pero se tendría que hacer una

planificación de dicha unión. La mejor opción sería atornillar ambas partes, pero supondría un aumento en el coste final de producción que no sería necesario asumir si se utilizase la impresión 3D como técnica de fabricación. Además, la parte más voluminosa presenta una zona con distintos cortes y agujeros para colocar la pieza que soportará las agujas y conducirá los tubos de agua de la bomba. Aunque los distintos agujeros y secciones más delgadas se pudieran realizar por arranque de material con una fresadora, el tiempo de producción sería muy elevado. Por lo tanto, para evitar este aumento de costes, el aumento de tiempo y de planificación, se elige la tecnología aditiva para obtener la pieza final. Es importante notar, que para que la precisión de los agujeros roscados sea óptima, será mejor imprimir el bloque con agujeros normales y luego realizar los taladros roscados en un posterior mecanizado. Como el material a utilizar sería un filamento PETG, el mecanizado posterior es sencillo y no presentaría ningún problema.

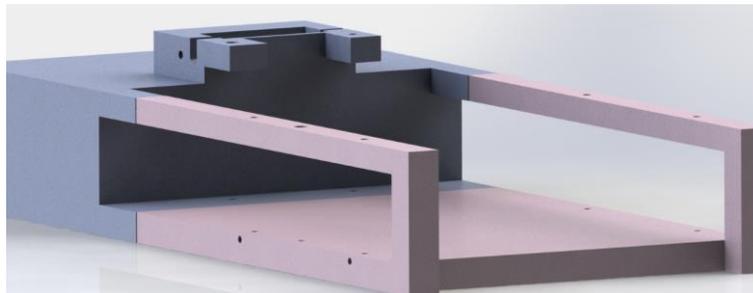


Figura 23. División del soporte principal.

Dentro de este grupo, se incluye también el adaptador de aguja. Esta pieza conviene también realizarla mediante impresión 3D debido a su forma tubular con un cambio de dirección redondeado en vez de formando un ángulo recto. Además, la impresión 3D permite conseguir el pequeño espesor del tubo con una precisión muy exacta.

Las placas por su parte, son las piezas más fáciles de fabricar por arranque de material pero puesto que el resto de piezas se van a realizar a través de la impresión 3D, conviene que esta parte sea del mismo material y así tienen la ventaja de ser más ligeras, ventaja que es necesaria ya que los mecanismos tuerca-tornillo que permiten mover verticalmente las placas tienen que soportar el peso que mueven (en este caso las propias placas más el cubo de impresión con las geometrías o el sistema de medición de la presión).

Por último, en este grupo también se incluye el cubo de ensayo con las geometrías en él. Este cubo debe ser transparente y su tecnología de impresión debe ser muy exacta. Es por esto mismo que para esta pieza en concreto no se va a utilizar la misma tecnología que para los elementos anteriores. La tecnología SLA ofrece una precisión muy elevada con formas complejas ya que el diámetro del láser que se encarga de solidificar la resina es muy pequeño. Además, las piezas se pueden fabricar con alturas de capa tan pequeñas como de 0,025mm. Por estas características, los modelos de aplicación dental con detalles se realizan con impresión SLA. [56].

Grupo2:

El segundo grupo de elementos incluye las varillas roscadas, los pomos para girar las varillas y los tornillos prisioneros. Para este grupo será necesario utilizar procesos de mecanizado de material para obtener las piezas finales completas. Para el caso de los pomos, se partirá de cilindros de acero inoxidable para su posterior mecanizado. En el caso de las varillas y los tornillos prisioneros, debido a su fácil y sencilla compra, se harán uso de elementos comerciales ya que son fáciles de comprar y baratos.

En la bancada, las varillas se utilizan con dos funciones distintas: como guías para que los elementos no giren y cómo varillas roscadas unidas a pomos para permitir los movimientos horizontales y verticales de las placas y la pieza porta aguja. Para ambos casos, las varillas se comprarán largas y del diámetro establecido para posteriormente cortarlas con cizallas manuales o cortavarillas para obtener las longitudes requeridas. En el caso de las varillas para permitir movimientos entre piezas, se deben de hacer uso de tornos que permitan reducir el tamaño del diámetro en los extremos de dichas varillas para poder encajarlas en el cubo central. Además, y, para terminar, ambos tipos de varillas se terminarán roscando la longitud necesaria con ayuda de unas terrajas o cojinetes roscados manuales. [58].

Los pomos diseñados son sencillos, se podrían comprar unos pomos ya comerciales, aunque habría que mecanizarlos y la diferencia de precio entre fabricarlos y comprarlos no son

considerables, por eso, se ha decidido fabricarlos a partir de cilindros pequeños de acero inoxidable. Partiendo de cilindros con un diámetro similar al mayor del pomo diseñado, se arrancará el material con un torno reduciendo el tamaño del diámetro en la longitud establecida. Además, se hará un agujero interior en dirección axial cuyo diámetro será en nominal de la rosca de las varillas roscadas con la herramienta de torneado de agujero interior. Por último, con ayuda de un macho de roscar o con una broca se realizará la rosca del taladro. Será necesario realizar un taladro roscado de igual forma que el anterior, pero en dirección perpendicular al eje axial del pomo. Este último agujero roscado será necesario para poder meter el tornillo prisionero que bloquea el giro relativo entre el pomo y la varilla roscada.

Por último, los tornillos prisioneros podrán ser comprados directamente ya que existe una gran variedad de tornillos de este tipo comerciales con distintas métricas y longitudes por lo que su obtención no presenta ninguna limitación. De la misma manera, la tuerca que servirá para sujetar la varilla roscada que permite el movimiento horizontal del adaptador de aguja se comprará.

3.3.3 TOMA DE MEDIDAS DE PRESIÓN

Como se ha explicado en la metodología del trabajo, una forma de verificar las simulaciones es tomar medidas de presión en los ensayos reales para después poder compararlas con las medidas que ofrecen los resultados de la simulación. El cubo de ensayos con las geometrías ya incluye unos tubos a las alturas específicas por cada geometría a los cuales se debe conectar algún instrumento de medida de presión.

3.3.3.1 Elección del instrumento de medida

Existen diversos instrumentos para medir la presión. Son todos ellos dispositivos que poseen en su interior un elemento que cambia de una manera determinada cuando se somete a una

presión. Ese cambio es registrado por el instrumento en una escala y es transmitido en una señal de salida. Los instrumentos estudiados para este proyecto son los manómetros y los sensores de presión.

Por un lado, los manómetros son aparatos que miden las presiones de fluidos tanto gases como líquidos. Tradicionalmente, son aparatos analógicos, aunque también existen digitales. Tras su estudio y comparación con los sensores de presión con consejos de expertos, se ha decidido utilizar sensores ya que van a ofrecer mejores resultados adaptándose a los ensayos.

Los sensores de presión son instrumentos de medidas compuestos por un elemento detector de la presión con el que se puede determinar las presiones reales que se aplican al sensor. Además, estos sensores convierten la información recibida en señales de salida. Utilizar un sensor de presión permite obtener una señal de salida no solo en un momento determinado, sino que se puede obtener en un periodo de tiempo y ver cómo la medida va variando.

Existen distintos tipos de sensores según el tipo de medida que obtienen. La presión que pueden medir puede ser absoluta, manométrica, relativa o diferencial. Los sensores que miden presiones absolutas miden la presión con respecto a una referencia cercana al vacío con presión nula. Los sensores de presión manométrica también llamados sensores de presión relativa, miden la presión en relación con la presión atmosférica presente. Los sensores de presión relativa normalizada miden de forma parecida a los manométricos pero en este caso, la referencia es una presión fija en vez de la atmosférica del momento de medición. Por último, los sensores de presión diferencial miden una diferencia entre dos presiones. [59].

Para este proyecto, la mejor opción es medir presiones absolutas o manométricas. Las presiones absolutas ofrecen la ventaja de medir siempre en relación con la misma referencia de vacío sin verse afectado por los cambios en las presiones atmosféricas. De todas formas, esa ventaja en el caso de este proyecto no es muy significativa y finalmente se ha escogido un sensor que mide presiones manométricas debido a el resto de las propiedades. Por lo tanto, las medidas obtenidas de los ensayos serán las presiones que hay en cada punto de las cavidades respecto de la atmosférica.

Para la elección del sensor, se han estudiado distintas variables. Lo más importante es la precisión que se puede obtener en las medidas para evitar errores. Esta depende tanto de la precisión del sensor como del rango de presiones que puede calcular ya que, para una misma precisión, un sensor que tenga un rango más amplio de presiones tendrá saltos de medidas más grandes que uno que tenga un rango inferior. Otro requerimiento es la tensión operativa del instrumento. Para poder utilizarlo simplemente con una placa Arduino en vez de necesitar una fuente de tensión adicional, el voltaje operativo del sensor no puede superar los 5V. Finalmente, se han impuesto la condición de que la salida sea digital en vez analógica, esta condición en realidad no es necesaria, pero se ha elegido así por comodidad a la hora de tomar los valores de presión.

El sensor elegido es del fabricante Honeywell. Es un sensor de presión manométrica que mide un rango de presiones de entre 0 hasta 6KPa. El voltaje operativo con el que funciona son 3.3V y la salida que ofrece es digital. Por último, la precisión que ofrece es del 0,25% lo que se traduce en un salto de presión de 15Pa entre cada medida que el sensor es capaz de medir.



Figura 24. Sensor de presión.

3.3.3.2 Conexión electrónica del sensor

El sensor presenta 6 pines diferentes:

- Pin 1: GND conexión al terminal negativo de alimentación
- Pin 2: VDD (tensión de alimentación positiva)
- Pin 3: Indicador de fin de conversión. Indica cuando la medición y cálculo está listo para ser enviado a la salida.
- Pin 4: significa “No connection” y no es necesario conectarlo ningún pin especial.
- Pin 5: SDA pin por el que se mueven los datos. Se conecta al pin habilitado en Arduino en la zona de pines digitales SDA.

- Pin 6: SLC señal de reloj que sincroniza el sistema. Se conecta al pin habilitado en Arduino en la zona de pines digitales SCL.

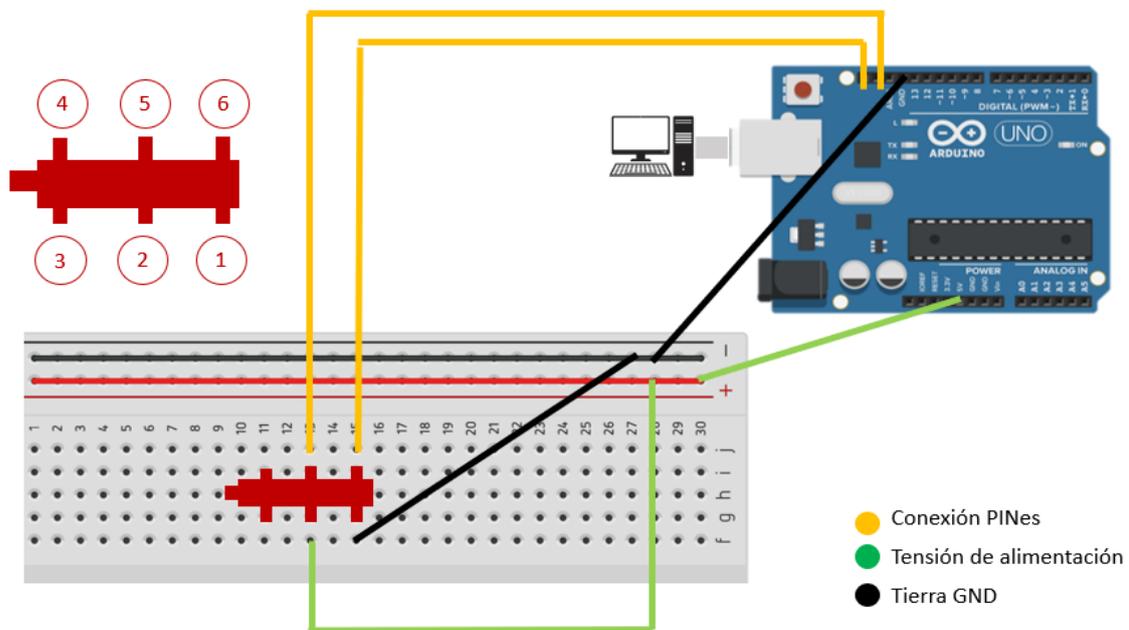


Figura 25. Esquema de conexión del sensor de presión con Arduino.

3.3.3.3 Conexión al cubo de ensayo

La conexión de los tubos ya preparados en el cubo de ensayo al sensor de presión se tiene que realizar a través de unos tubos de plástico comerciales que sea capaz de unir ambos puntos. Como el diámetro de las tomas de medidas es menor al diámetro del sensor de presión, se tiene que diseñar un elemento que haga de empalme entre el tubo que se conectará a las tomas de presión y el tubo que se conectará al sensor.

La Figura 26 muestra la pieza que hará posible el empalme entre ambos tubos. Como la pieza es pequeña y la geometría no es compleja, se fabricará en impresión 3D con la tecnología FDM en un material PETG siguiendo el mismo proceso que los elementos del cubo central explicados anteriormente.



Figura 26. Pieza empalme para medidas de presión

Capítulo 4. ENSAYO COMPUTACIONAL

La dinámica de fluidos estudia los fluidos en movimiento. Las ecuaciones que describen el movimiento del fluido pueden ser muy complejas y por eso la simulación permite evitar hacer los cálculos complejos matemáticos y obtener resultados de manera más rápida que dichos cálculos y menos costosa que los ensayos experimentales con prototipos caros. Las simulaciones hoy en día toman un papel importante en la industria ya que ofrecen resultados de manera mucho más rápida y segura sin fallos humanos. En el caso concreto de este proyecto, además se estudiará si efectivamente como recoge la literatura hacer los ensayos computacionales conlleva un coste menor.

4.1 DEFINICIÓN DEL ENSAYO

Las simulaciones son herramientas potentes que permiten predecir comportamientos sin necesidad de realizarlos experimentalmente. En concreto, la dinámica de fluidos computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics) implica el análisis de sistemas relacionados con el flujo de fluidos, la transferencia de calor y otros fenómenos asociados con los fluidos por medio de simulaciones computacionales. [61].

La utilización de la CFD en este proyecto resulta muy interesante pues, con ella, se va a comprobar que no es necesario realizar prototipos reales y pruebas experimentales físicas costosas para poder obtener resultados y conclusiones. Se van a ensayar las mismas geometrías que en los ensayos experimentales simulando la acción de la irrigación y dejando para futuras investigaciones y proyectos la parte de activación.

4.2 METODOLOGÍA

Se van a ensayar dos geometrías distintas:

- Geometría 1: Istmo Apical.
- Geometría 2: Delta.



Figura 27. Geometría 1.



Figura 28. Geometría 2.

Para llevar a cabo las simulaciones, primero se deben preparar las geometrías a ensayar. Partiendo de los conductos ya diseñados, se debe crear en solidworks las agujas utilizadas. Las agujas son comerciales y su nombre es Endodontic irrigation syringe with needle, son de tipo notched con una longitud total de 3,2mm , un diámetro exterior de 0,406mm y diámetro interior 0,47mm. Posteriormente, es necesario crear un ensamblaje introduciendo la aguja en el canal lo más profundo posible. La medida exacta para ubicar el final de la aguja es a una distancia de 2mm respecto del final del conducto, aunque debido a la complicada geometría de la cavidad y teniendo en cuenta que las agujas son rectas y fijas, esta distancia ha variado. Concretamente, para la primera geometría, la aguja se ha insertado a una distancia de 3,5 mm y para la segunda una de 3mm.

Una vez generados los dos conjuntos, se procede a realizar la simulación en el entorno ANSYS Fluent. El proceso consta de varias etapas. Primero, se debe definir la geometría, posteriormente, definir una malla que se ajuste a la geometría real lo máximo posible y por último, definir unos parámetros de configuración para poder inicializar la simulación. Esta simulación debe de converger para que sea válida y posteriormente poder analizar los resultados de la misma.

4.2.1 GEOMETRÍAS

Se parte de un ensamblaje de solidworks el cual está formado por la geometría del canal dental y por la aguja introducida en el canal.

Para tratar con los elementos del ensamblaje, se utiliza el DesingModeler que ofrece ANSYS ya que es un buen editor para operar con los distintos cuerpos. El editor permite operar con sólidos a través de la creación de operadores booleanos. En los casos que proceden, se han realizado operaciones de sustracción en las cuales se han sustraído las agujas de los canales dentales. De este modo, se han definido como “Target body” los canales dentales (geometrías a la que se le van a sustraer otro cuerpo) y como “Tool body” las agujas.

4.2.2 MALLADO

Tras definir las geometrías en el entorno ANSYS, se han definido distintas mallas.

El proceso de mallado consiste en subdividir la geometría inicial en distintos elementos finitos de tal forma que se defina de forma discreta un recinto continuo. Las mallas pueden estar formadas por elementos cuadriláteros, hexaédricos, triangulares, tetraédricos o una combinación de ambos. Se han utilizado mallas triangulares y tetraédricas ya que, según la literatura, estas geometrías suelen ser más apropiadas para geometrías complejas de tal forma que requieren menos celdas para crear la malla. Este tipo de mallas se denominan mallas de tipo no estructuradas y se caracterizan por tener una conectividad irregular. [62].

La calidad de la malla desempeña un papel importante en la precisión y estabilidad del cálculo numérico de la simulación y hay varios factores que se pueden tener en cuenta para mejorar esta calidad. La densidad y distribución de los nodos, la relación de aspecto, la suavidad y asimetría son algunas propiedades asociadas con la calidad de la malla. [63] [64].

Por una parte, ANSYS permite en sus configuraciones seleccionar como preferencia física la CFD (Dinámica de fluidos computacional) y será necesario hacerlo ya que el software va a adaptarse a valores predeterminados más lógicos en el proceso de mallado para conseguir una mejor precisión de la solución.

Por otra parte, hay ciertos parámetros que ofrecen una aproximación de la calidad de la malla. Para realizar estos ensayos se va a prestar especial atención al número de elementos totales que forman la malla y a el parámetro de oblicuidad (skewness).

La oblicuidad es un parámetro de deformación que mide la distorsión angular. Ofrece una idea de cómo de deformadas están las celdas de las mallas basándose en los ángulos máximos y mínimos formados por las esquinas. [65]. Este parámetro, se mide en una escala con valor mínimo 0 y valor máximo 1 indicando la mayor calidad para un valor 0. Para considerar una buena calidad de malla, el valor máximo de la oblicuidad no debe ser mayor a 0,9 y la mayoría de los elementos que la forman deben de centrarse en la parte inferior de la escala siendo su valor medio menor de 0,33 para mallas triangulares o tetraédricas.

Por otra parte, el número de elementos que forman la malla es otro de los valores que aportan un valor de la precisión de la malla. Cuantos más elementos formen la malla, esta será mejor ya que se adaptará mejor a la geometría, pero, un número muy alto de elementos finitos conlleva un coste computacional muy alto. Una malla con muchos elementos puede dificultar la simulación y hacer que esta no solo sea más lenta, sino que pueda dar problemas. Además, es importante notar que, a partir de cierto número de elementos, el grado de mejora de la malla aumenta muy poco comparado con el aumento del coste computacional. [66]. Por el contrario, una malla con pocos elementos supondría una simulación inválida ya que no se adaptaría bien a la geometría.

Para este proyecto, es necesario realizar un balance entre el coste computacional y la calidad de la malla para obtener una simulación precisa. Esto quiere decir que se quiere conseguir una simulación que no presente un gran coste computacional pero que sea precisa. Para conseguir este objetivo, se han generado distintas mallas, concretamente 3 por cada geometría para posteriormente poder hacer un análisis de sensibilidad. Las tres mallas creadas serán hechas en función del número de elementos para controlar el coste computacional y de simulación de tal forma que una de ellas tendrá menor número de elementos y por tanto se entiende que es peor, otra tendrá un número muy alto de elementos y la tercera tendrá una medida intermedia. Para poder crear esos tres tipos de malla, se han

utilizado distintas técnicas de mallado y se han estudiado y ajustado distintos parámetros como el tamaño máximo de los elementos, la función de tamaño de curvatura y tamaño mínimo de proximidad.

Para empezar a mallar, se han realizado distintos “Sizing” ya que no todas las zonas de la geometría necesitan los mismos parámetros. Esta opción de ANSYS, permite mallar de manera distinta los elementos de un cuerpo seleccionado, una cara, elementos cercanos a un vértice etc. Se ha mallado de manera distinta la zona superior de las geometrías puesto que, en la simulación, esa zona es la menos importante para la toma de datos que se pretende obtener. Como ya se recoge en la literatura, el problema de la aparición de burbujas de aire se produce en el tercio apical por lo que esa parte se ha mallado con elementos más pequeños y una mejor precisión. Por lo tanto, se ha utilizado la herramienta “Sizing” para la zona superior de la geometría con una malla ligeramente más brusca siendo sus elementos los de mayor tamaño. En la Figura 29 se ve la división de los cuerpos en las distintas zonas de mallado.

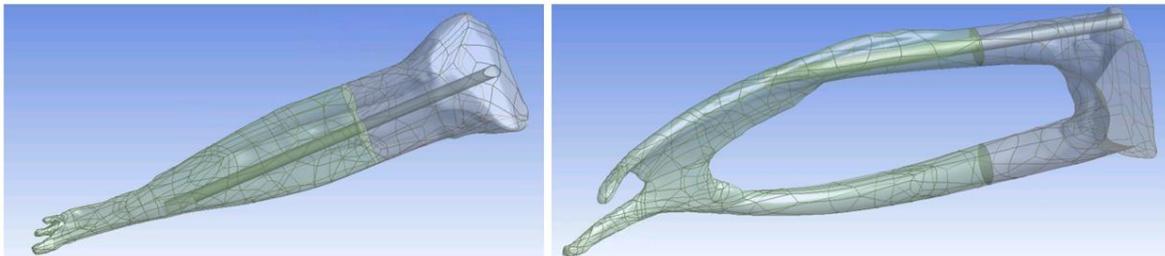


Figura 29. División de las geometrías para distintas zonas de malla.

Además, la herramienta de dimensionado “Sizing” se ha utilizado para controlar aquellos elementos de la malla que tenían un valor muy alto de oblicuidad y que por lo tanto desmejoraban la calidad de la malla total. Esta herramienta ha permitido ajustar el tamaño de esos elementos incrementándolos y también ajustando los parámetros de tamaño de curvatura y tamaño mínimo de proximidad.

Para ajustar las 3 mallas a las necesidades de cada una, uno de los parámetros que se han modificado ha sido el tamaño de los elementos que componen la malla. En concreto, se ha

modificado tanto el tamaño máximo que puede tener un elemento como el tamaño medio de los mismos. Para las mallas más bruscas ambos parámetros tienen un valor mayor y además, al aumentar el tamaño máximo de las celdas, se ha podido ajustar también el tamaño medio de la parte superior de las geometrías a un valor cercano a él.

Otro de los parámetros estudiados y modificados ha sido el tamaño mínimo de curvatura. Esta función permite que los elementos de la malla se estructuren de acuerdo con la curvatura de las entidades sin modificarla. Como la geometría tratada tiene muchas características de curvatura y entidades curvas, para obtener una buena calidad de malla, hay que ajustar la función de dimensionamiento en términos de curvatura. Cuanto mayor sea el parámetro “curvature min size”, más se ajustarán los elementos de la malla a la geometría inicial y, además, más elementos tendrá la malla para conseguir esa precisión. [67]. Es por esto que para la malla más precisa (con más elementos) se ha aumentado este parámetro respecto de las otras mallas.

Por último, también se ha estudiado el tamaño mínimo de proximidad. Este parámetro ajusta y define las capas mínimas de elementos existentes en las geometrías con huecos. Sirve para obtener más precisión de manera que si existe un hueco volumétrico interno o un área entre dos caras opuestas, se puede definir el número de capas de elementos en esas caras. Es útil por lo tanto en regiones con muchas aristas o con muchas regiones con diversas superficies. El tamaño mínimo de proximidad introduce un tamaño mínimo de elementos que serán utilizados en los cálculos de proximidad para ajustar las caras y huecos. [68]. [69].

4.2.3 SETUPS

Antes de inicializar la simulación, se deben definir unos parámetros que constituyen las configuraciones finales. Entre ellos se incluyen el modelo matemático que se va a utilizar para resolver el problema, el tipo de simulación en cuanto al tiempo, los materiales (fluidos y gases), condiciones de contorno y valores de inicialización.

4.2.3.1 Configuraciones generales

Como configuraciones generales, se debe elegir el tipo de solucionador para la simulación del flujo. ANSYS ofrece dos solucionadores, uno basado en la presión y otro en la densidad. Por una parte, el solucionador basado en la densidad se diseñó originalmente para flujos compresibles de alta velocidad, supersónicos. Este solucionador resuelve las ecuaciones de continuidad, momentos, energía y transporte simultáneamente. Por otra parte, el solucionador basado en la presión se originó para flujos incompresibles y ligeramente compresibles con velocidades más pequeñas que los flujos utilizados en el solucionador basado en densidad. Si bien es cierto que actualmente los modelos han evolucionado y ambos solucionadores son perfectamente aplicables a diversos flujos de distintos tipos, el solucionador basado en la densidad ofrece una mayor precisión para los flujos compresibles supersónicos. Este último caso no es el que se presenta en el proyecto y por eso no es necesario utilizarlo. Se elige entonces el solucionador basado en la presión ya que sirve para el flujo incompresible subsónico que se presenta.

El solucionador basado en presión utiliza un algoritmo que pertenece a la clase de métodos de proyección que consiguen la restricción de la conservación de la masa (continuidad) del campo de velocidad resolviendo una ecuación de presión. Esta ecuación de presión deriva de las ecuaciones de continuidad y de momento de tal forma que el campo de velocidad satisface la continuidad gracias a la corrección de presión. Como las ecuaciones no son lineales y están acopladas entre sí, la solución se realizará a través de iteraciones en las que el conjunto global de ecuaciones se resuelve repetidamente hasta que la solución converja. [70].

Otro de los parámetros a elegir para la solución de la simulación es el tiempo. Se debe seleccionar si la simulación se va a realizar en estado estacionario o en estado transitorio. Una simulación en estado estacionario calcula la solución desarrollada que no varía con el tiempo y se calculan los valores medios. Estos modelos, se basan en la suposición de que las condiciones de flujo y las propiedades del sistema entero son constantes en el tiempo. Por su parte, la simulación transitoria va calculando los valores instantáneos en cada momento computacionalmente, permite conocer cómo es el comportamiento del flujo durante el

escenario de la irrigación. Estos modelos trabajan con condiciones que cambian a lo largo del tiempo hasta alcanzar un régimen permanente. Por esto, como la irrigación es un escenario dinámico, se necesita utilizar una simulación transitoria pues en el caso de utilizar un tiempo estacionario, los resultados de la simulación aportarían un paso de tiempo, pero para este proyecto es interesante observar qué es lo que sucede en los distintos puntos a lo largo del proceso de irrigación. [72].

Po último, se debe agregar la acción de la gravedad. La gravedad que ofrece ANSYS no es muy fiable y a veces produce problemas, pero esto ocurre en las simulaciones de activación. Para las que se van a ejecutar en este proyecto de irrigación no supone ningún problema. Se debe entonces asignar el valor $9,81 \text{ m/s}^2$ en la dirección correcta, en este caso la del eje Y en sentido negativo.

4.2.3.2 Modelo

Otra de las configuraciones importantes es la elección del modelo que debe seguir la simulación. Se ha elegido un modelo viscoso SST-k-omega con opción de corrección de curvatura activada. Según la literatura, [73], el modelo viscoso SST k-omega para flujos turbulentos es el mejor modelo para simular los casos de irrigación de conductos radiculares. Este modelo CFD está basado en el transporte de tensión de cizallamiento dentro del modelo k-omega que pertenece a la familia de modelos RANS (Reynolds-averaged Navier-Stocks equations) de turbulencia. Se utiliza para flujos con un bajo número de Reynolds en los que la capa límite es relativamente gruesa y la subcapa viscosa puede resolverse por lo que es adecuado para tratar el flujo cercano a las paredes. En caso de la irrigación esto es necesario ya que es interesante observar cómo se comporta el fluido irrigante sobre las paredes de los canales dentales. [74].

En concreto, el tipo SST proporciona una predicción de la separación del flujo más precisa que otros modelos RANS además de ofrecer un buen comportamiento del transporte del esfuerzo cortante principal en las capas límite con gradientes de presión adversos. Lo hace

combinando la formulación k-omega y la k-epsilon. Por una parte, utiliza la formulación k-epsilon en la corriente libre para evitar los problemas que ofrece el modelo k-omega al ser sensible a las propiedades de turbulencia en la corriente libre de entrada. Por otra parte, utiliza la formulación k-omega en las partes internas de la capa límite que hace que el modelo pueda utilizarse hasta la pared a través de la subcapa viscosa sin necesidad de añadir funciones de amortiguamiento adicionales. Por último, ofrece la ventaja de tener una buena relación entre precisión y coste computacional. [75].

Además, como opción adicional, se utilizará la corrección de curvatura ya que en anteriores simulaciones realizadas en la Escuela de Ingeniería ICAI se han conseguido mejores resultados activando esta opción.

4.2.3.3 Condiciones de contorno

Los siguientes parámetros que hay que definir antes de arrancar la simulación son las condiciones de contorno. Se debe especificar la cara por la que se realiza la entrada del irrigante y la velocidad de entrada del agua. Por otra parte, se especificará con valor de 0 Pa la presión manométrica de la superficie en contacto con la atmósfera.

4.2.3.4 Inicialización de la simulación

Por último, habrá que inicializar la simulación y determinar los parámetros de duración de la misma. Se elegirá inicio de la simulación la entrada del agua para optimizar el tiempo de simulación y hacer que este sea más corto. Las simulaciones son más rápidas si se inician desde el cálculo más complejo, y este se da en el punto donde más datos numéricos haya.

El proceso de solución implica la resolución de las ecuaciones de gobierno reiteradas veces hasta que la solución converja. Se debe definir el paso de tiempo el número de pasos y el número de iteraciones que se realizan en cada paso.

El paso de tiempo que se define depende de la malla y de las velocidades, es decir, el paso de tiempo debe ser capaz de resolver el flujo en la celda más pequeña. [72]. Según las condiciones de Courant-Friedrichs-Léwi para la convergencia de las simulaciones, el tamaño del paso de tiempo está limitado en cuanto una onda de tensión no puede viajar más allá de la longitud característica del elemento más pequeño en un solo paso de tiempo. [77]. Se puede expresar esta relación en una inecuación.

$$\text{Ecuación 7: } \text{paso de tiempo [s]} \leq \frac{\text{mínimo tamaño de los elementos de la malla [m]}}{\text{velocidad característica } \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}$$

El número de pasos de tiempo depende de la duración de la simulación (tiempo de flujo requerido). Según la literatura, el tiempo de la simulación más adecuado para simulaciones de irrigación es de 0,6 segundos. [76].

$$\text{Ecuación 8: } \text{número de pasos de tiempo} = \frac{\text{tiempo total de la simulación [s]}}{\text{paso de tiempo [s]}}$$

El número de iteraciones necesarias depende de la rapidez con que converja la solución. Con pasos de tiempo más pequeños, se necesita un menor número de iteraciones, pero hay que ejecutar un mayor número de pasos de tiempo de cualquier manera. Empezar con un número pequeño de pasos de tiempo, pero con muchas iteraciones permite ver cuántas iteraciones totales son necesarias y así ajustar las iteraciones a el número de pasos de tiempo requerido.

4.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA MALLAS

Se ha de realizar un análisis de sensibilidad para poder dar como válida la malla y poder extrapolar los resultados. La finalidad del análisis es poder realizar los ensayos con una malla menos precisa pero cuyo coste computaciones sea más bajo.

Para cada geometría, se van a realizar 3 mallas distintas partiendo de una malla más basta, grande y con pocos elementos y mejorándola hasta alcanzar una malla con una precisión grande pero muy pesada con muchos elementos.

Para hacer el análisis, tras haber generado todas las mallas, se va a hacer la misma simulación para las tres y se cogerá un punto para medir el resultado de la presión. Los tres valores de presión se van a comparar y si sus valores no tienen una dispersión de más del 5%, se darán las mallas como válidas. Una vez verificadas las mallas, se cogerá la intermedia (coste y precisión medias) para hacer los ensayos finales.

4.3.1 GEOMETRÍA 1:

La Tabla 4 muestra los parámetros más importantes que definen la calidad de las tres mallas. Como era de esperar, la malla que más elementos tiene es la que tiene un menor valor de máximo skewness lo que quiere decir que es la mejor malla en cuanto a calidad se refiere.

Geometría 1			
Malla	Nº elementos	Average Skewness	Max Skewness
Malla 1	547859	0,236	0,973
Malla 2	718976	0,234	0,952
Malla 3	998215	0,235	0,847

Tabla 4. Comparación de mallas para la Geometría 1.

Para poder hacer el análisis de sensibilidad, se ha realizado el mismo ensayo con los mismos parámetros en las tres mallas y se ha recogido el valor de la máxima presión relativa y absoluta. Como muestra la Tabla 5, la dispersión entre las medidas es menor a un 5% por lo que se puede concluir que las mallas son válidas.

Malla	Presión absoluta [Pa]	Presión relativa total [Pa]
Malla 1	111561,10	38533,15
Malla 2	112468,60	38683,40
Malla 3	123349,80	38739,69

Tabla 5. Comparación de la presión para la Geometría 1.

4.3.2 GEOMETRÍA 2:

De igual forma que se han realizado con la primera geometría, se han creado las tres mallas que van a permitir realizar el análisis de sensibilidad.

Geometría 2			
Malla	Nº elementos	Average Skewness	Max Skewness
Malla 1	329578	0,233	0,937
Malla 2	529126	0,233	0,845
Malla 3	908014	0,233	0,785

Tabla 6. Comparación de mallas para la Geometría 2.

Como muestran los resultados del análisis de sensibilidad, las mallas son válidas por tener una dispersión de menos del 5%.

Malla	Presión absoluta [Pa]	Presión relativa total [Pa]
Malla 1	135089,50	53181,75
Malla 2	161034,50	55655,93
Malla 3	160450,60	54773,45

Tabla 7. Comparación de la presión para la Geometría 2.

4.4 RESULTADOS

4.4.1 GEOMETRÍA 1:

Las simulaciones se han realizado siguiendo como método de solución el modelo viscoso SST-k-omega con opción de corrección de curvatura con un paso de tiempo de 0.0002 segundos. La velocidad de entrada del agua se ha establecido en 1.33m/s. Se ha conseguido una solución que converge con errores residuales de valor menor a 1e-02.

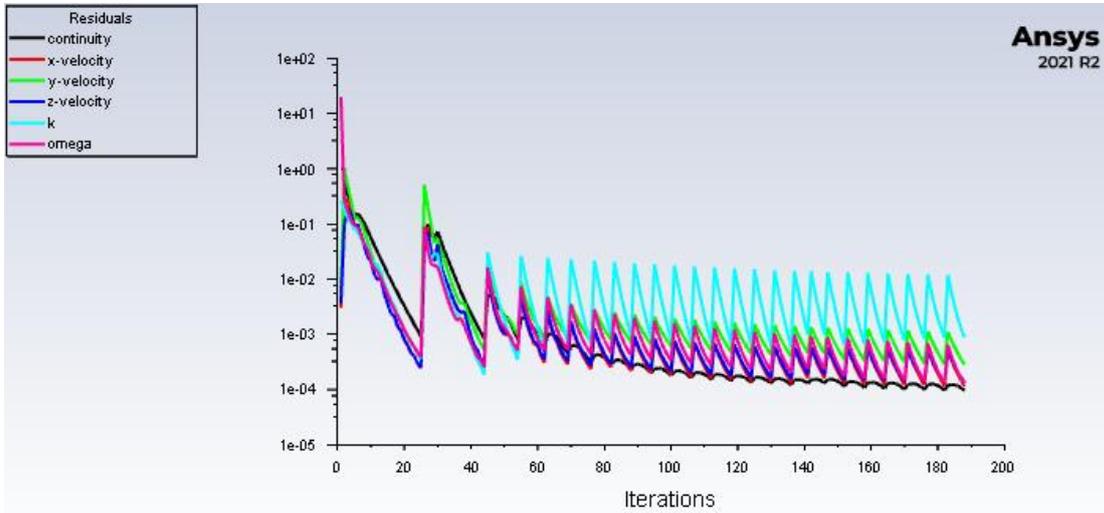


Figura 30. Errores residuales de la simulación 1 tras la convergencia de la solución.

Se han analizado los esfuerzos de cizalladura en las capas del fluido en las proximidades de la pared de la geometría. Se ha obtenido un valor máximo del esfuerzo de 225.0577 Pa. En los diagramas por colores se puede observar como en la zona donde sale el agua desde la aguja el esfuerzo es mayor. En general, la zona del canal donde está insertada la aguja presenta mayores tensiones.

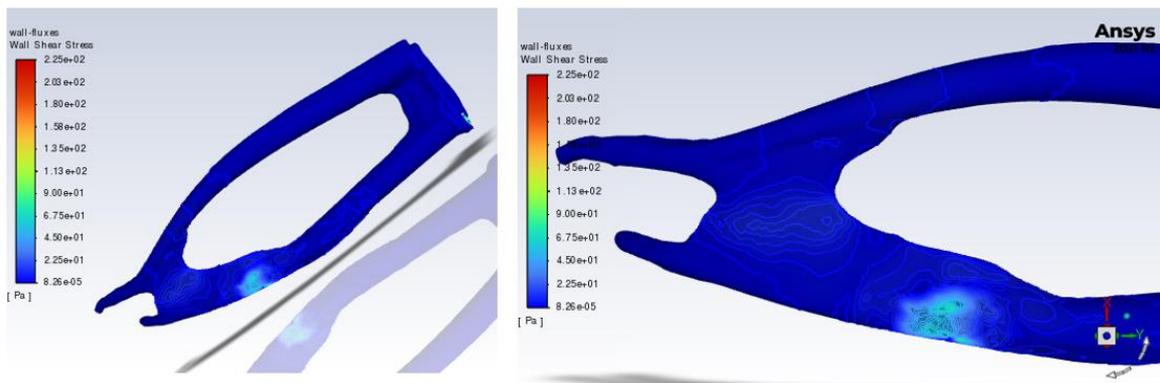


Figura 31. Esfuerzo de cizalladura en las proximidades de la pared de la geometría 1.

Para visualizar mejor las líneas de contorno, se muestra en la siguiente imagen la geometría quitando la capa más superficial de la pared.

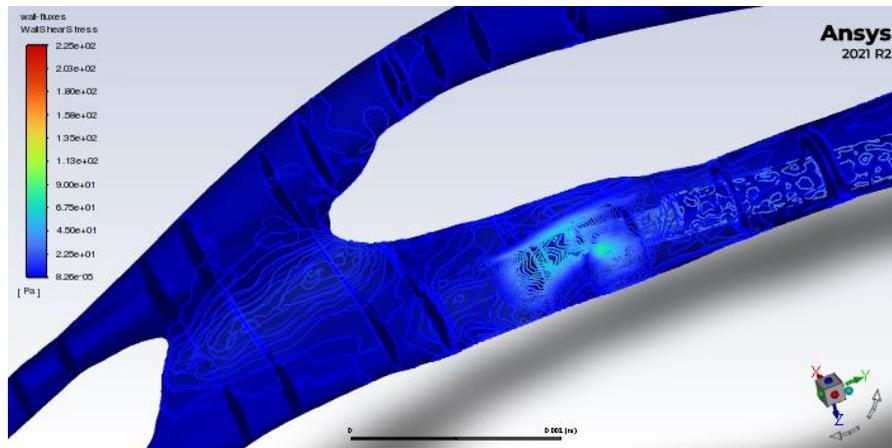


Figura 32. Ampliación de los esfuerzos de cizalladura para la geometría 1.

Las siguientes imágenes muestran la distribución de presiones relativas de la geometría 1. La máxima presión en la geometría es 4735.908 Pa. Las zonas más inferiores del conducto presentan las menores presiones muy cercanas a 0 Pa.

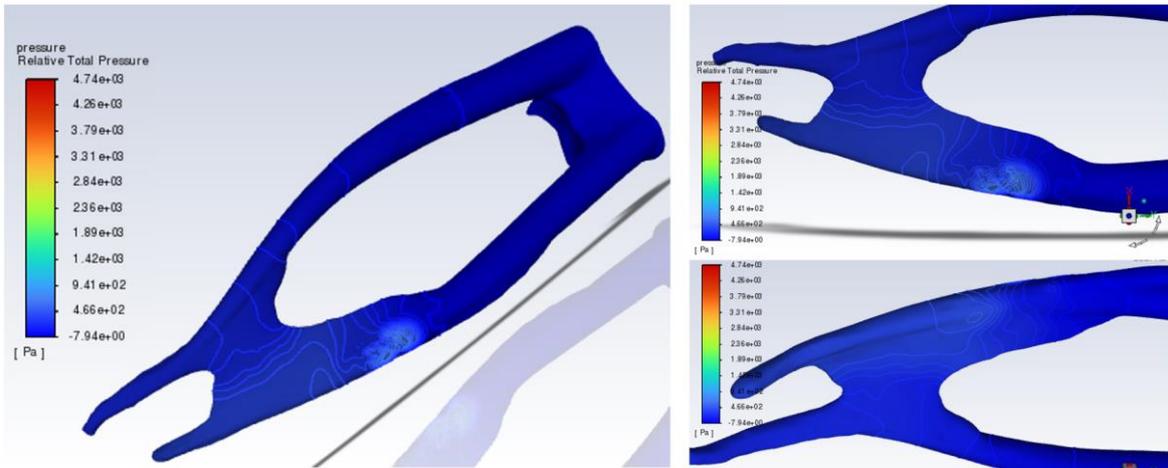


Figura 33. Diagrama de presiones relativas de la geometría 1.

Se han analizado también los planos donde se encuentran las tomas de medidas de presión ya que para esta geometría se han colocado más tomas. En las tomas que se sitúan en la parte superior del tercio apical, las presiones son más altas que en las inferiores tomando valores aproximados de 500 Pa.

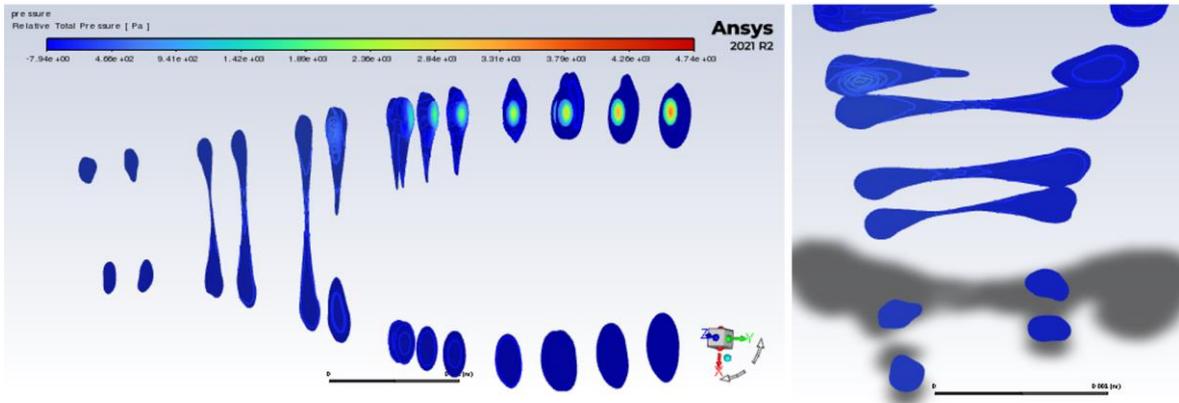


Figura 34. Representación de la presión relativa por planos de interés de la geometría 1.

4.4.2 GEOMETRÍA 2:

Para la segunda geometría, se ha simulado con una velocidad de entrada de 1,33m/s. Con un paso de tiempo de 0.0002s se ha obtenido una solución que converge con errores residuales de menor valor que 1e-02.

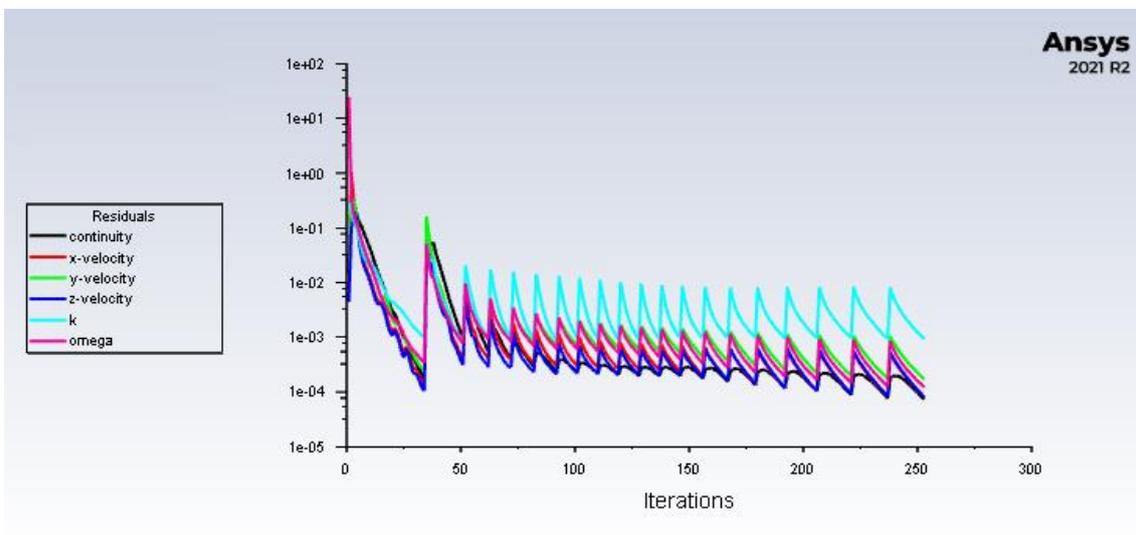


Figura 35. Errores residuales de la simulación para la geometría 2.

Se ha representado la tensión en la capa de fluido junto a la pared de los canales. Como se puede observar en los diagramas el mayor esfuerzo se da en la zona donde la aguja inyecta el líquido irrigante (agua). En la parte más inferior del tercio apical la tensión es prácticamente nula y en la más superior se alcanzan valores de 65Pa.

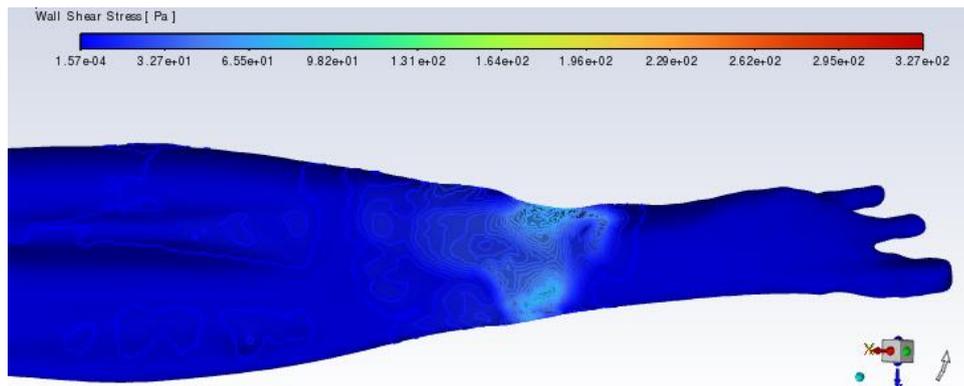


Figura 36. Esfuerzo de cizalladura de la geometría 2, vista 1.

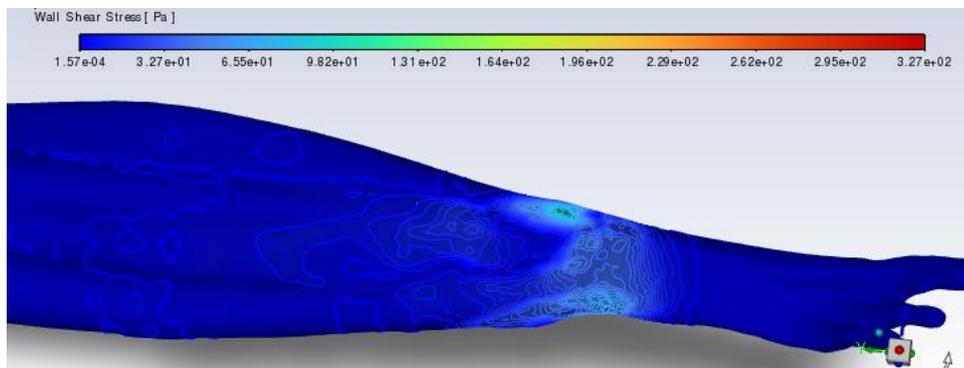


Figura 37. Esfuerzo de cizalladura de la geometría 2, vista 2.

Por otra parte, se han analizado las presiones. En este caso, comparado con el de la geometría 1, la distribución de presiones es mucho más estable puesto que no hay muchas líneas de contorno.

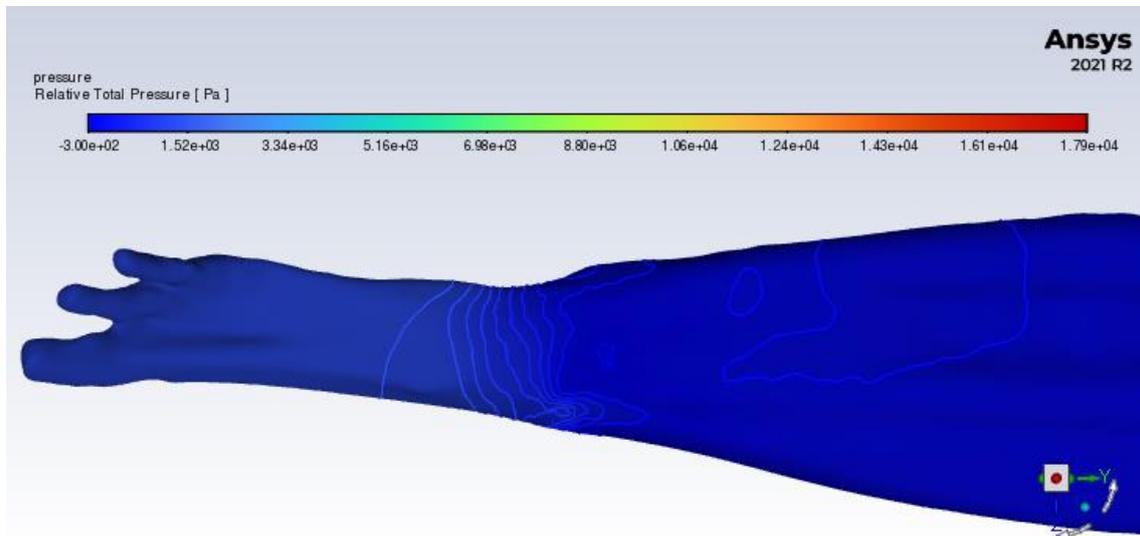


Figura 38. Distribución de presiones en la geometría 2.

Capítulo 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

Este capítulo recoge todos los gastos que conlleva el proyecto. Se ha separado por una parte los costes de la realización de los experimentos a través de la bancada de ensayo y por otra parte el coste de las simulaciones. Esta separación se ha realizado para poder hacer una comparativa posterior y sacar conclusiones sobre la misma.

5.1 ANÁLISIS ECONÓMICO BANCADA DE ENSAYO

Los costes de esta parte incluyen tanto los costes de la parte de la bomba, como los del cubo central y todos los elementos necesarios para medir la presión.

5.1.1 ELECCIÓN DE LA BOMBA

Para elegir la bomba que se va a utilizar en los ensayos, se compararán 2 bombas distintas en cuanto a precio y a calidad.

La primera bomba es una bomba peristáltica digital. Es de la marca Chuangrui el modelo BT100M. La principal ventaja de esta bomba es que, al ser digital, es cómodo y sencillo seleccionar el flujo y la velocidad que se quiera. El coste de esta bomba es de 300€.



- **Drive Model:** BT100M
- **Speed range :** 0.1-100 rpm(reversible)
- **Flow range :** 0.0015~380ml/min
- **Max channels :** 2
- **Foot pedal :** Yes
- **Pump Head :** YZ1515x, YZ2515x, DG series

Figura 39. Bomba peristáltica BT100M.

La segunda bomba, es una microbomba de agua de acoplamiento directo y con motor de corriente continua sin escobillas de la marca RS modelo D220BL. En este caso, para

controlar la bomba, se necesita un circuito electrónico que es capaz de variar la tensión de alimentación de la bomba y así variar la velocidad de su motor y por lo tanto su flujo de funcionamiento. Todo el coste de la bomba más los materiales y elementos necesarios para su control suman un coste de 169,69€.

Tras estudiar los costes totales y las ventajas que presentan ambas bombas, se ha decidido comprar la bomba simple de motor DC en vez de la peristáltica. La mayor razón de esta elección es que la bomba peristáltica digital presenta muchas funcionalidades que no son necesarias para el proyecto y aunque su precisión sea un poco mayor que el control electrónico de la bomba de corriente continua, el sobre coste respecto de la bomba DC no merece la pena.

5.1.2 ELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D

Como se explicó en el Capítulo 3. Parte I3.3.2.4, la elección del material para imprimir en 3D depende del análisis de costes. Como opciones se han estudiado el filamento PETG y las resinas para poder imprimir en SLA. Por una parte, el PETG presenta buenas características mecánicas pero la precisión de imprimir con la técnica FDM no es tan buena como la tecnología SLA. Utilizar resinas aporta entonces mayor precisión y eligiendo una resina resistente se consiguen magníficas propiedades mecánicas con opción de mecanizarlas posteriormente. A pesar de que la resina resistente sea mejor, hay que analizar si su coste compensa la mejora de propiedades en cuanto a la funcionalidad que se busca en las piezas.

Para obtener presupuestos de las distintas piezas se ha utilizado un comparador de precios según el tipo de impresión 3D a tiempo real creado por la empresa alemana All3DP. En la Tabla 8 se muestra el desglose del presupuesto por piezas. Se aprecia un aumento de precio en el caso de la resina resistente. El precio total es 2,85 veces mayor para el caso de la resina resistente comparado con el precio de utilizar PETG. Se considera que las piezas a imprimir no tienen tanta complejidad como para asumir el coste que supone imprimir con tecnologías SLA y por eso se decide imprimir en FDM con filamentos PETG.

Elemento	PETG (€)	Resina resistente (€)
Placa para protoboard 1	46,30	96,69
Placa para protoboard 2	77,40	165,65
Placa sujeción cubo de ensayo	5,84	11,69
Adaptador de aguja	5,84	11,69
Soporte principal	303,32	964,89
TOTAL	438,70	1.250,61 €

Tabla 8. Comparación de costes entre PETG y una resina resistente.

Por otra parte, el cubo con las geometrías es el elemento más complejo de obtener su presupuesto debido al material. Como se ha explicado en el Capítulo 3. Parte I3.3.2, en este caso, no es necesario hacer una comparativa de precios para saber con qué tecnología imprimir puesto que los tamaños y la complejidad de las geometrías del cubo exigen una precisión muy alta. Esa precisión solo la puede aportar la impresión SLA. Además, los requerimientos de los ensayos obligan a que las resinas utilizadas sean lo más transparentes posible. El mejor material para conseguir buenas propiedades físicas y en especial una transparencia muy alta es el vidrio de sílice pero este material es muy caro y el presupuesto final se vería incrementado notablemente. Por ello, se ha de elegir un material con buena transparencia, pero no tan exclusivo como el vidrio de sílice. Entonces, sería necesario obtener o bien muestras de resinas transparentes antes de elegir el material o crear un material personalizado. El inconveniente de esto es que los presupuestos para este tipo de requerimientos deben ser pagados y por eso se ha hecho una aproximación para obtener el precio de la pieza final. La empresa Xometric ofrece un presupuesto gratis del cubo de ensayo con tecnología de estereolitografía con un material transparente parecido al ABS y con una silicona pura, materiales baratos y caros respectivamente. Imprimir con el material transparente conllevaría un coste de 103,30€ mientras que utilizar silicona pura supondría un coste de 609,68€. Como la resina a utilizar tendría un coste intermedio al de ambos presupuestos anteriores, se puede hacer una aproximación del coste final de 400€.

5.1.3 COSTES TOTALES DE LA BANCADA DE ENSAYO

Una vez decidida la forma de impresión 3D y la bomba, se puede estudiar el coste total que supone la realización de los ensayos experimentales. La siguiente tabla recoge cada uno de

los elementos o servicios necesarios para estos ensayos divididos por cada parte de la bancada.

Parte bancada	Elemento / Servicio	Uds	Coste / ud	Coste total
Bomba	Bomba	1 ud	73,51	73,51
Bomba	Tubos conexión	1 m	2,38	2,28
Bomba	Placa Arduino	1 ud	20,06	20,06
Bomba	Módulo L298N	1 ud	15,09	15,09
Bomba	Fuente de alimentación	1 ud	54,99	54,99
Bomba	Cables de conexión finos	4 uds	0,12	0,48
Bomba	Cables de conexión pinza	2 uds	1,64	3,28
TOTAL BOMBA				169,69
Cubo central	Placa para protoboard 1	1 ud	46,30	46,30
Cubo central	Placa para protoboard 2	1 ud	77,40	77,40
Cubo central	Placa sujeción cubo de ensayo	1 ud	5,84	5,84
Cubo central	Adaptador de aguja	1 ud	5,84	5,84
Cubo central	Soporte principal	1 ud	303,32	303,32
Cubo central	Cubo de ensayo	1 ud	400,00	400,00
Cubo central	Tuerca hexagonal acero inoxidable	2 ud	0,04	0,09
Cubo central	Tornillo prisionero	8 ud	0,05	0,40
Cubo central	Varilla acero inoxidable	9 ud	2,80	25,18
Cubo central	Aguja para irrigación	1 ud	0,48	0,48
Cubo central	Endoactivador	1 ud	323,60	323,60
Cubo central	Mecánico que realice las tareas de mecanizado de elementos	1 h	12 €/hora	12,00
TOTAL CUBO CENTRAL				1200,44
Medida de presión	Sensor de presión	1 ud	22,29	22,29
Medida de presión	Pieza empalme	1 ud	5,84	5,84
Medida de presión	Tubo conexión cubo ensayo	10 cm	12,11 €/m	1,21
Medida de presión	Tubo conexión sensor	10 cm	12,11 €/m	1,21
Medida de presión	Cables conexión finos	2 uds	0,12	0,24
Medida de presión	Placa Arduino	1 ud	20,06	20,06
TOTAL MEDIDA DE PRESIÓN				50,85
TOTAL				1.420,98 €

Tabla 9. Desglose de costes de los ensayos experimentales.

5.2 ANÁLISIS ECONÓMICO ENSAYO COMPUTACIONAL

Por otra parte, se han analizado los costes que conllevan los ensayos computacionales. Se han tenido en cuenta tanto la licencia del software utilizado como el pago del empleado que tendría que hacer el trabajo.

La licencia de ANSYS puede ser comercial o educacional. Se entiende que como el proyecto se realiza desde la propia escuela de ingeniería de ICAI, el software utilizado es el educacional. Además, para el pago de estas licencias, se debe hacer una compra y luego un mantenimiento anual. Para hallar la totalidad del coste de la licencia no se ha tenido en cuenta el primer pago de licencia y solo el mantenimiento de un año ya que se entiende ese precio como coste fijo que ya se ha asumido para la utilización del software para otras utilidades. Cabe mencionar que el coste de un año de licencia es aproximado. Se ha partido del coste de la licencia comercial de 1 año valorado en 14.120€ y, como la licencia educacional es más barata, se ha asumido que el porcentaje de reducción de precio es aproximadamente del 40%.

Además de la licencia, es necesario pagar un sueldo a la persona que va a realizar los ensayos. Se entiende que como el contratado es un experto con experiencia previa, no tardará un tiempo mayor a 40 horas en realizar el mallado y las simulaciones de las geometrías.

Elemento / Servicio	Uds	Coste	Coste total
Licencia ANSYS educacional	40 horas	8.500 €/año	177,08
Ingeniero de aplicación en ANSYS simulaciones CFD	40 horas	35.000 €/año	625,00
TOTAL			802,08 €

Tabla 10. Desglose de costes de los ensayos computacionales.

5.3 COMPARACIÓN

Tras estudiar los distintos costes desglosados es interesante realizar una comparación entre los cálculos finales.

Realizar los ensayos de manera computacional implica una reducción de 618,90€ respecto del coste total que implicarían los ensayos experimentales. Dentro del coste de los ensayos experimentales, la mayor parte del coste se refiere al cubo central, aunque se entiende que los costes de la misma son relativamente fijos y una vez comprados pueden servir para distintos ensayos. Bien es cierto que, a largo plazo, si se quisiera seguir estudiando distintos conductos radiculares, realizar los ensayos experimentales solo conllevaría un coste adicional por imprimir un nuevo cubo de ensayo con otras geometrías distintas mientras que el sueldo del ingeniero superaría este importe. Aunque no hay que dejar de lado el mantenimiento de la bancada de ensayo pues habría que ver cómo de resistentes se mantendrían todos los elementos y si hubiese que cambiarlos por oxidación o daños por el agua.

De todas formas, aunque el coste de los siguientes ensayos experimentales sea menor, los resultados son muy escasos, solo cualitativos para ver si en distintas geometrías el efecto de la activación es el mismo o no.

Capítulo 6. TRABAJOS FUTUROS

La continuación del proyecto implica principalmente la validación de los ensayos computacionales a través de la toma de medidas de presión de los ensayos experimentales para poder finalizar el proyecto entero que se ha planteado en este trabajo.

6.1 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Una vez diseñada la bancada y desarrollado el método de fabricación, los siguientes pasos del proyecto sería realizar los ensayos y tomar los resultados necesarios.

Los ensayos son sencillos y rápidos de ejecutar. La dinámica consiste en inyectar a través de la bomba y de la aguja irrigadora suficiente agua en cada geometría disponible hasta que este rebose del conducto. Después, se analizará cualitativamente el flujo y lo ocurrido con las burbujas de aire. Además, se podrán comparar las distintas geometrías y ver cómo afecta la forma y complejidad de cada una en la aparición de estas burbujas de aire.

Posteriormente y tras la toma de las distintas presiones, se procederá a activar el líquido que inunda las cavidades. Manualmente y con el uso de un EndoActivador, se sumergirá la punta activadora en la parte superior de las geometrías y se procederá a encender el aparato durante unos segundos. Se parará y se observará detenidamente cuál ha sido la consecuencia de la activación. Por último, se volverán a tomar las medidas de presión para poder compararlas con las de los ensayos computacionales.

6.2 ENSAYOS COMPUTACIONALES DE ACTIVACIÓN

Para futuras investigaciones y proyectos de estudio, sería interesante realizar los ensayos computacionales de activación. Con esta parte, se podría terminar la comparación entre los ensayos experimentales y los computacionales al igual que se ha hecho con los de irrigación.

El proceso a seguir en dichos estudios deberá ser paralelo al que se ha llevado a cabo con la irrigación. Tras mallar la geometría y definir las fases del flujo y configurar los distintos parámetros y condiciones del flujo, se procederá a iniciar la simulación y estudiar los resultados. Se compararán los resultados de la presión para poder compararlo con las medidas obtenidas en la parte experimental.

Para este proyecto, no se llevará a cabo esta parte de simulación de la activación ya que el proceso computacional presenta una serie de dificultades que no son viables de afrontar en este proyecto, pues se requiere de mayores conocimientos en la dinámica de fluidos. Algunas de estas dificultades son: la aparición de un fluido bifásico, la existencia de una malla variable y la diversidad de posibles tipos de regímenes que pueden aparecer.

6.2.1 TIPO DE FLUJO

Simulaciones multifase con regímenes distintos y simulaciones pesadas.

El flujo con el que se trata es multifásico, esto quiere decir que el flujo de fluido consiste en más de una fase. Particularmente, se está tratando un fluido bifásico de líquido-gas de flujo burbujeante que se refiere al flujo de burbujas gaseosas discretas en un fluido líquido continuo. Este fluido bifásico tiene como fase primaria el líquido (solución irrigadora) que envuelve a la fase secundaria que son las burbujas de aire (vapor lock) generadas tras la irrigación de los canales dentales. Según otra clasificación de fluidos, es disperso ya que consiste en partículas finitas (burbujas) que es la fase dispersa distribuida en un volumen conectado llamado fase continua. [78].

Estos flujos se caracterizan porque cada fase puede tener un régimen de flujo distinto y pueden generarse diversos regímenes transitorios. Además, las burbujas presentes en los canales dentales no tienen los mismos tamaños y aunque gracias a estudios anteriores se sepa que el vapor lock aparece en el tercio apical, [32], no siempre aparece de la misma forma ni las burbujas se encuentran en las mismas localizaciones.,

Cabe mencionar que, en este tipo de flujos, la interacción entre ambas fases toma un papel importante es necesario que la simulación logre tener en cuenta la tensión superficial entre la solución irrigadora y las burbujas de aire atrapadas en la fase principal.

Por todo lo mencionado anteriormente, las simulaciones entonces se vuelven pesadas y complicadas. La complejidad de la dinámica de este tipo de flujos es notable y se han de tener grandes conocimientos en CFD y un software potente que consiga resolver computacionalmente los comportamientos.

6.2.2 MALLA VARIABLE

En la acción de activación, se introduce la punta activadora de un Endoactivador en la parte superior de los canales dentales ya irrigados que tiene un movimiento de oscilación y vibración. Este movimiento, supone una diferencia importante a la hora de realizar las simulaciones respecto de las simulaciones de irrigación. [79].

En las simulaciones de irrigación, a pesar de que las geometrías contaran con agujas metidas en los canales como parte del cuerpo total, estas no tenían ningún movimiento. En cambio, el EndoActivador, produce un movimiento a lo largo del tiempo. La implicación que tiene esto es la simulación, es que la malla de la geometría para estos casos debe ser variable, pues la geometría cambia en el tiempo.

Para resolver el problema del cambio de geometría, se deben utilizar mallas variables a lo largo de la simulación. ANSYS ofrece algunos modelos para simular este tipo de flujos como el modelo de malla dinámica, el modelo de malla deslizante, marco de referencia... Gracias a estos modelos, se pueden modelar flujos en los que el dominio cambia con el tiempo debido a, por ejemplo, movimientos de cuerpos introducidos dentro del fluido. El inconveniente de estos modelos es que son complejos y cada uno de ellos presenta distintas dificultades. Además, se necesita especial atención al control de la simulación para poder asegurar que las propiedades importantes para las soluciones físicas se puedan mantener al moverse los elementos de la malla. [80][81][82].

Capítulo 7. CONCLUSIONES

Tras haber creado y planteado el funcionamiento del proyecto entero para conseguir obtener conclusiones sobre el efecto de la activación en la eliminación de vapor lock, se han sacado distintos resultados y conclusiones.

El diseño de la bancada de ensayo ha sido completado ofreciendo la mejor forma de realizar los ensayos experimentales ajustándose a las necesidades técnicas y económicas y ofreciendo el mejor balance entre coste y utilidad. Además, las medidas de todas las piezas han sido optimizadas para evitar sobrecostes por material. La técnica de fabricación varía en función de las piezas escogiendo la impresión 3D para las piezas de soporte y comprar elementos comerciales con posterior mecanizado aquellos elementos que sirven de unión entre las piezas y que permiten su movimiento. En cuanto a costes, la mayor parte es destinado al cubo central ya que la impresión del cubo de ensayo tiene un coste elevado por ser geometrías que requieren mucha precisión, además del soporte central que, debido a sus dimensiones, se necesita mayor cantidad de material de impresión.

En cuanto a los ensayos computacionales, las simulaciones de irrigación han dado resultados para la parte superior del tercio apical valores de presión 500Pa y 600Pa y valores de tensión de cizalladura del fluido en las capas próximas a las paredes 45Pa y 65Pa respectivamente. Por el contrario, no se han obtenido resultados para las simulaciones de activación puesto que la técnica de malla variable y la complejidad del flujo han dificultado su ejecución.

Por lo tanto, con lo realizado en este proyecto, no se pueden extraer conclusiones sobre la validez de ambos ensayos ya que no se han obtenido medidas de presión para los ensayos experimentales. Es por tanto que no se puede ofrecer una respuesta a la pregunta de qué metodología es la óptima y discutir las ventajas o desventajas de los ensayos computacionales frente de los experimentales.

Por el contrario, sí se ha realizado una comparación económica de lo que conlleva la realización de los ensayos por separados ofreciendo un menor coste los ensayos computacionales aunque una vez más, no se puede determinar si el sobrecoste de los experimentales es justificable hasta que no se puedan validar los ensayos computacionales. Subjetivamente, se puede concluir que, si los ensayos computacionales son validados y ofrecen unos resultados correctos, a largo plazo para realizar más ensayos en distintas geometrías, la dinámica de fluidos computacional ofrecería mayores ventajas económicas. En cambio, en el caso de no ser válidos, habría que estudiar en profundidad los ensayos y las horas de trabajo incrementarían el coste final de los ensayos computacionales.

Capítulo 8. OBJETIVOS DE DESARROLLO

SOSTENIBLE

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) son 17 objetivos globales que se fijaron por todos los Estados Miembros en 2015 y que tienen 169 metas que se deberían cumplir antes de finales de 2030. Estos objetivos tienen motivos económicos, sociales y ambientales. Para conseguir estos objetivos y sus respectivas metas, se debe emplear la creatividad, el conocimiento, la tecnología y los recursos financieros necesarios. [35].

8.1 ODS 3

Este trabajo está muy relacionado con el ODS 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades. En el caso concreto del proyecto en cuestión, se estará tratando con la salud dental a través de la biomecánica. Se utilizará la tecnología más innovadora y los nuevos avances para completar este trabajo de investigación. [36].

8.2 ODS 9

Minoritariamente, aunque no menos importante, está relacionado con el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. En concreto, se relaciona con la importancia de la inversión en innovación y avances tecnológicos para encontrar soluciones a los problemas de salud dental en este caso. La inversión en investigación e innovación científica es una forma de facilitar el desarrollo sostenible y por eso, este proyecto y su parte de investigación computacional va de la mano con este objetivo de desarrollo sostenible. [37].

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [4] ¿Qué es una endodoncia? (2022). Consejo Dentistas. Organización Colegial de Dentistas de España. <https://www.consejodentistas.es/ciudadanos/informacion-clinica/tratamientos/item/173-informacion-sobre-endodoncia.html>
- [5] T. (2022, 19 enero). *¿En qué consiste una endodoncia? Tipos y procedimiento*. Medyclinic. <https://www.medyclinic.es/blog/2020/06/12/en-que-consiste-una-endodoncia-tipos-y-procedimiento/#:%7E:text=La%20endodoncia%20es%20un%20procedimiento,con%20material%20inerte%20y%20biocompatible.>
- [6] A. (2021, 6 abril). *Cómo se realiza una endodoncia paso a paso*. Nieto & Llorens. <https://www.clinicadentalnietoyllorens.com/como-se-realiza-una-endodoncia/>
- [7] Colgate. (2021, 19 enero). *Endodoncia: Una guía paso a paso*. <https://www.colgate.es/oral-health/root-canals/illustrations-root-canal-treatment-from-start-to-finish>
- [8] A. (2021, 20 enero). *¿Cómo se realiza una endodoncia? Pasos de una endodoncia*. Centro Dental Creta - Siempre cerca de ti. <https://centrodentalcreta.com/como-se-realiza-una-endodoncia-pasos-de-una-endodoncia/>
- [9] *Tratamientos | Clínica Dental Lago*. (2022). Clínica Dental Lago. <https://www.clinicadental-lago.com/tratamientos/>
- [10] Desarrollo4App, S. L. (2022). El barrillo dentinario y su importancia en endodoncia | Revista del Ilustre Consejo General de Colegios de Odontólogos y Estomatólogos de España | RCOE. Revista del Ilustre Consejo General de Colegios de Odontólogos y Estomatólogos de España. <https://rcoe.es/articulo/75/el-barrillo-dentinario-y-su-importancia-en-endodoncia-#:~:text=Sin%20embargo%2C%20a%20veces%20es,del%20conducto%20radicular94%2C95.>
- [11] Reyes Suarez, B. E. (2019-09). Tesis. Factores asociados al fracaso del tratamiento endodóntico.
- [12] Gavino Reyes, E. J. (2016-05). Tesis. Éxitos y fracasos de la desobturación endodóntica.

- [13] Kerekes, K. (1979). long term results of endodontic treatment performed with a standardized technique. *Journal of Endodontic*, 83-90
- [14] Romero Díaz, K. R. (2016-05). Tesis. El retratamiento, primera opción ante el fracaso endodóntico.
- [15] Iqbal, Azhar (2016). The Factors Responsible for Endodontic Treatment Failure in the Permanent Dentitions of the Patients Reported to the College of Dentistry, the University of Aljouf, Kingdom of Saudi Arabia. *JOURNAL OF CLINICAL AND DIAGNOSTIC RESEARCH*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4948527/>
- [16] Peters OA, Schönenberger K, Laib A. Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J*. 2001 Apr;34(3):221-30.
- [17] Miliani, R., Lobo, K., & Morales, O. (2012). Irrigación en endodoncia: Puesta al día. *Acta bioclínica*, 2(4), 85-116.
- [18] Rojasl, J. V., García, M. B., Silva, E. M., & Viñas, M. R. (2012). Conceptos y técnicas actuales en la irrigación endodóntica. *Endodoncia*, 30(1), 31-44.
- [19] Dr. Vera J, Benavides M, Moreno E, Romero M. Conceptos y técnicas actuales en la irrigación endodóntica. *Endodoncia 2021*; 30 (N1):31-44.
- [20] Oliva Rodríguez, R., Gastélum Zazueta, A. G., Hernández Molinar, Y., Mariel Cárdenas, J., Gutiérrez Cantú, F. J., & Silva-Herzog Flores, D. (2017). Incidencia y tipo de istmos en primeros molares permanentes humanos, evaluación in vitro. *International Journal of Morphology*, 35(4), 1280-1284
- [21] D.B. Swartz, A.E. Skidmore, J.A. Griffin Jr. Twenty years of endodontic success and failure. *J Endod*, 9 (1983), pp. 198-202
- [22] Valencia, O., Esteveza, R., Heilborn, C., & Cohenca, N. (2012). Anatomía radicular y configuración de conductos del primer molar inferior permanente. *Quintessence (ed. esp.)*, 25, 538-49.
- [23] Gregorio González, C., Marabini, N. N., Luaña, R. E., Cohenca, N., & Cabello, R. C. (2011). Penetración real de la irrigación en el interior de sistemas de conductos cerrados. *ENDODONCIA*, 29(2), 85-94.
- [24] Zamora, G., Fuentes, R., Peschke, E., & Nenen, F. (2011). Comparación microscópica del barro dentinario residual en conductos radiculares, tras instrumentación rotatoria con y sin un quelante viscoso. *International journal of odontostomatology*, 5(2), 165-170.
- [25] Li-sha Gu; Jong Ryul Kim; Junqi Ling; Kyung Kyu Choi; David H. Pashley; Franklin R. Tay (2009). Review of Contemporary Irrigant Agitation Techniques and Devices. , 35(6), 0-804.

- [26] García Delgado, A., Martín-González, J., Castellanos-Cosano, L., Martín Jiménez, M., & Segura-Egea, J.J.. (2014). Sistemas ultrasónicos para la irrigación del sistema de conductos radiculares. *Avances en Odontostomatología*, 30(2), 79-94. Recuperado en 28 de noviembre de 2021.
- [27] Darcey, J., Jawad, S., Taylor, C., Roudsari, R. V., & Hunter, M. (2016). Modern endodontic principles part 4: irrigation. *Dental update*, 43(1), 20-33.
- [28] Agarwal, A., Deore, R. B., Rudagi, K., Nanda, Z., Baig, M. O., & Fareez, M. A. (2017). Evaluation of Apical Vapor Lock Formation and comparative Evaluation of its Elimination using Three different Techniques: An in vitro Study. *The journal of contemporary dental practice*, 18(9), 790-794.
- [29] García Delgado, A., Martín-González, J., Castellanos-Cosano, L., Martín Jiménez, M., & Segura-Egea, J. J. (2014). Sistemas ultrasónicos para la irrigación del sistema de conductos radiculares. *Avances en odontostomatología*, 30(2), 79-94.
- [30] Dioguardi, M., Crincoli, V., Sovereto, D., Caloro, G. A., Aiuto, R., Illuzzi, G., ... & Lo Muzio, L. (2019). Effectiveness of Vapor Lock Effect Removal in Endo Training Blocks: Manual Dynamic Agitation versus Passive Ultrasonic Irrigation. *Applied Sciences*, 9(24), 5411.
- [31] Villa López, L. (2012). *Irrigación en endodoncia* (Doctoral dissertation, [sn]).
- [32] Boutsioukis, C.; Kastrinakis, E.; Lambrianidis, T.; Verhaagen, B.; Versluis, M.; van der Sluis, L.W. Formation and removal of apical vapor lock during syringe irrigation: A combined experimental and Computational Fluid Dynamics approach. *Int. Endod. J.* 2014, 47, 191–201.
- [33] Vitale, G. (2020). *Recursos actuales de irrigación en endodoncia* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Odontología).
- [34] Bernal, J. V., & Pérez, M. B. B. (2015). La simulación como herramienta para la mejora en el uso de recursos empresariales. Caso pruebas destructivas de calidad. *Ciencia y tecnología*
- [35] Objetivos de Desarrollo Sostenible. (2021). Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación. <http://www.exteriores.gob.es/portal/es/politicaexteriorcooperacion/nacionesunidas/paginas/objetivosdedesarrollodelmilenio.aspx>
- [36] *Objetivos de Desarrollo Sostenible | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo.* (2022). Objetivo 3. Salud y Bienestar. PNUD. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals#salud-y-bienestar>

- [37] *Objetivos de Desarrollo Sostenible | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo*. (2022). Objetivo 9. Industria, innovación e infraestructura. PNUD. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals#industria-innovacion-e-infraestructura>
- [38] Absceso dental - Síntomas y causas - Mayo Clinic. (2019, 20 junio). Mayo Clinic. <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/tooth-abscess/symptoms-causes/syc-20350901#:~:text=Un%20absceso%20dental%20periapical%20ocurre,hasta%20llegar%20a%20la%20ra%C3%ADz.>
- [39] Alvarez Burbano, D. D. J. (2013). Comparación de llenado del conducto radicular instrumentado con limas de níquel titanio del sistema protaper, con una obturación de cono único de gutapercha del sistema protaper, impregnado de cemento AH 26 plus contra el método de introducir cemento AH 26 plus con léntulo y cono único de gutapercha (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- [40] Brushless Motor. (2017, 9 mayo). Brushless motor. <https://www.brushlessmotor.es/>
- [41] Chalco, L. B. J., & Meza, J. A. Z. (2011). Retratamiento endodóntico no quirúrgico. *Revista Estomatológica Herediana*, 21(4), 231-236.
- [42] Reyes, L. T., Benítez, A. L., & Álvarez, R. V. (2018). Factores asociados al fracaso de la terapia de conductos radiculares. *Odontología sanmarquina*, 21(2), 93-102.
- [43] Perú, M. N.-. (2022). *Tutorial de Uso del Módulo L298N*. Naylamp Mechatronics - Perú. https://naylampmechatronics.com/blog/11_tutorial-de-uso-del-modulo-l298n.html
- [44] Sepúlveda, C., Duran, M. A. C., & Duran, Y. J. C. (2021). CONTROL DE VELOCIDAD EN MOTORES INDUSTRIALES3. *Ingeniería, Sostenibilidad y Sociedad*, 1(2).
- [45] *¿Qué es PWM y cómo usarlo?* (2020, 26 agosto). Solectro. <https://solectroshop.com/es/blog/que-es-pwm-y-como-usarlo--n38>
- [46] Designthemes. (2022, 6 marzo). *ARDUINO Y L298N: MONTAJE Y CONEXIÓN*. Tienda y Tutoriales Arduino. <https://www.prometec.net/coche-arduino-l298n/>
- [47] L. (2021, 8 junio). *Controlar motores de corriente continua con Arduino y L298N*. Luis Llamas. <https://www.luisllamas.es/arduino-motor-corriente-continua-l298n/>
- [48] *Instructions D200BLX*. (2022). TCS MICROPUMPS. <https://micropumps.co.uk/DATA/pdf/IM192%20-%20Instructions%20D200BLX%20REV%201.pdf>

- [49] *Mecanizado de Piezas de Plástico · MIPESA MECANIZADOS*. (2022). Empresas de Mecanizado, Corte Láser y Calderería. https://www.mipesa.es/mecanizado-de-piezas-de-plastico/#mecanizado_de_plastico
- [50] Solutions, E. W. (2020, 2 julio). *El Delrin®, un buen aliado para tus aplicaciones*. InduPlast | Plásticos Industriales. <https://induplast.es/es/b/blog/plasticos/p/que-es-el-delrin-r-7-2>
- [51] *Mecanizado por arranque de viruta: ¿cuáles son los más habituales?* (2019, 30 noviembre). ferrosplanes. <https://ferrosplanes.com/mecanizado-por-arranque-de-viruta/>
- [52] *Materiales para mecanizados y tallados*. (2019, 5 febrero). Mecanizados y Tallados Suguz. <http://mecanizadossuguz.com/materiales-mecanizados/>
- [53] Bach, M. (2022, 17 marzo). *Prusament PETG*. Prusament. <https://prusament.com/es/materials/prusament-petg/>
- [54] impresoras3d.com. (2021, 25 enero). *SLS y SLA: que son y en qué se distinguen*. <https://www.impresoras3d.com/sls-y-sla-que-son-y-en-que-se-distinguen/>
- [55] J. (2019, 16 septiembre). *El coste de los materiales de impresión en 3D*. Imprime3dbarato. <https://imprime3dbarato.com/coste-los-materiales-impresion-3d/>
- [56] *¿En qué se diferencian las tecnologías de impresión 3D FDM y SLA?* (2022). Filament2print. https://filament2print.com/es/blog/38_tecnologias-impresion-3D-FDM-SLA.html
- [57] *Cómo elegir terrajas para hacer roscas*. (2021, 9 junio). LEROY MERLIN. <https://www.leroymerlin.es/herramientas/herramientas-de-fontanero/como-elegir-terrajass#:~:text=Las%20terrajass%2C%20tambi%C3%A9n%20llamadas%20cojinetes,una%20herramienta%20espec%C3%ADfica%20llamada%20bandeador>
- [58] *Cómo elegir terrajas para hacer roscas*. (2021, 9 junio). LEROY MERLIN. <https://www.leroymerlin.es/herramientas/herramientas-de-fontanero/como-elegir-terrajass#:~:text=Las%20terrajass%2C%20tambi%C3%A9n%20llamadas%20cojinetes,una%20herramienta%20espec%C3%ADfica%20llamada%20bandeador>
- [59] *¿Qué es un sensor de presión?* (2022, 20 junio). HBM. <https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/#:~:text=La%20ventaja%20m%C3%A1s%20evidente%20de,menor%20medida%20en%20su%20funcionamiento>

- [60] H. (2022). *BASIC BOARD MOUNT PRESSURE SENSORS, ABP2 SERIES*. Mouser.
https://www.mouser.es/datasheet/2/187/Honeywell_01292021_ABP2_Series_Datasheet_Issue_C-1991028.pdf
- [61] *Simulación CFD — AST Ingenieria*. (2022). Ast Ingenieria. <http://www.ast-ingenieria.com/capacidades-soluciones/simulacion-cfd>
- [62] Gómez González, S. (2017). *Mallado y simulación CFD de automóvil* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [63] *ANSYS Mesh Quality*. (s. f.). ENEAGRID Projects.
<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm>
- [64] Anexo I: Influencia de la calidad de malla en las simulaciones. Uso de condiciones de contorno periódicas.
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3848/fichero/Volumen+%C3%9Anico%252F07.ANEXO+I.pdf>
- [65] García-Cuevas González, L. M., Gil Megías, A., Navarro García, R., & Quintero Igeño, P. M. (2020). *Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad del mallado*.
- [66] De Vehi Sarrazin, J. M. (2016). *Mallado de geometrías complejas mediante CFD* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [67] Mechanicaland Content Editor. (2022, 22 enero). *Curvature Size Function In ANSYS® Meshing(Illustrated Expression)*. ML - Best Engineering Blog.
<https://mechanicalland.com/curvature-size-function-in-ansys-meshing/>
- [68] *How to Use Proximity Local Sizing — Lesson 5*. (2022, 11 marzo). ANSYS Innovation Courses. <https://courses.ansys.com/index.php/courses/add-local-sizing/lessons/how-to-use-proximity-local-sizing-lesson-5/>
- [69] Mechanicaland Content Editor. (2022, 24 enero). *Proximity Size Function In ANSYS® Meshing(Illustrated Expression)*. ML - Best Engineering Blog.
<https://mechanicalland.com/proximity-size-function-in-ansys-meshing/>
- [70] Mangani, L., Sanz, W., & Darwish, M. (2016, April). Comparing the performance and accuracy of a pressure-based and a density-based coupled solver. In *16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*.
- [71] ANSYS. *Overview of Using the Solver*. (s. f.). AFS ENEA.
<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node776.htm#:~:text=The%20pressure%2Dbased%20solver%20traditionally,for%20high%2Dspeed%20compressible%20flows>

- [72] ANSYS Customer Training Material. (2021). *Transient Flow Modeling*. ANSYS.
https://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture10-transient.pdf
- [73] Wang R, Shen Y, Ma J, et al. Evaluation of the effect of needle position on Irrigant flow in the C-shaped root canal using a computational fluid dynamics model. *J Endod*. 2015;41:931-936.
- [74] *K-Omega and K-Omega SST | Global Settings*. (2021, 25 mayo). SimScale.
<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>
- [75] *SST K-Omega Turbulence Models*. (2018, 28 agosto). CFD 2019 | Autodesk Knowledge Network. <https://knowledge.autodesk.com/fr/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/FRA/SimCFD-Learning/files/GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC-htm.html>
- [76] Loroño, G., Zaldivar, J. M. R., Jimenez-Octavio, J. R., Dorado, S., Arias, A., & Cisneros, R. (2020). CFD analysis on the effect of combining positive and negative pressure during the irrigation of artificial isthmuses. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 36(10), e3385.
- [77] *Discussion of Time-Step Size — Lesson 3*. (2021, 13 enero). [Vídeo]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=NW1uzVi4cp0>
- [78] Zamora Pina, M. (2016). Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo oscilatorio.
- [79] *EndoActivator. Instrucciones de uso*. (s. f.). Dentsply Sirona.
https://www.expro dental.cl/archivos/productos/3822_manual.pdf
- [80] *Ansys Fluent Dynamic Mesh Modeling*. (2022, 31 mayo). Ansys Training.
<https://www.ansys.com/training-center/course-catalog/fluids/ansys-fluent-dynamic-mesh-modeling>
- [81] Zahed, M. (2022, 4 julio). *Moving Mesh, Sliding Mesh, Mesh Motion - MR CFD - Simulation, Training*. MR CFD. <https://www.mr-cfd.com/services/fluent-modules/moving-mesh/?v=04c19fa1e772>
- [82] Tang, T. (2005). Moving mesh methods for computational fluid dynamics. *Contemporary mathematics*, 383(8), 141-173.

ANEXO I

Este anexo contiene el código fuente de Arduino que permite controlar la bomba hidráulica utilizada en los ensayos experimentales.

```
/*
Código para el control de la velocidad del motor DC
Autor: Lucía Manzano García
ICAI Universidad Pontificia Comillas
*/

// Motor A
int IN1 = 9; // Input1 conectado al pin 9 de Arduino
int IN2 = 8; // Input2 conectado al pin 8 de Arduino
int ENA = 11; // ENA conectado al pin 11 de Arduino

// Velocidad del motor: (vel = ciclo) (cte a cambiar cada vez que se quiera un
flujo distinto) (0-255)
int vel = --- ;

void setup()
{
//Declaración de pines utilizados como salidas
pinMode (ENA, OUTPUT);
pinMode (IN1, OUTPUT);
pinMode (IN2, OUTPUT);
}
void loop ()
{
// Se fija la salida para que el motor A gire en un sentido
digitalWrite (IN1, HIGH);
digitalWrite (IN2, LOW);

// Se fija la velocidad del motor A
analogWrite (ENA, vel);

delay(60000);

// Se para el motor
digitalWrite (IN1, LOW);
digitalWrite (IN1, LOW);
analogWrite (ENA, 0);

while(1)
}
```

ANEXO II

Este anexo contiene el código fuente de Arduino que permite controlar el sensor de presión.

ABP2 SERIES BASIC BOARD MOUNT PRESSURE SENSORS

6.8 REFERENCE CODE (ARDUINO/GENUINO UNO) FOR I²C INTERFACE

See also Section 8.0 for details and examples of ABP2 Series Pressure and Temperature output calculations.

```
#include<Arduino.h>
#include<Wire.h>

uint8_t id = 0x28; // i2c address
uint8_t data[7]; // holds output data
uint8_t cmd[3] = {0xAA, 0x00, 0x00}; // command to be sent
double press_counts = 0; // digital pressure reading [counts]
double temp_counts = 0; // digital temperature reading [counts]
double pressure = 0; // pressure reading [bar, psi, kPa, etc.]
double temperature = 0; // temperature reading in deg C
double outputmax = 15099494; // output at maximum pressure [counts]
double outputmin = 1677722; // output at minimum pressure [counts]
double pmax = 1; // maximum value of pressure range [bar, psi, kPa, etc.]
double pmin = 0; // minimum value of pressure range [bar, psi, kPa, etc.]
double percentage = 0; // holds percentage of full scale data
char printBuffer[200], cBuff[20], percBuff[20], pBuff[20], tBuff[20];
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    delay(10);
  }
  Wire.begin();
  sprintf(printBuffer, "\nStatus Register, 24 - bit Sensor data, Digital Pressure Counts,\
  Percentage of full scale pressure, Pressure Output, Temperature\n");
  Serial.println(printBuffer);
}
void loop() {
  Wire.beginTransmission(id);
  int stat = Wire.write (cmd, 3); // write command to the sensor
  stat |= Wire.endTransmission();
  delay(10);
  Wire.requestFrom(id, 7); // read back Sensor data 7 bytes
  int i = 0;
  for (i = 0; i < 7; i++) {
    data [i] = Wire.read();
  }
  press_counts = data[3] + data[2] * 256 + data[1] * 65536; // calculate digital pressure counts
  temp_counts = data[6] + data[5] * 256 + data[4] * 65536; // calculate digital temperature counts
  temperature = (temp_counts * 200 / 16777215) - 50; // calculate temperature in deg c
  percentage = (press_counts / 16777215) * 100; // calculate pressure as percentage of full scale
  //calculation of pressure value according to equation 2 of datasheet
  pressure = ((press_counts - outputmin) * (pmax - pmin) / (outputmax - outputmin) + pmin);
  dtostrf(press_counts, 4, 1, cBuff);
  dtostrf(percentage, 4, 3, percBuff);
  dtostrf(pressure, 4, 3, pBuff);
  dtostrf(temperature, 4, 3, tBuff);
  /*
  The below code prints the raw data as well as the processed data
  Data format : Status Register, 24-bit Sensor Data, Digital Counts, percentage of full scale
  pressure,
  pressure output, temperature
  */
  sprintf(printBuffer, " %x\t % 2x % 2x % 2x\t % s\t % s\t % s\t % s \n", data[0], data[1], data[2],
  data[3],
  cBuff, percBuff, pBuff, tBuff);
  Serial.print(printBuffer);
  delay(10);
}
```

Figura 40. Código Arduino para el sensor de presión.[60].