

Desarrollo de robot micromanipulador con aplicaciones en cirugía de retina. Development of a micromanipulator robot with applications in retinal surgery.

Luis San-Agustín ^{a,*}, Mariana Felisa Ballesteros-Escamilla ^b, David Cruz-Ortiz ^a

^aLaboratorio de Robótica Médica y Bioseñales, UPIBI, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto S/N, La Laguna Ticoman, Gustavo A. Madero, 07340, Ciudad de México, México.

^bCIDETEC, Instituto Politécnico Nacional, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México.

Resumen

El presente trabajo describe el diseño de un prototipo mecatrónico para la cirugía de retina automatizada. El prototipo incluye el diseño de una estructura que cubre la cabeza y el cuello del paciente y, además, sirve como soporte de una estructura lineal que transporta un sistema de platina hacia un maniquí que representa los globos oculares del paciente. Este sistema de platina permite movimientos milimétricos. El espacio de trabajo cubre el área correspondiente al ojo humano de acuerdo con la bibliografía. Con la integración de ambos sistemas, se realizan los movimientos necesarios para la canulación de las venas retinianas.

Palabras Clave: Diseño, Prototipo, Cirugía de retina, Estructura lineal, Platina.

Abstract

This article describes the design of a mechatronic prototype for automatic retinal surgery. The prototype includes the design of a structure that covers the patient's head and neck and also serves as a support for a linear structure that transports a translation stage plate system to a mannequin representing the patient's eyeballs. This translation stage plate system allows for movements with millimeter precision, and the workspace covers the area corresponding to the human eye, according to the literature. With the integration of both systems, the necessary movements are performed for retinal vein cannulation.

Keywords: Design, Prototype, Retinal surgery, Linear structure, Translation stage plate.

1. Introducción

Las estructuras y funciones de los ojos son complejas y vulnerables a muchas patologías que pueden afectarlos (Garrity, 2022). Estas complejas estructuras están conformadas por un gran número de elementos y una de ellas es la retina. La retina es un tejido nervioso que recubre el fondo del ojo y se conecta con el cerebro mediante el nervio óptico (Noguez, 2024). Cuando recibe fotones, los codifica en señales electroquímicas que serán enviadas y procesadas por el cerebro. De manera similar a otras zonas del globo ocular, este tejido es vulnerable a patologías entre las que se encuentran: miopía, retinopatía diabética, enfermedades vasculares, degeneración macular, desprendimiento de la retina y enfermedades hereditarias, por mencionar algunas (Fernandez, 2017).

En particular, entre las patologías que llaman la atención de la comunidad médica se encuentran las enfermedades vasculares, donde se pueden observar oclusiones venosas retinia-

nas, definidas como alteraciones vasculares caracterizadas por engrosamiento y dilatación de las venas de la retina, debido a un aumento de la presión intraluminal. Estas patologías se presentan con mayor frecuencia en la sexta década de la vida (Hernández y Wiechers, 2019). De acuerdo con el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), la oclusión venosa retiniana (OVR) es la segunda causa más común de trastorno vascular de la retina, después de la retinopatía diabética, y es una causa frecuente de pérdida de visión e incluso de ceguera (IMSS, 2013).

Por otro lado, la retinopatía diabética es una microangiopatía crónica que produce dilataciones saculares en los capilares venosos cercanos a zonas de pobre perfusión (IMSS, 2014). Es de conocimiento general que actualmente la diabetes es un problema crónico de salud pública en México y a nivel mundial. De acuerdo con la Federación Internacional de Diabetes (IDF por sus siglas en inglés), México se encuentra entre los diez

* Autor para correspondencia: lsanagustino1900@alumno.ipn.mx (Luis San-Agustín)

Correo electrónico: lsanagustino1900@alumno.ipn.mx (Luis San-Agustín), mballesterose@ipn.mx (Mariana Felisa Ballesteros-Escamilla), dcruzo@ipn.mx (David Cruz-Ortiz)

países con mayor número de adultos (20-79 años) con diabetes en el mundo (IDF, 2021).

La retinopatía diabética se presenta hasta en 40 % de los pacientes con diabetes, es la principal causa de ceguera legal en la población económicamente activa, se presenta en el 27 % de los pacientes que tienen entre 5 y 10 años de evolución, 71 a 90 % de aquellos con más de 10 años y en el 95 % después de los 20 años (IMSS, 2014).

La canulación de la vena retiniana CVR (también RVC, por sus siglas en inglés) se emplea como tratamiento para la OVR. Este procedimiento consiste en insertar una microaguja en una vena de la retina con el fin de administrar un fármaco específico. El procedimiento requiere guiar con precisión una aguja hasta la vena objetivo e insertarla evitando dañar los tejidos circundantes (Woong *et al.*, 2023). De acuerdo con (Chiang Rodriguez *et al.*, 2023), el tratamiento del edema macular asociado a las oclusiones venosas de la retina con drogas antiangiogénicas produce una recuperación significativa tanto anatómica como funcional, demostrada en múltiples investigaciones.

La complejidad de los procedimientos descritos anteriormente exige un alto grado de precisión, que en muchos casos depende únicamente de la experiencia y la habilidad del médico, lo que incrementa significativamente la probabilidad de que ocurra un error durante el procedimiento (Gijbels *et al.*, 2018).

Actualmente, son pocos los sistemas que buscan la automatización completa del procedimiento de la RVC. La mayoría de los trabajos actuales buscan ser asistenciales al médico durante el procedimiento. De forma particular, Luca, es el nombre del primer robot oftálmico bimanual desarrollado por AcuSurgical (AcuSurgical, 2017), que incorpora tecnologías de vanguardia, como imágenes 3D en tiempo real y asistencia mediante detección de fuerza para la manipulación del tejido retiniano, para optimizar los procedimientos quirúrgicos. Este enfoque innovador busca aumentar la precisión quirúrgica, reducir la variabilidad asociada a la curva de aprendizaje del cirujano y mejorar la seguridad del paciente.

Por otro lado, en 2023 se presentó el prototipo de un brazo robótico diseñado para la micromanipulación en cirugía de retina. Este sistema, con una precisión de 26 micras, es capaz de implementar una red neuronal para realizar movimientos asistenciales al médico cirujano y disminuir los riesgos de la CVR, basada en una configuración mínima: un brazo robótico, una aguja e imágenes monoculares (Woong *et al.*, 2023).

En 2018 se presentaron los primeros procedimientos de la CVR en humanos, realizados con la asistencia de un robot diseñado, que permite al cirujano insertar una aguja en una vena retiniana extremadamente pequeña y mantenerla estable durante minutos para inyectar un anticoagulante. Este sistema demuestra la viabilidad del procedimiento. El diseño de este sistema teleoperado está compuesto de 3 capas: la interfaz del cirujano, el robot manipulador y el instrumento quirúrgico. Con esto, el sistema es capaz de filtrar los movimientos involuntarios de la mano del cirujano con una supresión del 90 % (Gijbels *et al.*, 2018).

En el presente trabajo se plantea el desarrollo del diseño virtual de un prototipo que sea capaz de realizar la canulación de venas retinianas con una alta precisión. Por ello, se propone una solución que comprende dos sistemas complementarios. El primero consiste en un sistema lineal capaz de realizar movi-

mientos significativos en dos ejes y útil para el transporte del segundo sistema, encargado de realizar movimientos de mayor precisión. Este segundo sistema consta de una plataforma de 3 ejes con movimientos micrométricos. Ambos sistemas transportan la cánula que se encargará de realizar la inserción en la esclerótica, y por medio de estos sistemas, llegar a un punto específico en la retina para suministrar fármacos o bien realizar la extracción de coágulos.

2. Descripción del sistema

Se diseñó una estructura de soporte con las dimensiones necesarias para cubrir la cabeza y el cuello del paciente. Esta estructura sirve de soporte para un conjunto de guías lineales, que se encargan de transportar el sistema micrométrico y la cánula destinada a la inserción en la esclerótica. Para su fabricación, se utiliza un perfil estructural de 20 mm, un material de bajo costo que satisface las características estructurales necesarias para el sistema.

Considerando las medidas antropométricas del cuerpo humano, en particular, cabeza y cuello, se diseñó la estructura, considerando que las longitudes finales en los ejes Y (Largo) y X (Ancho) tienen un 15 % adicional a las medidas mencionadas. En cuanto al eje Z (Alto), se acopló a las dimensiones de las guías verticales lineales.

En la Figura 1 se muestran las medidas consideradas en el diseño. De acuerdo con la bibliografía consultada, las medidas antropométricas se presentan en la Tabla 1.

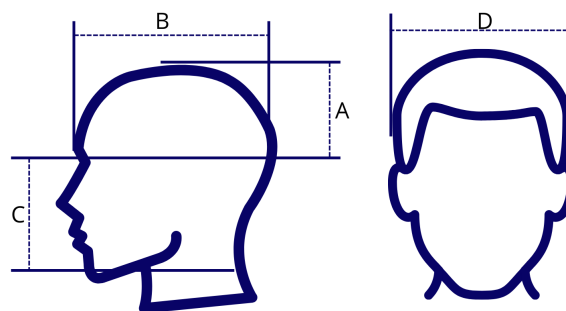


Figura 1: Dimensiones antropométricas.

Tabla 1: Medidas antropométricas de cabeza y cuello del cuerpo humano.

	A	B	C	D.
Dimensiones (mm)	127.0	165.0	130.0	210.0

Se implementaron tres guías lineales, dos de ellas verticales, con una longitud de movimiento efectivo de 150 mm. Estas guías se encuentran fijadas a la estructura, mientras que la restante, se encuentra colocada de forma horizontal y cuenta con 350 mm de movimiento efectivo. Las figuras 10 a 5 muestran vistas de las guías utilizadas para el movimiento horizontal y vertical.

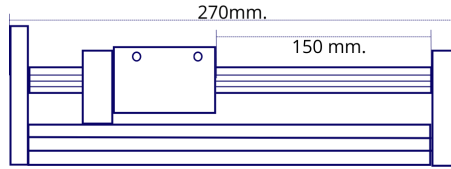


Figura 2: Guía lineal vertical.

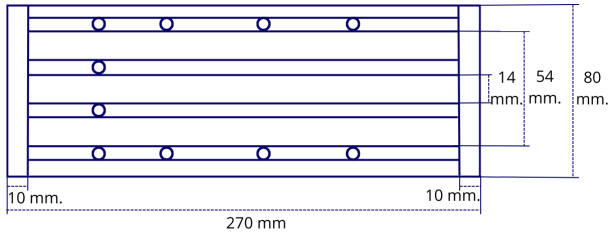


Figura 3: Guía lineal vertical, vista posterior.

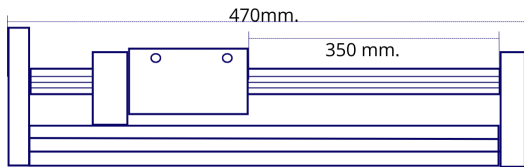


Figura 4: Guía lineal horizontal.

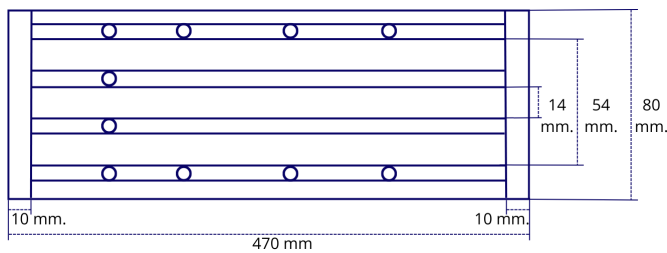


Figura 5: Guía lineal horizontal, vista posterior.

La figura 6 muestra la mesa de sujeción de las guías lineales utilizadas.

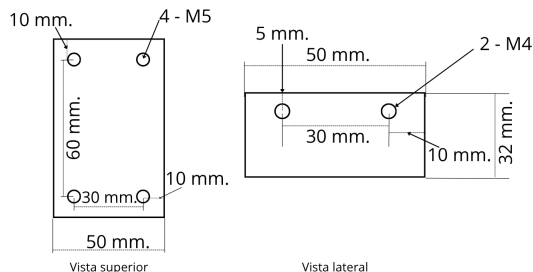


Figura 6: Mesa de las guías lineales, vista superior y vista lateral.

3. Desarrollo del prototipo virtual

Una vez seleccionadas las guías lineales, se ensamblan para formar un robot tipo cartesiano al que se le agregó, en el efector final, el elemento de canulación.

Como parte de la implementación del algoritmo de control, una vez diseñada la estructura, se empleó Simscape Multibody Resources (SMR), un software de Matlab que permite desarrollar el sistema de control del ensamble y visualizar su respuesta. Para realizar el diseño y el ensamble de las piezas que conforman el sistema robótico, se empleó el software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés), Autodesk Inventor Professional.

Una vez finalizado el ensamble de las piezas, se importó a SMR, donde se implementó un control proporcional-derivativo (PD). La estructura matemática empleada para el algoritmo de control se muestra en la ecuación (1). Para más información acerca del control, consultar (Mazzone, 2002).

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

donde e describe el error de seguimiento, dado por $e = x - x^*$ con x siendo la trayectoria de referencia y x^* la posición del sistema. K_p y K_d representan las ganancias proporcional y derivativa, respectivamente. $\frac{de(t)}{dt}$ es la derivada del error de seguimiento. La Figura 8 muestra el diagrama del control implementado. Esto se realiza para cada grado de libertad.

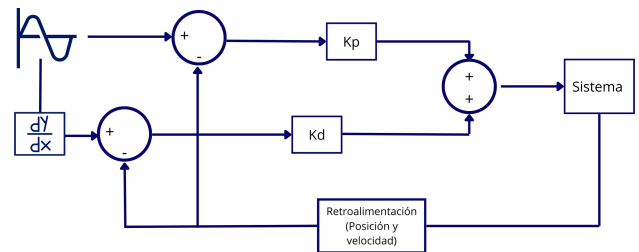


Figura 7: Sistema de control implementado.

Para la implementación del control en el ambiente de SMR, se mide la posición y la velocidad del sistema en cada uno de los grados de libertad y, mediante señales senoidales con distintas amplitudes y frecuencias, se indica la posición deseada de los grados de libertad. Estas señales se usan como referencias y, con el controlador PD, se obtiene una señal de fuerza que se inyecta al actuador de cada grado de libertad que se esté configurando, lo que modifica su posición y velocidad. Para determinar las ganancias aplicadas en cada grado de libertad, se realizan iteraciones para observar cuál presenta el mejor comportamiento necesario para el grado de libertad que se esté configurando. Las ganancias y señales empleadas para cada una de las juntas del sistema se pueden verificar en la Tabla 2.

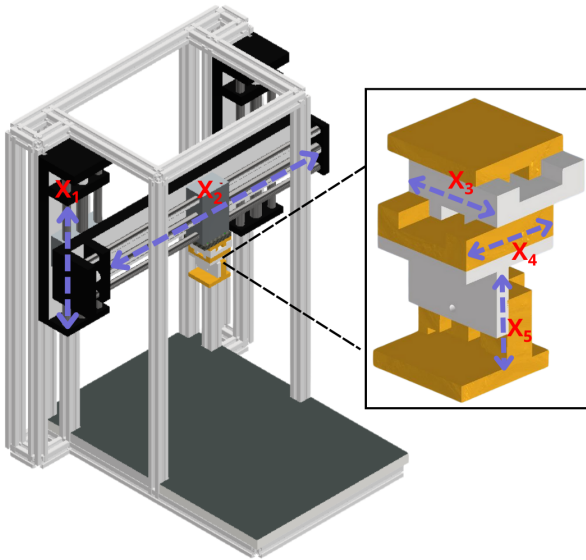


Figura 8: Grados de libertad del sistema.

Tabla 2: Señales y ganancias utilizadas en cada grado de libertad.

Grado de libertad.	Señal de referencia.	Kp.	Kd.
X_1	$0.077 \sin(t) + 0.073$	3700	110
X_2	$0.17725 \sin(t) + 0.17725$	50	3
X_3	$0.040 \sin(t)$	12	3
X_4	$0.0395 \sin(t) + 0.0005$	50	7
X_5	$0.01175 \sin(t) - 0.00725$	700	10

Dichas referencias se diseñaron de modo que el prototipo pudiera realizar un movimiento similar al que se realizaría durante la colocación sobre el rostro, posicionarse en el ojo y realizar la canulación.

4. Resultados

A continuación se presenta una explicación detallada de la estructura desarrollada y del sistema de control.

4.1. Estructura del prototipo

Considerando las medidas expuestas en la Tabla 1, y considerando un factor de seguridad del 15 %, se obtiene una estructura con las medidas reportadas en la Tabla 3.

Tabla 3: Largo y ancho de la estructura soporte.

	Medidas consideradas	Medida final (mm).
Largo	A, C y Cuello	378.5
Ancho	D	241.5

Para determinar la altura de la estructura, se tomó como referencia la medida "B" de la Tabla 1, ya que esta permite estimar el espacio mínimo requerido para un paciente. Asimismo, fue necesario tomar en cuenta la longitud total de las guías lineales verticales (Ver Figura 10). Con base en esta información y considerando las dimensiones del perfil, se obtuvieron las siguientes medidas finales de la estructura: 418.5 mm de largo,

290.0 mm de ancho y 538.0 mm de alto. En la figura 9 se observa la estructura diseñada, junto con sus medidas.

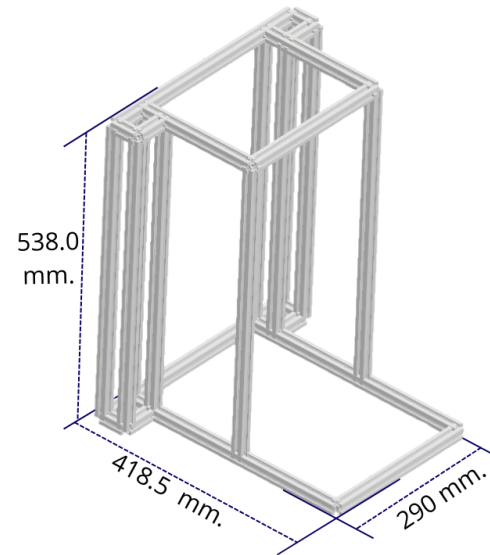


Figura 9: Estructura de soporte con medidas finales.

Es importante mencionar que, para la selección de la guía lineal horizontal, se determinó útil utilizar una con movimiento efectivo de 350 mm esto se debe a que al analizar la fijación de la pieza mencionada, a las guías lineales verticales, se constató la necesidad de utilizar una pieza con una longitud mínima de 450 mm para poder garantizar la fijación de esta guía lineal al resto del sistema, siendo esta la principal causa por la que el ancho de la estructura tuvo una ligera ganancia.

En la altura de la estructura, la guía lineal puede llevar la cánula 100 mm por encima de la medida antropométrica reportada en la bibliografía. Lo anterior se realizó como medida de seguridad. Asimismo, es capaz de descender 50 mm por debajo de la medida reportada en la bibliografía. (Medida "B" de la Tabla 1).

Las medidas anteriormente mencionadas, no contemplan los soportes donde se fijarán las guías verticales, por lo que se diseñó una estructura auxiliar adyacente a la principal, que tendrá la capacidad de mantener fijas las guías lineales, así como soportar los pesos de los mismos. Para las características de estas estructuras, se tomaron en cuenta las dimensiones de la guía lineal en la parte posterior (Ver Figura 3). Asimismo, se buscó asegurar la coincidencia entre los orificios de fijación de la guía lineal y los de la estructura, a fin de garantizar una sujeción adecuada que permita resistir las fuerzas ejercidas por los elementos, como se muestra en la Figura 10.

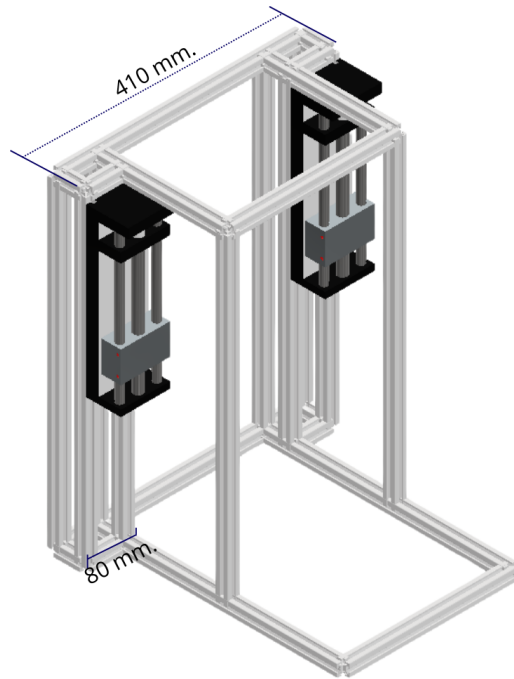


Figura 10: Ensamble con guías lineales verticales.

Una vez fijadas las guías verticales, se procedió al ensamble de la guía horizontal. Por lo cual, dentro del diseño, se buscó la coincidencia entre los orificios de fijación de la mesa y los orificios de fijación de la mencionada guía lineal (Ver Figuras 5 y 6). Para lograrlo, fue necesario diseñar una placa de acoplamiento que permitiera el ensamble entre la guía lineal horizontal y la mesa. Esta placa cuenta con un espesor de 7 mm y ocho orificios, de los cuales cuatro son para la sujeción a la mesa vertical y el resto para la sujeción de la guía lineal (Ver Figura 11).

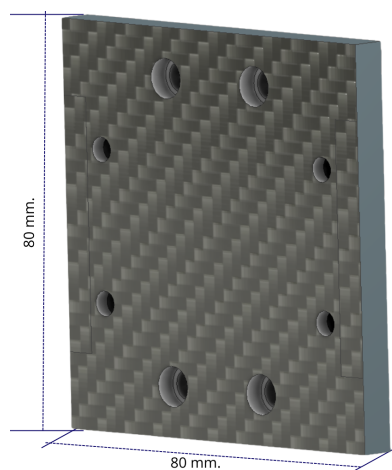


Figura 11: Placa de sujeción para la guía lineal horizontal.

Posteriormente, se realizó el ensamble de una plataforma de desplazamiento micrométrico comercial, capaz de realizar desplazamientos con una resolución mínima de 0.01 mm gracias al diseño de su mecanismo interno y, de igual forma, se diseñó una placa que permite el ensamble de esta plataforma con el resto del sistema.

Finalmente, se diseñó el soporte para la cánula, que será la

encargada de realizar los procedimientos en la retina. Asimismo, se realizó el ensamble de un fondo para la colocación del paciente. Dicho soporte se muestra en la Figura 12.

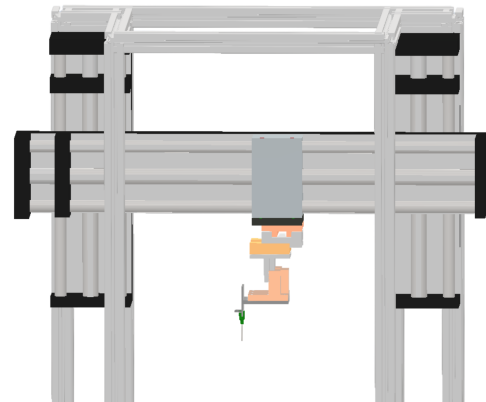


Figura 12: Placa de sujeción para la guía lineal horizontal.

4.2. Control

En la etapa de control, el PD implementado cumple con lo requerido en la mayoría de los grados de libertad del sistema. Se presenta un seguimiento de trayectoria estable, con un error de seguimiento cercano a 0.002 mm, que se puede reducir utilizando ganancias K_d y K_p optimizadas, pero que ya no se realizó en este trabajo. (Ver Tabla 2).

Como parte de los resultados del control implementado, la Figura 13 muestra el seguimiento de trayectoria para el primer grado de libertad, donde se observa que la posición medida de este grado de libertad (PD X1), correspondiente al movimiento vertical de la estructura, converge a la trayectoria diseñada (Referencia X1).

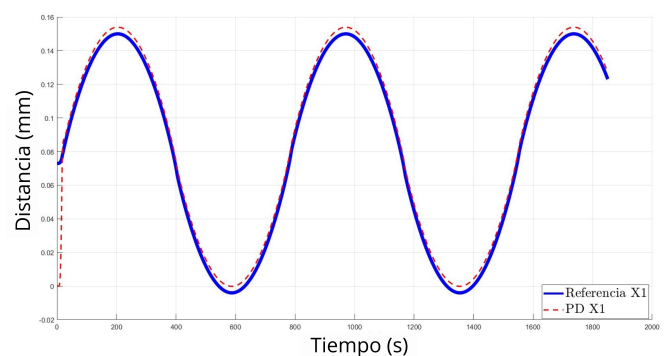


Figura 13: Respuesta del control para el primer grado de libertad con su respectiva señal de seguimiento.

Respecto al grado X_5 , el control PD cumple con las expectativas, presenta una buena respuesta y seguimiento a la señal de referencia (Ver Figura 14).

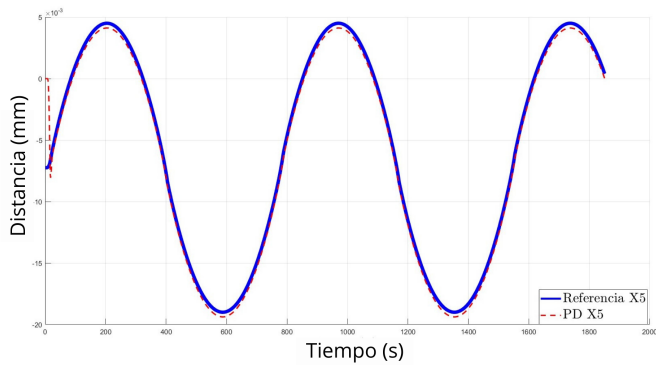


Figura 14: Respuesta del control para el último grado de libertad con su respectiva señal de seguimiento.

La Figura 15 muestra los errores de seguimiento de los dos grados de libertad. Donde se observa que ambos se encuentran alrededor de cero. Como trabajo a futuro, se implementará el control con el elemento integral para reducir el error en estado estable.

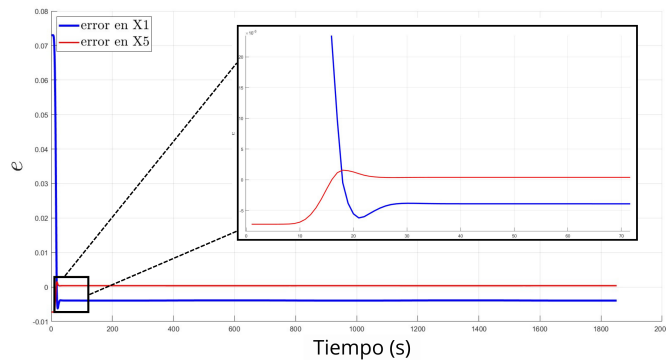


Figura 15: Errores de seguimiento para el primer y último grado de libertad.

Para mostrar los resultados en conjunto de todo el movimiento realizado por los cinco grados de libertad, se muestra en la Figura 16 la norma del error de seguimiento, calculada con los errores de todos los grados de libertad.

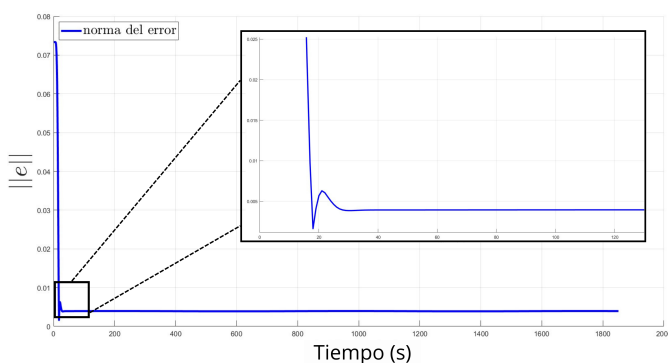


Figura 16: Norma del error de seguimiento.

En la mayoría de las trayectorias es observable un seguimiento adecuado, presentando únicamente algunas oscilaciones iniciales que tienen una amplitud menor a 0.002 mm las cuales no son significativas.

5. Conclusiones

En este trabajo se mostró el diseño de una estructura para un prototipo de robot micromanipulador con aplicaciones en cirugía de retina. Dentro del desarrollo se presenta el ensamble de un robot de cinco grados de libertad, tres cartesianos y dos del efector final. El diseño se realizó en un software CAD, dicho modelo se importó a Matlab para implementar un control PD para el seguimiento de trayectorias y simular un movimiento que se podría realizar para el funcionamiento del robot. Se presentaron también los resultados de la simulación numérica con dicho controlador.

Referencias

- AcuSurgical (2017). From idea to prototype: The genesis of luca, a unique robot for retinal surgery. <https://www.acusurgical.com/post/from-idea-to-prototype-the-genesis-of-luca-a-unique-robot-for-retinal-surgery>.
- Chiang Rodríguez, C., Chirino Chiang, A. A., Puertas, I. F., Lapido Polanco, S., y Toledo González, Y. (2023). Alternativas de tratamiento de la obstrucción venosa retiniana: terapias combinadas y vitrectomía pars plana. *Revista Cubana de Oftalmología*, 36.
- Fernandez, V. (2017). Principales causas de enfermedad de la retina. <https://fernandez-vega.com/blog/enfermedades-de-la-retina/>.
- Garrity, J. (2022). Estructura y función de los ojos. <https://www.msdmanuals.com/es/hogar/trastornos-oft>.
- Gijbels, A., Smits, J., Schoevaerds, L., Willekens, K., Vander Poorten, E. B., Stalmans, P., y Reynaerts, D. (2018). In-human robot-assisted retinal vein cannulation, a world first. *Annals of biomedical engineering*, 46(10):1676–1685.
- Hernández, E. G. y Wiechers, E. G. (2019). *Oftalmología en la práctica de la medicina general*. Mc Graw Hill, México, Ciudad de México.
- IDF (2021). Number of adults (20–79 years) with diabetes in mexico (mx). <https://diabetesatlas.org/data-by-location/country/mexico/>.
- IMSS (2013). *Diagnóstico y Tratamiento de Oclusión Venosa de Retina*. Instituto Mexicano del Seguro Social, México.
- IMSS (2014). *Detección de retinopatía diabética en primer nivel de atención*. Instituto Mexicano del Seguro Social, México.
- Mazzone, V. (2002). Controladores pid. *Universidad Nacional de Quilmes*.
- Noguez, R., A. A. y T. S. (2024). La retina como reflejo de la salud. *Ciencia*.
- Woong, K. J., Peiyao, Z., Peter, G., Iulian, I., y Marin, K. (2023). Micromanipulation in surgery: Autonomous needle insertion inside the eye for targeted drug delivery. *ArXiv*.