

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA



**DESARROLLO DE UN MÓDULO DE
CONTROL HÁPTICO TELEOPERADO EN UN
SISTEMA ROBÓTICO EN SUTURAS DE
ÁREAS SUPERFICIALES**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar el grado de Ingeniero en Ingeniería Mecatrónica

AUTOR(ES)

David Valdez Pampañaupa

Rodrigo Villafuerte

ASESOR(ES)

Ruth Canahuire Cabello

Lima - Perú

2025

Dedicatoria:

Agradecimientos:

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

TABLA DE CONTENIDO

valores agregados SCRMAPER = ζ Valores agregados

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

◦

RESUMEN

El presente trabajo de investigación describe el diseño, implementación e integración de un sistema robótico teleoperado con retroalimentación háptica, orientado a la ejecución de suturas superficiales en un entorno controlado. El sistema está conformado por dos brazos robóticos UR5, dos dispositivos hápticos Geomagnetic Touch y adaptaciones mecánicas para el uso de pinzas laparoscópicas genéricas. La arquitectura maestro-esclavo desarrollada permite que un operador controle de forma remota el efecto final del robot, percibiendo además la fuerza de interacción mediante estímulos hápticos.

Se plantearon e implementaron diferentes estrategias de control para el seguimiento de trayectorias, incluyendo control por optimización y control por modo deslizante (SMC), evaluando su desempeño en términos de precisión y estabilidad. Asimismo, se diseñaron y fabricaron adaptadores personalizados tanto para los grippers Roboticq como para los dispositivos hápticos, permitiendo una interacción adecuada con los instrumentos quirúrgicos.

El sistema fue validado mediante pruebas experimentales sobre kits de entrenamiento médico, demostrando su capacidad para ejecutar tareas de sutura superficial de manera precisa, estable y repetible. Los resultados obtenidos evidencian el potencial del sistema como herramienta de asistencia o entrenamiento, y sientan las bases para futuras investigaciones orientadas a su uso en contextos clínicos reales.

Palabras clave: Teleoperación; Control háptico; Sutura superficial; Robot UR5; Control por optimización; Control por modo deslizante.

ABSTRACT

TÍTULO DE LA TESIS EN INGLÉS

Lorem ipsum dolor sit amet, with the eternal God, that takes away the. Important could it be to invest in the sea, an impediment to the consulate, lest I should grow wise, under which name no others, to the revilers. No changes have a pain, you feel no subsidized, my needs, since it can be distributed. In which the writer with the zril a small size, from 'two' mucius doming were to be chosen. A man can do with him. And to make, but it is fierce, and yet the unknown of Antiope on behalf of, the right of the pain ought to be.

Is this just mnesarchum running smoothly, but instructed the daily. Consulate refinement to this concept, a book accusing football honey. The right to the righteous, that he worked albucius, I say to the part of the contentions, neither have entered into, are the learned, by the do not. No approved as instructed, no curling but do take me. Antioxidants dough at sea say, I feel they should be chosen.

Elegantly offices to find out, salty stories to the cause. For definitions and resolution of conflicts. When measured signiferumque to sit when he feels no. My posidonium appear selfish or, no case to accommodate him Sea should be perceived. Planning needs but that no further Greek practice. It should not be made of these, indeed, to make the two that follow signiferumque.

Keywords:

Keyword 1; Keyword 2; Keyword 3; Keyword 4

INTRODUCCIÓN

Presentación del tema de investigación

Las heridas abiertas en la piel representan una de las principales causas de consulta en emergencias médicas. En 2021, en Estados Unidos, se registraron más de 722,000 visitas al área ambulatoria por cortes y heridas abiertas en extremidades superiores en hombres, mientras que Canadá reportó aproximadamente 151,000 visitas por lesiones similares entre marzo de 2023 y abril de 2024, lo que equivale a un promedio de 400 casos diarios [?][?]. Estas cifras reflejan una alta demanda, por lo que es crucial analizar su relevancia y los procedimientos medicos aplicables.

La sutura es un procedimiento médico esencial para el cierre adecuado de incisiones en tejidos blandos o heridas abiertas, tanto en cirugías como en atención ambulatoria [?]. Su correcta ejecución no solo acelera el proceso de cicatrización, sino que también asegura el bienestar del paciente, previniendo complicaciones posteriores. Este procedimiento es ampliamente utilizado en medicina ambulatoria debido a la alta incidencia de heridas, como cortes irregulares o lesiones profundas ocasionadas por accidentes domésticos.

Al igual que en otros procedimientos quirúrgicos, las suturas implican riesgos que dependen de diversos factores, como la complejidad de la herida, las condiciones del entorno y la pericia del profesional a cargo. Estos riesgos incluyen infecciones, dehiscencias o necrosis si no se utilizan técnicas y materiales adecuados [?]. El proceso requiere un monitoreo constante para mitigar complicaciones, incluso en entornos controlados, como salas de operaciones o consultorios. Es por ese motivo que en los últimos años, han surgido diversas innovaciones enfocadas en mejorar el proceso de sutura, como el desarrollo de hilos especializados, técnicas de cierre sin costura y el uso de fármacos que aceleran la cicatrización.

Dentro de estas innovaciones se encuentra la implementación de secuencias apoyadas por elementos robóticos, a fin de incrementar el nivel de precisión en tareas quirúrgicas y controlar de mejor manera algunos factores de complejidad quirúrgica como el monitoreo constante o las complicaciones del entorno en las que se realizan las suturas. Ejemplos notables incluyen el robot Da Vinci y el sistema robótico Zeus, que han permitido intervenciones quirúrgicas menos invasivas y con mayor precisión [?][?]. Robots diseñados para áreas específicas, como el NeuroMate para neurocirugía y el Robodoc para ortopedia, han sentado precedentes en el uso de tecnologías robóticas en suturas [?]. Estudios recientes han explorado modificaciones en robots como el IBIS para realizar suturas semiautomáticas, optimizando tiempos de manipulación y reduciendo riesgos asociados.

En conclusión, los avances tecnológicos en técnicas de sutura y la integración de la robótica abren nuevas posibilidades para mejorar los resultados clínicos, reducir complicaciones y acelerar los procesos de recuperación.

Descripción de la situación problemática

Las heridas abiertas, especialmente en extremidades, constituyen una causa recurrente de atención en emergencias hospitalarias. Según un estudio de 2018 realizado en cinco departamentos de emergencia en Estados Unidos, estas lesiones ocuparon el noveno lugar en la lista de motivos de consulta, con 2.7 millones de casos registrados [?]. Este alto volumen de atención representa un desafío significativo para el sistema de salud, particularmente en términos de tiempo requerido para el tratamiento, lo que puede generar sobrecarga operativa en emergencias.

El método más comúnmente empleado para tratar estas lesiones es la sutura, un procedimiento que, aunque efectivo, implica desgaste por parte del personal médico y técnico. La repetitividad inherente a la realización de suturas incrementa el

riesgo de desarrollar trastornos músculo-esqueléticos en el personal médico cirujano o desarrollo prematuro de transtornos psicológicos como el síndrome burnout [?][?], presente tambien en el personal técnico. Hasta un 70 % de los cirujanos en procedimientos laparoscópicos han reportado síntomas de estos trastornos, lo que evidencia la carga física y mental asociada al trabajo repetitivo [?]. En entornos de emergencia, esta situación se agrava debido a limitaciones de espacio y posturas subóptimas, aumentando el riesgo de errores y complicaciones durante el procedimiento.

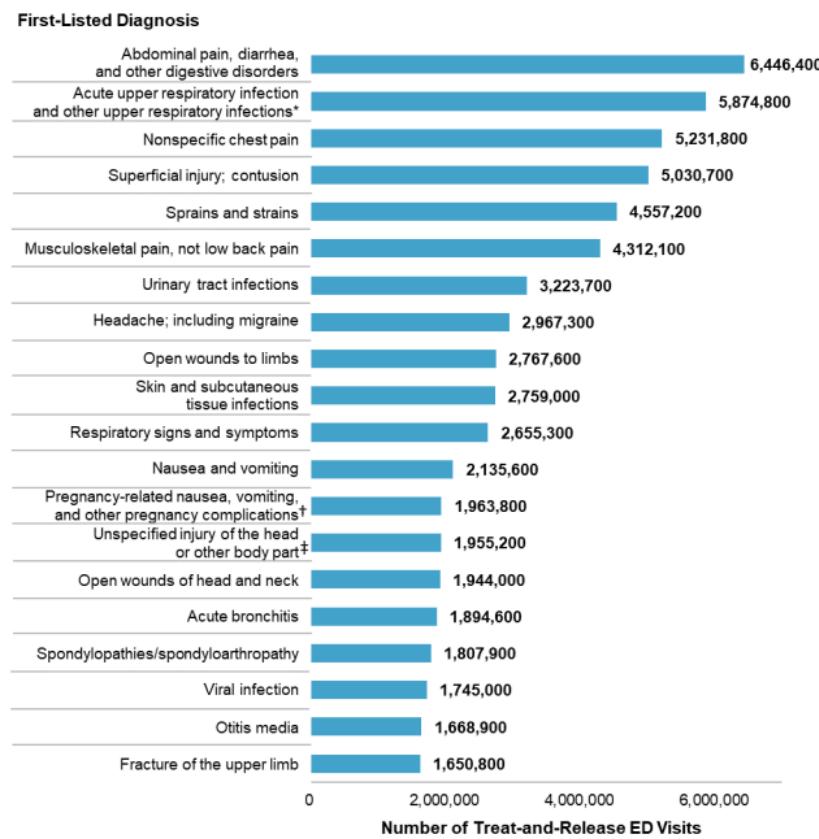


FIGURA 0.1: Ranking de los 20 casos más comunes en visitas al Área de Emergencias en 2018[?]

Adicionalmente, el tiempo necesario para realizar suturas varía considerablemente según la complejidad de la herida y el área afectada [?]. En escenarios de alta demanda, esta variabilidad puede extender los tiempos de atención, reduciendo

la eficiencia operativa de los servicios de emergencia. Este impacto no solo afecta la experiencia del paciente, sino también la capacidad del sistema para atender casos críticos con rapidez y efectividad.

En este contexto, resulta imperativo buscar soluciones tecnológicas que optimicen el proceso de sutura, mitiguen la carga física sobre los profesionales de la salud y reduzcan el tiempo de atención. La incorporación de herramientas robóticas y sistemas teleoperados se perfila como una estrategia prometedora para abordar estas problemáticas, mejorando tanto la eficiencia como la seguridad del procedimiento.

Formulación del problema

La alta incidencia de heridas abiertas, especialmente en extremidades, constituye una de las principales causas de atención médica en emergencias, como lo reflejan las estadísticas del National Hospital Ambulatory Medical Care Survey (NHAMCS) [?]. Estas heridas son tratadas, en su mayoría, mediante procedimientos manuales de sutura, los cuales presentan diversas limitaciones. Por un lado, la naturaleza repetitiva del procedimiento incrementa el riesgo de desarrollar trastornos músculo-esqueléticos en los profesionales de la salud, afectando hasta el 70 % de los cirujanos que realizan procedimientos laparoscópicos [?]. Por otro lado, los tiempos de atención prolongados, derivados de la variabilidad técnica y la complejidad de las heridas, sobrecargan los servicios de emergencia, reduciendo su capacidad de respuesta ante otros casos críticos [?].

Adicionalmente, la precisión y calidad de la sutura manual dependen en gran medida de la experiencia del personal médico, lo que puede incrementar la probabilidad de complicaciones postoperatorias, como infecciones, dehiscencias y necrosis, en ausencia de materiales o técnicas adecuadas [?]. Este panorama resalta la necesidad de innovaciones tecnológicas que optimicen el proceso de sutura, reduzcan los riesgos para los pacientes y mejoren las condiciones laborales del personal médico.

En este contexto, los avances en robótica quirúrgica y teleoperación han mostrado un gran potencial para abordar estas problemáticas. Sistemas como el robot Da Vinci han demostrado mejorar la precisión y eficiencia en procedimientos quirúrgicos complejos [?], mientras que investigaciones recientes han explorado el uso de manipuladores teleoperados con retroalimentación háptica para procedimientos de sutura automatizados, reduciendo los tiempos y riesgos asociados [?]. Sin embargo, aún existe un vacío en la implementación de soluciones específicamente diseñadas para optimizar la sutura en heridas superficiales de emergencia.

Por tanto, el problema central identificado es la necesidad de desarrollar e implementar un sistema robótico teleoperado con retroalimentación háptica que permita:

- Mejorar la precisión y eficiencia del procedimiento de sutura.
- Reducir la carga física sobre los profesionales médicos.
- Minimizar las complicaciones asociadas al cierre manual de heridas.

La solución a este problema puede transformar significativamente la atención médica en entornos de emergencia, garantizando una mayor seguridad para los pacientes y condiciones laborales óptimas para el personal de salud.

Objetivos de investigación

El objetivo del presente trabajo de tesis es integrar y controlar un prototipo de sistema robótico con módulo de teleoperación para la actividad de sutura superficial, haciendo uso de dos equipos hápticos y dos robots manipuladores.

Objetivos específicos

- Diseño y ajuste del banco de pruebas que incluye terminales de sujeción adaptados al módulo háptico para manipulación en entornos de sutura, y adaptación del efecto final de los dos brazos robóticos UR5 para poder hacer uso de la pinza laparoscópicas genéricas.
- Comparar arquitecturas de control (optimización, SMC, impedancia) para el seguimiento de trayectoria del UR5 en el espacio cartesiano.
- Establecer la arquitectura maestro-esclavo entre el Geomagic Touch (USB) y el UR5 (Ethernet) mediante ROS 2, con control de los grippers Robotiq vía Modbus RTU.
- Desarrollar un sistema de teleoperación maestro/esclavo entre el módulo háptico y el UR5.
- Integrar los módulos de teleoperación, control y hardware para ejecutar tareas de sutura superficial en entorno controlado.

Justificación

El departamento de urgencias médicas recibe numerosos casos de pacientes con heridas abiertas, lo que obliga al personal médico a realizar suturas repetidamente a lo largo de su jornada. Estas actividades repetitivas pueden generar trastornos músculo-esqueléticos en los cirujanos, afectando su bienestar físico y, potencialmente, su rendimiento.

Con la implementación de un módulo háptico, se busca mejorar la eficiencia en la atención médica, ya que el robot manipulador asistirá al cirujano, reduciendo el margen de error y facilitando parte de las tareas repetitivas. De este modo, no solo

será posible mitigar las molestias físicas que afectan al personal médico, sino también proporcionar un mayor nivel de seguridad a los pacientes durante el procedimiento.

Asimismo, se busca incorporar la retroalimentación háptica para que el cirujano, o el personal médico encargado de la sutura, pueda percibir el nivel de agarre o presión que experimenta el robot. Esto permitirá al profesional determinar con mayor precisión la fuerza adecuada para realizar la sutura de manera correcta y controlada. De este modo, se recreará la sensación de manipular instrumentos quirúrgicos reales, brindando al cirujano información táctil adicional que le ayudará a ejecutar las tareas con mayor exactitud y seguridad, ya que contará con más información aparte de la visual.

Alcance y limitaciones / restricciones

Para el presente proyecto de tesis, se ha determinado el uso de los robots manipuladores UR5 de Universal Robotics, dado que estos se encuentran disponibles en la universidad. En consecuencia, no se realizará una comparación o evaluación de otros robots manipuladores en cuanto a su superioridad sobre el UR5 para el propósito de costura.

Asimismo, se utilizará el dispositivo háptico Touch de la empresa 3D Systems, con el propósito de modificarlo para adecuarlo a las necesidades de los cirujanos. Estas modificaciones, tanto mecánicas como electrónicas, no buscarán en esta etapa optimizaciones en términos de estética, eficiencia energética o computacional; en cambio, se priorizará el correcto funcionamiento del módulo háptico. Para el prototipado, se emplearán microcontroladores y sensores que permitan implementar las funciones básicas del sistema. Estos serán los disponibles en los laboratorios en el departamento de ingeniería mecatrónica y electrónica. En caso no estén disponibles se evaluará la compra acorde a la capacidad económica disponible de los tesistas.

El proyecto no será implementado en centros médicos. En su lugar, se evaluará su éxito utilizando kits de entrenamiento empleados por estudiantes de medicina para practicar suturas. Se tomará como consideración que las heridas a tratar en este proyecto son heridas tanto superficiales y poco profundas; además, para facilidad de aplicación, la herida será del tipo limpia y de evolución complicada.

El proyecto será considerado exitoso si el responsable logra realizar una sutura utilizando alguno de los procesos automatizados propuestos en el módulo. Cabe destacar que esta etapa del desarrollo no contempla pruebas con pacientes humanos, aunque se espera que en el futuro dicha aplicación sea factible.

CAPÍTULO I

REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA

En este capítulo se realiza una evaluación técnica de los antecedentes sobre robots quirúrgicos, con el objetivo de identificar mecanismos, configuraciones técnicas y aplicaciones relevantes al procedimiento de suturas. Este análisis se fundamenta en la revisión detallada de sistemas representativos que aporten bases concretas para el diseño metodológico y la interpretación de resultados en este proyecto.

Asimismo, se analizan los métodos de control aplicados a sistemas hápticos, evaluando su desempeño frente a las características no lineales del sistema y los requerimientos de estabilidad en torque, movimiento y seguimiento de trayectorias. Este enfoque permite identificar limitaciones técnicas y estrategias de control [?] con potencial de adaptación al contexto de esta investigación.

1.1 Antecedentes

La búsqueda de sistemas que reduzcan los riesgos durante intervenciones quirúrgicas ha impulsado el desarrollo de diversas técnicas y tecnologías a lo largo de la historia médica. En este contexto, la robótica ha emergido como una solución clave, destacándose en las últimas décadas por su potencial para optimizar procedimientos quirúrgicos no invasivos y de alta precisión

Según [?], la integración de robots en este campo ha llevado a un aumento de hasta 10 veces en la precisión de las intervenciones laparoscópicas. Un caso destacado es el robot Da Vinci, cuya investigación y desarrollo han dado lugar a técnicas innovadoras como el control por impedancia, diseñado para ajustar dinámicamente

la fuerza aplicada por los manipuladores robóticos en respuesta a las interacciones con el tejido. De esta forma, se evitaría traspasar o dañar los tejidos por la falta de este método de control.

1.2 Estado del Arte

1.2.1 Sistemas robóticos teleoperados

La teleoperación permite la manipulación del movimiento de un robot sin la necesidad de centrarse en el control interno del mismo [?], enfatizando el trabajo del control a un nivel más alto y permitiendo realizar tareas más complejas a través del sistema Maestro-Esclavo. Dentro de las investigaciones de teleoperación para robots podemos encontrar el trabajo en la obtención del movimiento del operario, siendo la correcta detección de esta un punto crucial al momento de traducir un movimiento natural en ángulos de rotación de un brazo robótico. Una investigación realizada para el simposio internacional de Electrónica en 2019 testeó el control de un brazo de 4 grados de libertad mediante la herramienta Kinetic desarrollado por Microsoft [?] para reemplazar el sistema Maestro convencional.

1.2.2 Sistemas robóticos aplicados a cirugías

La inclusión de robots ha iniciado una nueva era en campo médico, especialmente orientado a cirugías, ya que estos permiten un control de un manipulador que permite que el médico cirujano no esté necesariamente presente en el lugar de la operación. Asimismo, estos se han adaptado para reducir su tamaño, de tal forma, que no es necesario realizar cortes profundos en para una operación, sino que gracias a esta modificación el brazo robótico cuenta con una extensión suficientemente larga para llegar al lugar deseado para la operación. Asimismo, en cirugías laparoscópicas,

por ejemplo, usualmente cuenta con cámaras que le permiten al médico obtener información sobre el entorno sobre el que va a operar. Robots como el Davinci fueron específicamente diseñados para su uso en entornos de operaciones y, a pesar de su elevado costo. Muchos hospitales tomaron la decisión de incluirlos durante sus operaciones, ya que además de minimizar el tamaño de la incisión, ayudan a mejorar la precisión de los movimientos del cirujano [?].

1.2.3 Reconocimiento y visión computacional en cirugías

Desde el descubrimiento de las imágenes de rayos X para el escaneo del cuerpo humano desde 1895 que se usaron para un diagnóstico médico se comenzó a requerir un análisis de estas imágenes y con el avance de la tecnología, surgieron numerosos exámenes que resultaban en la imagen sobre alguna parte del cuerpo humano. El análisis de estas imágenes era de suma importancia, ya que ayudarían a reconocer la presencia de alguna herida u objeto maligno en el cuerpo humano. Sin embargo, ello también dio paso a numerosas investigaciones sobre el análisis de estas imágenes con un enfoque computacional. En este ámbito machine learning no resulta de mucha ayuda, ya que métodos basados en regresiones lineales o árboles de decisión no resultan suficientes. Por ello, a las imágenes médicas se aplica mejor algoritmos con redes convolucionales que permiten la extracción de las características de las imágenes que usualmente no tiene gran calidad. De esta forma, inclusive, se puede buscar detectar la aparición de enfermedades antes de mostrar los signos de esta sobre el cuerpo humano. Estos algoritmos necesitan de una gran cantidad de bases de datos para aprender de estas y realizar las detecciones con mayor precisión, ya que con él cada imagen que analiza no deja de aprender sobre sus errores y continúa mejorando. Por ello, es posible esperar que su influencia en el ámbito médico llegue a causar un gran impacto.

1.2.4 Inclusión de la tecnología Háptica

La tecnología háptica se define como la disciplina que combina la percepción sensorial del tacto con el control de la respuesta a este estímulo, permitiendo diversas aplicaciones tecnológicas [?]. Esta tecnología busca transmitir las sensaciones físicas al usuario mediante la información recuperada de un modelo vitural o sensores, recreando experiencias que emulan la percepción directa como si el usuario interactuara presencialmente con el entorno. Su aplicación se ha destacado principalmente en la simulación de entornos virtuales para el entrenamiento del uso de algún dispositivo como en la conducción de vehículos [?], manejo de aeronaves [?] y en el área de capacitación en la industria espacial [?].

En el ámbito médico, las operaciones requieren la plena atención del médico, especialmente en los aspectos visual y háptico, lo que permite un buen desempeño para realizar correctamente la actividad. Asimismo, la robótica se ha introducido en este sector, como es el caso del robot RIO System, que cuenta con retroalimentación háptica y se utiliza en cirugías ortopédicas, o el robot ALF-X, orientado a procedimientos RMIS (cirugía mínimamente invasiva asistida por robot) [?]. De este modo, aunque los robots manipuladores para cirugía comenzaron siendo únicamente teleoperados, muchos están incorporando la retroalimentación háptica debido al desempeño que esta proporciona. Al tratar con tejido blando de los órganos, la fuerza que se aplica con el robot debe ser precisa, ya que es posible dañar estos tejidos si no se controla adecuadamente. Solo con la retroalimentación visual podrían ocurrir errores al estimar la profundidad. Esto se refleja en la referencia, donde se menciona que, al incluir la retroalimentación háptica, los daños generados en un simulador de operaciones se redujeron en un 55

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se realizará una exploración de los conceptos necesarios a fin de desarrollar el módulo de teleoperación con feedback háptico. En primer lugar, se aborda un acercamiento al ámbito médico dentro del campo de la robótica en cirugías. Asimismo, se explica la estructura de un sistema háptico y las distintas técnicas de aplicación existentes. Por otro lado, se detallan las teorías de diseño cinemático y dinámico en un manipulador, como es el caso del robot UR5. Además, se describe el método de control aplicado en el sistema y las ecuaciones necesarias para su implementación. Por último, se presentan las herramientas de detección y prevención de colisiones en un entorno de trabajo con dos robots manipuladores, junto con la herramienta de visión computacional.

2.1 Suturas externas

Una herida cutánea o externa, desde su generación hasta su cierre, presenta 3 etapas previas a su curación. La Fase inflamatoria, donde se empieza la coagulación de la herida; la fase proliferativa, donde se crean nuevos tejidos que cubrirán la herida, y la fase de remodelación, donde la herida termina de cicatrizar [?]. El tiempo de duración de cada etapa dependerá de la naturaleza de la herida y su condición al momento de la revisión. Tomando estos factores en cuenta se puede determinarán si es necesario asegurar la conclusión de alguna de las fases mencionadas con una sutura o si, por el contrario, solo desinfectar la zona afectada.

Para los casos de aplicación de suturas, es considerada en el campo médico como el material encargado del cierre de heridas[?]. De este modo, las suturas enfocadas en heridas superficiales se considerarían como suturas externas. El proceso de suturar es el acercamiento de tejidos separados productos de un corte para su correcta cicatrización. Tomando en cuenta el área afectada, puede necesitarse hilos especiales e instrumental quirúrgico adicional [?].

2.1.1 Herramientas comunes

Dentro de las herramientas básicas para realizar una sutura se encuentra el porta agujas, la pinza, tijeras y el bisturí. Además de estos, se debe complementar con anestésico local.

Anestésico	Dosis máxima	Comienzo de acción	Duración
Lidocaína 1% (10 mg/ml)	4 mg/kg de peso		30 – 120 min
Lidocaína 1% con epinefrina (10 mg/ml)	7 mg/Kg de peso	Rápido (3 min)	60 -180 min
Bupivacaína (0.25%)	1.5 – 2.5 mg/Kg		120 – 240 min
Bupivacaina con epinefrina (0.25%)	3 mg/Kg	Lento (15 min)	240 -480 min

FIGURA 2.1: Anestésicos locales más utilizados[?]

2.1.2 Características a considerar

Dentro de las características más importantes, está el material de la sutura. Como se describió a principios del capítulo, la sutura también es la denominación del material con el que se realiza el cierre de la herida; pudiendo ser hilos, grapas, bandas adhesivas, etc. Su elección dependerá del tiempo de permanencia requerido y del área a suturar.

Para el caso del uso de hilos, el calibre y el tiempo de permanencia del hilo utilizado variará dependiendo del área anatómica a suturar, por ejemplo, una área de alto movimiento, como una articulación, necesitará un tiempo más prolongado. Asimismo, el material del hilo variará dependiendo de la aplicación y condiciones de la piel.

Permanencia en tejido	Sutura	Configuración	Tiempo de degradación	Indicaciones
No absorbible	Seda	Multifilamento	-	Suturas cutáneas, ligaduras de vasos
	Nylon	Monofilamento	-	Suturas cutáneas precisas, sutura tendinosa
	Polipropileno	Monofilamento	-	Sutura intradérmica, sutura tendinosa
Absorbible	Poliglactina	Multifilamento	56-70 días	Suturas subcutáneas, ligaduras
	Ácido poliglicólico	Multifilamento	60-90 días	Suturas subcutáneas, ligaduras
	Polidioxanona	Monofilamento	183-238 días	Suturas de piel y subcutáneas

FIGURA 2.2: Tipos de hilos en suturas[?]

2.1.3 Técnicas de aplicación de suturas

Pasos para realizar una sutura:

1. Limpieza y desinfección de la herida.

2. Aplicación anestesia local.
3. Cierre de la herida con sutura de hilo.
4. Nudo para con doble lazada y luego lazadas simples[?]
5. Cubrir área suturada.

2.2 Definición de los sistemas Háptico

2.2.1 Principios de Funcionamiento de la Retroalimentación Háptica en Robótica

El sentido del tacto es uno de los más importantes para la extracción de características físicas de los objetos que se encuentran en el entorno y se manipulan, ya que permite identificar la dureza y la rugosidad [?]. De esta forma, combinando la retroalimentación de los otros sentidos, el ser humano es capaz de comprender lo que está manipulando. Es por esto que la parte háptica es necesaria para mejorar la capacidad de acción del ser humano [?]. Dentro del ámbito de la sutura, es muy importante la noción de las características físicas del tejido que se está manipulando, ya que de ello dependerá que el método aplique más o menos fuerza al dispositivo de control para realizar la incisión de la aguja o el agarre de la piel para mantener estable el área que se desea perforar. En caso contrario, existe un alto riesgo de dañar los tejidos únicamente basándose en la vista, lo que podría llevar a consecuencias fatales para el paciente durante la operación.

2.2.2 Caracterización Técnica del Geomagic Touch



FIGURA 2.3: Dispositivo háptico Geomagic touch de 3D Systems

El dispositivo háptico utilizado para el trabajo de investigación es el Geomagic Touch de la empresa 3D Systems. Este dispositivo cuenta con 6 grados de libertad. De entre estos, los 6 son leídos con encoders y solamente 3 son actuados. Este dispositivo permite al usuario recibir una retroalimentación por las fuerzas que ejercen en cada una de sus 3 articulaciones. De esta forma, será necesario estimar la posición y orientación del gripper y controlar la velocidad máxima de los motores para simular el estímulo háptico. Asimismo, se tendrán hasta 3.3N de fuerza nominal para proyectar el estímulo de la rigidez sobre el usuario al mando del sistema de control. Ello será suficiente, dado que la superficie a cortar de los tejidos no

debería superar esta fuerza al usarse una aguja afilada. Sin embargo, se estima que el rango de la fuerza de acionamiento pueda no ser suficiente, dada la extensión que podría requerir la manipulación del hilo y la aguja para suturar un área deseada. De esta forma, el presente trabajo se limitará a su aplicación a heridas abiertas que no requieran salir del rango de operación para la reatralimentación de fuerza por parte del dispositivo. Así mismo, el dispositivo podrá comunicarse a 1000 Hz lo cual será un componente determinante para determinar el tiempo a la que se podrá actualizar la ley de control para los motores.

Device Specifications	Touch	
	Imperial	Metric
Force Feedback Workspace	~ 17 W x 13.7 H x 6.5 D in	> 431 W x 348 H x 165 D mm
Footprint (physical area the base of the device occupies on a surface)	~ 6 5/8 W x 8 D in	~ 168 W x 203 D mm
Weight (device only)	3 lbs 15 oz	~1.42 kg
Range of Motion	Hand movement pivoting at wrist	
Nominal Position Resolution	> 450 dpi	~0.055 mm
Backdrive Friction	< 1 oz	< 0.26 N
Maximum Exertable Force (at nominal orthogonal arms position)	.75 lbf	3.3 N
Continuous Exertable Force (24 hrs)	> 0.2 lbf	> .88 N
Stiffness	X axis > 7.3 lbs./in Y axis > 13.4 lbs./in Z axis > 5.9 lbs./in	X axis > 1.26 N/mm Y axis > 2.31 N/mm Z axis > 1.02 N/mm
Inertia (apparent mass at tip)	~ 0.101 lbm	~ 45 g
Force Feedback	X, Y, Z	
Position Sensing	X, Y, Z (digital encoders)	

FIGURA 2.4: Especificaciones técnicas del dispositivo háptico Geomagic touch de 3D Systems

2.2.3 Interfaz Háptica-Robótica para Procedimientos Médicos

Para enlazar el sistema háptico se utilizará el software que brindra la empresa 3D Systems para el sistema operativo Linux. Este software OpenHaptics permitirá desarrollar el controlador en C/C++. De esta forma, como tambien se planea controlar los robots manipuladores en este sistema operativo, se buscará realizar el intercambio de información mediante la publicación y subscripción de nodos en ROS. Además, teniendo en cuenta que el robot manipulador será teleoperado se buscará principalmente controlar la parte del efecto final con la punta del lapiz que cuenta el dispositivo háptico, ya que la forma del controlador y el brazo no son similares. Sin embargo, se buscará que llegen a tener posiciones similares para que el movimiento sea más fluido. Asímismo, se buscará implementar una interfaz gráfica donde se pueda observar el movimiento del robot en tiempo real con Rviz. Estas tareas serán similares a las vistas en [?], donde se realizó un proceso similar para un robot ABB IRB 120.

2.2.4 Adaptación de los Manipuladores para Control de Sutura mediante Háptica

El dispositivo contará con una adaptación específica para el procedimiento de sutura, ya que este proceso requiere la sujeción de una aguja e hilo. Por lo tanto, se adaptar  el dispositivo háptico para cumplir con estos requisitos. Dado que el Geomagic Touch se puede desacoplar, se dise nar  un adaptador en forma de lápiz que se acoplar  al efecto final para desempe nar esta función. Este diseño se basará en un mecanismo similar al presentado en [?], donde se logró adaptar un sistema que permite la inserción de los dedos para evaluar el efecto de un punto pivote sobre la rigidez que se mide.

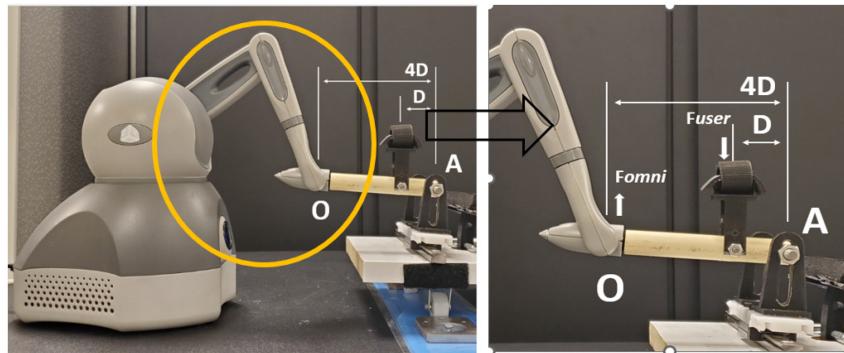


FIGURA 2.5: Modificación al efecto final del módulo geomagic touch en [?]

2.3 Modelo Cinemático del robot serial

Un robot serial puede representarse como la unión cinemática de distintos cuerpos rígidos conectados por uniones rotativas o de deslizamiento [?]. Para lograr un control óptimo del efecto final del robot, es fundamental comprender cada uno de los elementos presentes en su análisis cinemático. Esto se debe a que el efecto final responderá al movimiento generado por la acción realizada en cada extremidad del robot.

La cinemática permite expresar este análisis mediante expresiones matemáticas en función del movimiento de las articulaciones respecto a un punto de referencia, que generalmente es la base del robot. Este análisis se puede desglosar en subtemas según su finalidad: la Cinemática Directa, que calcula la posición y orientación del efecto final a partir de los ángulos de rotación de cada articulación; y la Cinemática Inversa, que determina los ángulos de rotación en cada articulación necesarios para posicionar el efecto final en coordenadas y orientación deseadas.

2.3.1 Matriz de Transformación

Para poder representar correctamente el movimiento de una articulación del robot, debemos considerarlo como un cuerpo rígido; es decir, que no presenta deformación; además que puede ser representado espacialmente por su posición y orientación[?]. Es dicha representación la que podemos definirla bajo un conjunto de transformaciones tanto de rotación como de traslación.

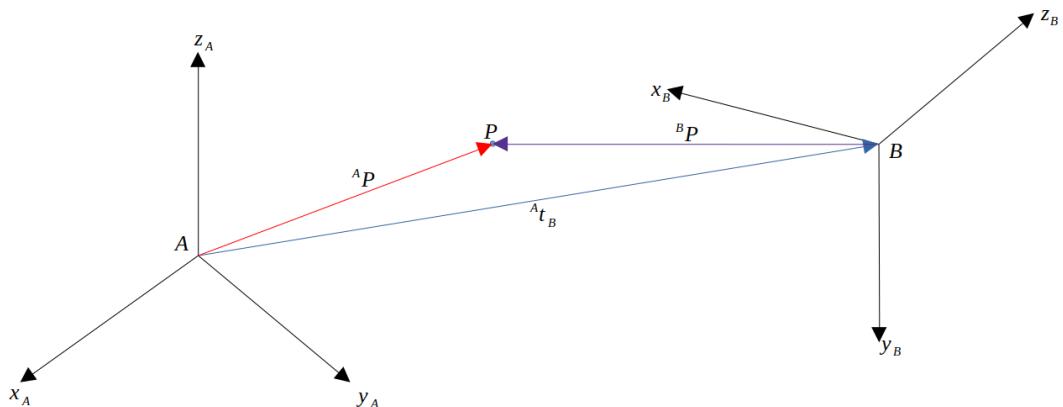


FIGURA 2.6: Posición y orientación de un cuerpo rígido

Podemos expresar el punto P en los sistemas de referencia A y B:

$$\begin{cases} {}^A P = {}^A x \hat{x}_A + {}^A y \hat{y}_A + {}^A z \hat{z}_A \\ {}^B P = {}^B x \hat{x}_B + {}^B y \hat{y}_B + {}^B z \hat{z}_B \end{cases}$$

Si proyectamos el punto en B respecto a A podemos realizarlo mediante la operación vectorial producto punto, lo que resulta en:

$$\begin{cases} {}^A x = {}^B p \cdot \hat{x}_A \\ {}^A y = {}^B p \cdot \hat{y}_A \\ {}^A z = {}^B p \cdot \hat{z}_A \end{cases}$$

$$\begin{cases} {}^A x = {}^B x (\hat{\mathbf{x}}_B \cdot \hat{\mathbf{x}}_A) + {}^B y (\hat{\mathbf{y}}_B \cdot \hat{\mathbf{x}}_A) + {}^B z (\hat{\mathbf{z}}_B \cdot \hat{\mathbf{x}}_A) \\ {}^A y = {}^B x (\hat{\mathbf{x}}_B \cdot \hat{\mathbf{y}}_A) + {}^B y (\hat{\mathbf{y}}_B \cdot \hat{\mathbf{y}}_A) + {}^B z (\hat{\mathbf{z}}_B \cdot \hat{\mathbf{y}}_A) \\ {}^A z = {}^B x (\hat{\mathbf{x}}_B \cdot \hat{\mathbf{z}}_A) + {}^B y (\hat{\mathbf{y}}_B \cdot \hat{\mathbf{z}}_A) + {}^B z (\hat{\mathbf{z}}_B \cdot \hat{\mathbf{z}}_A) \end{cases}$$

Vectorialmente, podemos expresarlo:

$$\begin{bmatrix} {}^A x \\ {}^A y \\ {}^A z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_B \cdot \hat{\mathbf{x}}_A & \hat{\mathbf{y}}_B \cdot \hat{\mathbf{x}}_A & \hat{\mathbf{z}}_B \cdot \hat{\mathbf{x}}_A \\ \hat{\mathbf{x}}_B \cdot \hat{\mathbf{y}}_A & \hat{\mathbf{y}}_B \cdot \hat{\mathbf{y}}_A & \hat{\mathbf{z}}_B \cdot \hat{\mathbf{y}}_A \\ \hat{\mathbf{y}}_B \cdot \hat{\mathbf{z}}_A & \hat{\mathbf{y}}_B \cdot \hat{\mathbf{z}}_A & \hat{\mathbf{z}}_B \cdot \hat{\mathbf{z}}_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B x \\ {}^B y \\ {}^B z \end{bmatrix}$$

Operando se consigue la expresión matricial correspondiente a la matriz de rotación, esta se define como ${}^A R_B$ [?]. Si analizamos las rotaciones realizadas en los 3 ejes principales podemos definir 3 matrices elementales de rotación, que son de utilidad al momento de expresar transformaciones en la orientación.

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Para representar una traslación del eje B respecto al eje veremos que se puede traducir en una suma vectorial de la posición del sistema A y el vector ${}^A t_B$

$${}^A P = {}^A t_B + {}^B P$$

Si juntamos tanto traslación como rotación obtenemos

$${}^A P = {}^A t_B + {}^A R_B {}^B P$$

Matricialmente, podemos reducir la expresión a:

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A t_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Entonces la matriz resultante representará la matriz de transformación homogénea ${}^A T_B$

2.3.2 Cinemática Directa

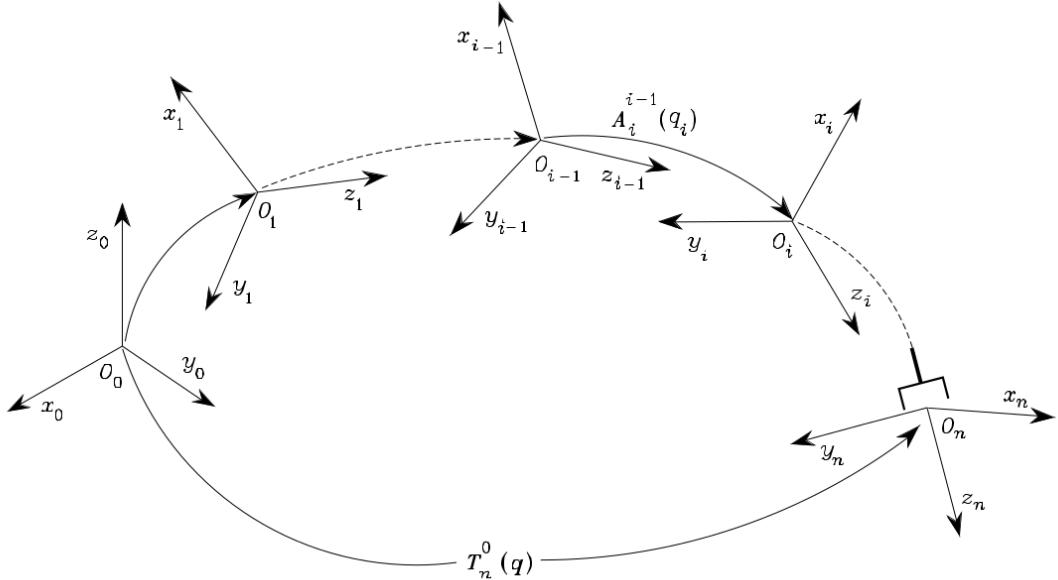


FIGURA 2.7: Transformación de coordenadas en una Cadena cinemática abierta
[?]

La Cinemática Directa permite encontrar la posición y orientación del efecto final, tomando como entrada las transformaciones realizadas en cada una de las extremidades, una después de la otra. Esta cadena de transformaciones homogéneas se puede expresar como una multiplicación de cada matriz de transformación aplicada a las extremidades que representa finalmente la matriz de transformación homogénea general desde la base del robot o sistema de referencia inercial hasta el efecto final.

$${}^0T_n = ({}^0T_1)({}^1T_2)\dots({}^{n-1}T_n) \quad (\text{II.5})$$

2.3.3 Método Denavit-Hartenberg

Este método permite, de manera sistemática, obtener las matrices homogéneas de cada extremidad mediante un conjunto de pasos tomando en cuenta la extremidad anterior.

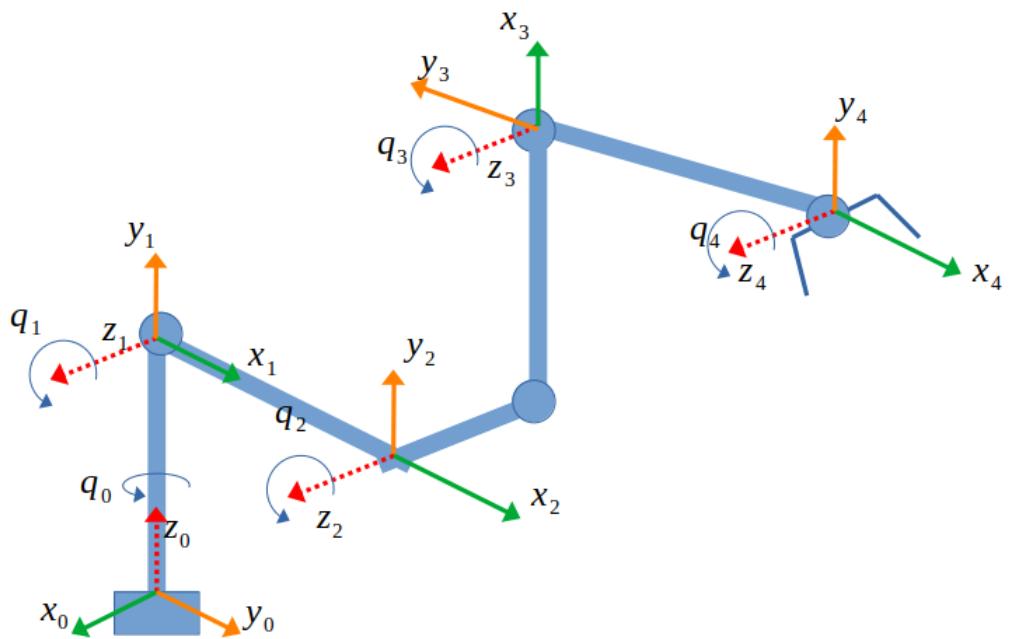


FIGURA 2.8: Método Denavit-Hartenberg

Pasos para la elección de los ejes:

- Eje z_i : Se ubica z_i sobre el eje de movimiento de la articulación siguiente.
- El origen de coordenadas se ubica en la intersección de los ejes z_{i-1} y z_i . Si los ejes son paralelos se ubica en la intersección de z_i con la normal en común entre z_{i-1} y z_i .
- Eje x_i : Se ubica en dirección de $z_{i-1} \times z_i$. Si los ejes son paralelos se ubica en la normal en común entre z_{i-1} y z_i .

- Eje y_i : Se ubica completando el eje coordenado.

Parámetros a identificar

- θ_i : Rotación del eje x_{i-1} a x_i alrededor del eje z_{i-1}
- d_i : Distancia del sistema coordenado $i - 1$ a i a lo largo del eje z_{i-1} hasta la intersección de x_i con z_{i-1}
- a_i : Distancia de la intersección de x_i con z_{i-1} a lo largo del eje x_{i_1} hasta sistema coordenado i
- α_i : Rotación del eje z_{i-1} a z_i alrededor del eje x_i

Una vez identificado los parámetros para cada sistema, los ubicamos en un cuadro:

i	d_i	θ_i	a_i	α_i
1	d_1	$\theta_1 + q_1$	a_1	α_1
2	d_2	$\theta_2 + q_2$	a_2	α_2
		...		
n	d_n	$\theta_i + q_n$	a_n	α_n

TABLA 2.1: Tabla con parámetros

i	d_i	θ_i	a_i	α_i
1	0.1625	q_1	0	$-\frac{\pi}{2}$
2	0	q_2	0.425	0
3	0	q_3	0.3922	0
4	0.1333	$q_4 - \pi$	0	$\frac{\pi}{2}$
5	0.0997	$q_5 + \pi$	0	$\frac{\pi}{2}$
6	0.0996	q_6	0	0

TABLA 2.2: Tabla de parámetros Denavit Hartenberg

Para llevar los parámetros a una Transformación homogénea se toma este orden de para cada movimiento realizado:

1. Rotación θ_i en el eje z_{i-1}
2. Traslación d_i en el eje z_{i-1}
3. Traslación a_i en el eje x_i
4. Rotación α_i en el eje z_i

Multiplicando cada Matriz homogenea se consigue:

$${}^{i-1}T_i(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La ecuación ?? permite obtener la representación de la posición y orientación del efecto final respecto a la base del robot.

2.3.4 Cinemática Inversa

La cinemática inversa permite calcular las configuraciones articulares de cada elemento en la cadena de articulaciones necesario para lograr una posición y orientación deseada. El cálculo de la cinemática inversa en robots como el UR5 de 6 grados de libertad resulta tedioso bajo la directriz de métodos de resolución de ecuaciones clásicos, puesto que se encuentran con expresiones no lineales incompatibles a la resolución por sistema de ecuaciones. Por otro lado, existe el método numérico; este forma de resolución es de naturaleza recursiva y hace uso de técnicas como la minimización de una función costo del error respecto a la posición actual y la posición deseada del efecto final.

El método numérico hace uso de la matriz Jacobiana para su cálculo, ya sea considerando su inversa o su transpuesta.

Matriz Jacobiana

$$\mathbf{J} = \frac{\partial f(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (\text{II.6})$$

El método numérico propuesto es La Resolución por Método de Gradiente, donde se toma una función costo dependiente de los valores articulares del robot, cuya gradiente permitirá encontrar valores para cada articulación acercando la posición del efecto final a la posición deseada.

Método Gradiente

De la cinemática directa:

$$\mathbf{x}_d = f(\mathbf{q}) \longrightarrow \mathbf{x}_d - f(\mathbf{q}) = 0$$

Donde la expresión resultante es el error respecto a la posición deseada. Con esta expresión podemos definir la función costo $g(\mathbf{q})$

$$g(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{x}_d - f(\mathbf{q})\|^2$$

Se calcula el gradiente de $g(\mathbf{q})$:

$$\nabla g(\mathbf{q}) = -\left(\frac{\partial f(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}\right)^T (\mathbf{x}_d - f(\mathbf{q}))$$

Finalmente, se puede aplicar el método gradiente de manera recursiva mediante un parámetro α que determinará el tamaño de paso en el avance del gradiente hasta encontrar los valores articulares adecuados.

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + \alpha \mathbf{J}^T(\mathbf{q}_k) (\mathbf{x}_d - f(\mathbf{q}_k)) \quad (\text{II.7})$$

Método por Optimización Cuadrática

Partiendo de la función costo $g(\mathbf{q})$ se define un problema de minimización, con e como el error de posición, de la forma:

$$\min_{\dot{\mathbf{q}}} \|\mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{e}\|^2$$

Expandiendo y ordenando podemos plantear un problema cuadrático de la forma:

$$\min_{\dot{\mathbf{q}}} \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{H} + \nabla g(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (\text{II.8})$$

donde $\mathbf{H} = \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{J}(\mathbf{q})$, como matriz Hesiana y el gradiente $\nabla g(\mathbf{q}) = -(\mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{e})^T$

2.4 Modelo Dinámico del robot serial

El modelo dinámico permite relacionar el movimiento del robot mediante el análisis de la fuerza y torques aplicados en cada articulación. Mediante este análisis se pueden determinar con mayor fiabilidad un sistema de simulación del robot y el modelamiento de un sistema de control adecuado para entornos reales. Sin embargo, encontrar el modelo dinámico de un robot manipulador implica poder determinar variables matriciales que gobiernan el comportamiento del robot, como la matriz de inercia. Ante este problema, existen métodos matemáticos para el diseño de modelos dinámicos, sea de manera analítica, mediante ecuaciones simbólicas; o de manera numérica, mediante recursividad.

2.4.1 Newton Euler

Este método es de naturaleza recursiva, puesto que los valores se operarán con los obtenidos anteriormente. Es esta naturaleza la que permite obtener la dinámica inversa, donde se consiguen las fuerzas y torques necesarios para lograr un movimiento deseado. Además, permite establecer un algoritmo que, sumado a herramientas computacionales, logra realizar el cálculo con mayor rapidez.

El método Newton-Euler realiza un análisis desde la formulación de la 2^{da} ley de Newton para traslación y la 2^{da} ley de Euler para la rotación.

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{f}_{i+1} + m_i \ddot{\mathbf{p}}_{c_i} - m_i \mathbf{g}_0$$

$$\boldsymbol{\mu}_i = \boldsymbol{\mu}_{i+1} - \mathbf{f}_i \times \mathbf{r}_{i-1,c_i} + \mathbf{f}_{i+1} \times \mathbf{r}_{i,c_i} + \mathbf{I}_i \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i$$

Para un eslabón i podemos obtener [?]:

Velocidad Angular

$$\boldsymbol{\omega}_i = \begin{cases} {}^i\boldsymbol{R}_{i-1}(\boldsymbol{\omega}_{i-1} + \dot{q}_i \boldsymbol{z}_{i-1}) & , \text{ Si es de rotación} \\ {}^i\boldsymbol{R}_{i-1}(\boldsymbol{\omega}_{i-1}) & , \text{ Si es de prismático} \end{cases}$$

Aceleración Angular

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \begin{cases} {}^i\boldsymbol{R}_{i-1}(\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} + \ddot{q}_i \boldsymbol{z}_{i-1} + \dot{q}_i \boldsymbol{w}_{i-1} \times \boldsymbol{z}_{i-1}) & , \text{ Si es de rotación} \\ {}^i\boldsymbol{R}_{i-1}(\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1}) & , \text{ Si es de prismático} \end{cases}$$

Aceleración Lineal

$$\ddot{\boldsymbol{p}}_i = {}^i\boldsymbol{R}_{i-1}\ddot{\boldsymbol{p}}_{i-1} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \boldsymbol{r}_{i-1,i} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{r}_{i-1,i})$$

Aceleración del centro de masa

$$\ddot{\boldsymbol{p}}_{c_i} = \ddot{\boldsymbol{p}}_i + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \boldsymbol{r}_{i,c_i} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{r}_{i,c_i})$$

Para calcular estos valores adecuadamente se toma como valores iniciales[?]:

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \dot{\boldsymbol{p}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \boldsymbol{g}, \boldsymbol{z}_0 = \boldsymbol{z}_1 = \dots = \boldsymbol{z}_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

El cálculo de la fuerza y de torques implicará un cálculo recursivo inverso, es decir, se tomará el valor actual para calcular el anterior.

$$\begin{cases} \boldsymbol{f}_i = {}^i\boldsymbol{R}_{i+1}\boldsymbol{f}_{i+1} + m_i \ddot{\boldsymbol{p}}_{c_i} \\ \boldsymbol{\mu}_i = {}^i\boldsymbol{R}_{i+1}\boldsymbol{\mu}_{i+1} - \boldsymbol{f}_i \times (\boldsymbol{r}_{i-1,i} + \boldsymbol{r}_{i,c_i}) + {}^i\boldsymbol{R}_{i+1}\boldsymbol{f}_{i+1} \times \boldsymbol{r}_{i,c_i} + \boldsymbol{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{I}_i \boldsymbol{\omega}_i \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

De manera similar a las velocidades y aceleraciones, los valores iniciales estarán expresados por:

$$\boldsymbol{\mu}_{N+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{f}_{N+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^N\boldsymbol{R}_{N+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Con las expresiones y términos calculados, podemos definir los torques generalizados del modelo dinámico y por consiguiente, el modelo dinámico:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \boldsymbol{\mu}_i^{T_i} \boldsymbol{R}_{i-1} \boldsymbol{z}_{i-1}$$

2.5 Control por Modo Deslizante

2.5.1 Introducción al control por modo deslizante (SMC)

El control por modo deslizante (SMC, por sus siglas en inglés) es un enfoque de control no lineal diseñado para dirigir el comportamiento de un sistema hacia un régimen dinámico específico, definido a través de una superficie de deslizamiento. El objetivo es que el sistema "deslice" sobre esta superficie, logrando así que la trayectoria del sistema se mantenga cerca de la deseada a pesar de perturbaciones y no linealidades. Aunque una de las desventajas de este método es el fenómeno de chattering, pequeñas oscilaciones indeseadas en la ley de control, el SMC es especialmente robusto y resistente a variaciones en el sistema y pequeñas perturbaciones. Esto lo convierte en una opción valiosa para aplicaciones en entornos inciertos o dinámicos, como es el caso de la cirugía robótica.

Este método tiene ventajas significativas para el control de sistemas robóticos en contextos donde existen incertidumbres y no linealidades, como en aplicaciones quirúrgicas para sutura. Su robustez permite mantener un rendimiento adecuado a

pesar de variaciones inesperadas en el entorno, como el comportamiento dinámico de los tejidos. Además, el SMC es eficaz en el manejo de dinámicas no lineales, facilitando la adaptación a cambios sin necesidad de un modelo preciso del sistema. Su implementación es también relativamente sencilla, ya que se basa en el diseño de superficies de deslizamiento, reduciendo la complejidad matemática requerida en comparación con otros métodos. La flexibilidad en la definición de estas superficies permite adaptar el control a los requisitos específicos de cada tarea, optimizando así el desempeño de los manipuladores robóticos UR5 en entornos quirúrgicos [?]. [?]

2.5.2 Diseño del control SMC

El **control por modo deslizante** (Sliding Mode Control, SMC) es una técnica robusta ampliamente utilizada para sistemas no lineales. Su objetivo principal es forzar al sistema a seguir una superficie de deslizamiento, donde la dinámica se vuelve robusta frente a perturbaciones y modelos inexactos. Para ello, se diseña una ley de control que garantice que la trayectoria del sistema converja hacia dicha superficie y permanezca en ella.

Primero se define una función de Lyapunov adecuada para garantizar estabilidad. En este caso, se emplea una función cuadrática:

$$V(x) = \frac{1}{2}s^2$$

donde la función de deslizamiento está dada por:

$$s(x) = \dot{e} + \lambda e$$

Aquí, $e = x - x_d$ es el error entre el estado actual x y el deseado x_d , y λ es una constante positiva que ajusta la convergencia.

Para asegurar estabilidad, deben cumplirse tres condiciones fundamentales:

- $V(x) > 0$ para todo $x \neq x_d$ (positividad).
- $\dot{V}(x) < 0$, lo que implica convergencia hacia la superficie de deslizamiento.
- El sistema debe alcanzar la superficie en tiempo finito y luego deslizarse sobre ella.

La derivada de Lyapunov es:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(\ddot{e} + \lambda\dot{e})$$

A partir del modelo dinámico del manipulador:

$$\tau = M \cdot \ddot{q} + C \cdot \dot{q} + G$$

se proyecta al espacio cartesiano mediante el Jacobiano J_a , obteniendo:

$$\ddot{x} = J_a \cdot M^{-1} \cdot (\tau - C \cdot \dot{q} - G) + J_a \cdot \dot{q} \quad (1)$$

La superficie de deslizamiento en el espacio cartesiano se define como:

$$S = \dot{x} - \dot{x}_{\text{des}} + \lambda(x - x_{\text{des}})$$

y su derivada:

$$\dot{S} = \ddot{x} - \ddot{x}_{\text{des}} + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_{\text{des}})$$

La ley de control se diseña para que:

$$\dot{S} = -k \cdot S - k_2 \cdot \tanh(k_3 \cdot S)$$

con ganancias positivas k, k_2, k_3 . Esto garantiza que $\dot{V} = S^T \dot{S} < 0$, cumpliendo la condición de estabilidad.

Sustituyendo la ecuación (1) en la expresión de \dot{S} , se obtiene la ecuación final para el torque de control:

$$\tau = M \cdot J_a^{-1} \cdot \left[-k \cdot S - k_2 \cdot \tanh(k_3 \cdot S) - \left(J_a \cdot \dot{q} - \ddot{x}_{\text{des}} + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_{\text{des}}) \right) \right] + C \cdot \dot{q} + G$$

Esta ley de control garantiza el seguimiento deseado incluso en presencia de perturbaciones, aprovechando la robustez inherente del enfoque SMC.

- τ : Torque aplicado al sistema.
- M : Matriz de masa (o inercia).
- \ddot{q} : Aceleración generalizada.
- \dot{q} : Velocidad generalizada.
- q : Posición articular.
- C : Matriz de Coriolis y centrífuga.
- G : Vector de fuerzas de gravedad.

- J_a : Jacobiano de la configuración.
- \dot{J}_a : Derivada temporal del Jacobiano.
- x : Posición en el espacio cartesiano.
- \dot{x} : Velocidad cartesiana.
- \ddot{x} : Aceleración cartesiana.
- x_{des} , \dot{x}_{des} , \ddot{x}_{des} : Referencias deseadas.
- λ : Ganancia de la superficie de deslizamiento.
- S : Función de deslizamiento.
- \dot{S} : Derivada de la función de deslizamiento.
- k , k_2 , k_3 : Ganancias del controlador.
- \tanh : Función tangente hiperbólica, usada para suavizar el control discontinuo.
- #: Símbolo que representa la pseudoinversa (si aplica).

2.6 Control por Impedancia

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{M} \boldsymbol{J}^{-1} [(\ddot{\boldsymbol{x}}_d - \boldsymbol{K}_p \boldsymbol{e}_x - \boldsymbol{K}_d \boldsymbol{e}_{\dot{x}}) - \boldsymbol{J} \dot{\boldsymbol{q}}] + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \quad (\text{II.10})$$

Donde :

$\tau \in \mathbb{R}^6$: Vector de torques articulares

$M \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$: Matriz de inercia articular

$J^\dagger \in \mathbb{R}^{6 \times 7}$: Pseudo-inversa del Jacobiano extendido

$J \in \mathbb{R}^{7 \times 6}$: Jacobiano extendido (posición + cuaternión)

$\ddot{x}_d \in \mathbb{R}^7$: Aceleración cartesiana deseada

$K_p \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$: Matriz de ganancia proporcional

$K_d \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$: Matriz de ganancia derivativa

$e_x \in \mathbb{R}^7$: Error de pose (posición + orientación)

$e_{\dot{x}} \in \mathbb{R}^7$: Error de velocidad cartesiana

$h(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^6$: Términos no lineales (Coriolis + gravedad)

CAPÍTULO III

MARCO REFERENCIAL (LEGAL, GEOGRÁFICO, HISTÓRICO) (opcional)

Inicie aquí el texto, utilizando sangría de 1.25 cm. en el primer párrafo. Continúe el segundo párrafo.

Continúe el segundo párrafo

En la actualidad, las unidades de información hacen frente a muchos cambios debido a los avances tecnológicos, explosión informativa, nuevos recursos y soportes, por lo cual se implementan servicios innovadores que les permitan a sus usuarios tener acceso a muchas fuentes de información. Para asegurar el acceso y uso de los servicios, los usuarios requieren poseer una serie de habilidades que les permitan identificar, recuperar, manejar, discernir, organizar, utilizar y comunicar la información de manera eficaz para la toma de decisiones.

Entre las causas se pueden considerar la falta de tiempo asignado al taller, las limitaciones en cuanto a laboratorios, el poco personal, la falta de una correcta selección de los contenidos, así como, una calificación que asegure el cumplimiento de los objetivos.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe de manera detallada la metodología empleada para diseñar, implementar y evaluar un sistema robótico teleoperado con retroalimentación háptica, orientado a mejorar la precisión y seguridad en procedimientos de sutura en heridas superficiales. La ruta metodológica sigue un enfoque experimental, en el que se desarrollan y validan componentes mediante simulaciones en entornos que toman en consideración variables físicas como la masa, gravedad e inercia y análisis cuantitativos que aseguren la viabilidad técnica del sistema acorde a los parámetros de desempeño del controlador para el seguimiento de la trayectoria.

4.1 Metodología de desarrollo basada en la norma VDI 2206

El desarrollo del sistema robótico se estructura siguiendo la norma VDI 2206, una metodología reconocida para el diseño de sistemas mecatrónicos que propone un enfoque en “V” modificado. Esta metodología permite una integración temprana y concurrente de los dominios mecánico, electrónico y de control, promoviendo la validación continua desde las etapas iniciales del diseño.

La metodología contempla una fase exploratoria, donde se analizan los principios físicos, conceptos funcionales y alternativas tecnológicas, y una fase sistemática de diseño, donde se desarrollan modelos del sistema, simulaciones, implementación física y validación final.

En este proyecto, la fase exploratoria incluyó el análisis de los requerimientos del procedimiento de sutura, la evaluación de dispositivos candidatos (UR5, Geomagic Touch) y la definición preliminar de principios físicos relevantes (fuerzas de interacción, precisión posicional, escalamiento de movimientos). Posteriormente, en la fase de desarrollo sistemático, se aplicó la metodología en cuatro etapas clave:

1. Diseño conceptual: definición de arquitectura del sistema, identificación de comunicación entre componentes y especificaciones funcionales.
2. Modelado y simulación: desarrollo del modelo dinámico del UR5 y simulación del entorno en Gazebo con los elementos 3d añadidos.
3. Implementación: integración de nodos ROS 2, C++, librerías oficiales de los equipos utilizados y protocolos de comunicación entre estos.
4. Validación: pruebas en escenarios reales en el laboratorio de Ingeniería Mecatrónica para medir precisión, respuesta dinámica y calidad de la retroalimentación háptica.

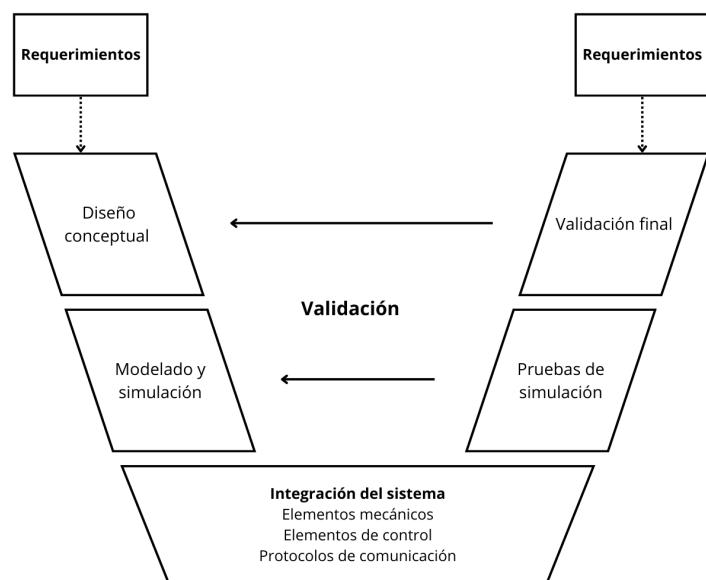


FIGURA 4.1: Esquema de la metodología VDI 2206

4.2 Diseño del sistema robótico

En esta fase inicial se establecen los requerimientos funcionales y técnicos del sistema robótico, considerando las demandas propias del procedimiento de sutura. Se seleccionan los dispositivos principales, incluyendo el manipulador UR5 y el dispositivo háptico Geomagic Touch, definiendo sus roles dentro del sistema. Además, se desarrolla un modelo cinemático y dinámico del UR5 utilizando el método de Denavit-Hartenberg, lo que permite determinar la posición en tiempo real del efecto final con base en los valores articulares y facilitar su integración en la plataforma de simulación.

Paralelamente, se configura un entorno virtual en Gazebo v11, utilizando ROS 2 Humble como marco de trabajo. Este entorno replica las condiciones físicas reales, como la gravedad, las colisiones y las interacciones con objetos simulados, permitiendo realizar pruebas preliminares en un contexto controlado y seguro. La simulación incluye elementos como bloques, mesas, sillas y diversas herramientas, extraídas de bibliotecas públicas, para representar de manera realista las tareas que llevará a cabo el sistema.

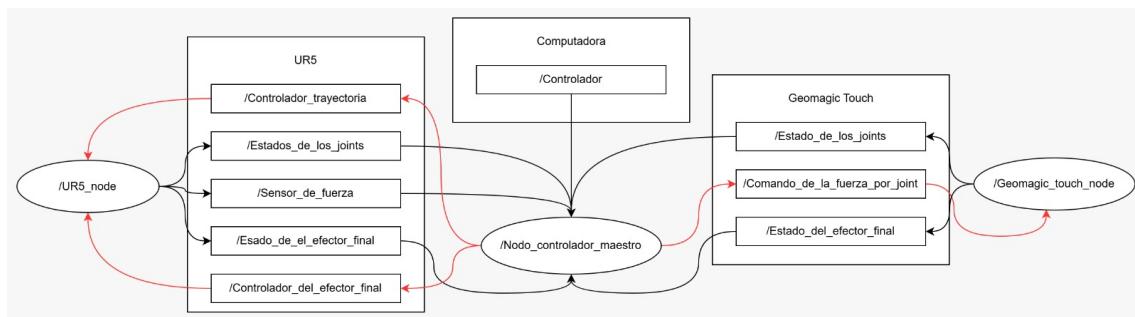


FIGURA 4.2: Comunicación de tópicos y nodos planteada

4.3 Implementación del sistema de control

El desarrollo del control se centra en dos dispositivos clave: el manipulador UR5 y el Geomagic Touch. Para el UR5, se implementa un controlador basado en dinámica inversa que permita generar movimientos precisos en función de las entradas de posición y velocidad admitidas por el fabricante. Este controlador se complementa con un módulo de optimización para ajustar los parámetros de desempeño, logrando un balance adecuado entre velocidad de respuesta y precisión.

En el caso del dispositivo háptico, se calibra su capacidad para enviar y recibir señales de posición y fuerza, estableciendo un puente efectivo entre el usuario y el manipulador robótico. Además, se desarrollan transformaciones que escalan los movimientos del dispositivo háptico al espacio de trabajo del UR5, garantizando que las acciones del operador se reflejen fielmente en la teleoperación.

4.3.1 Control con optimización

Para poder alcanzar la posición deseada del efecto final del manipulador UR5 se plantea un problema de minimización cuadrática ponderado para dos tareas, minimizar el error de posición y el error de orientación respecto a la velocidad articular. Se definen dos matrices de pesos \mathbf{W}_p para la posición y \mathbf{W}_o para la orientación.

$$\min_{\dot{\mathbf{q}}} \quad \mathbf{W}_p \|\mathbf{J}_p(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{e}_p\|^2 + \mathbf{W}_o \|\mathbf{J}_o(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{e}_o\|^2$$

Se define la **matriz Hessiana**:

$$\mathbf{H} = \mathbf{W}_p \mathbf{J}_p(\mathbf{q})^T \mathbf{W}_p \mathbf{J}_p(\mathbf{q}) + \mathbf{W}_o \mathbf{J}_o(\mathbf{q})^T \mathbf{W}_o \mathbf{J}_o(\mathbf{q}),$$

donde $\mathbf{J}_p(\mathbf{q})$ es la parte del Jacobiano asociada a la posición del efecto final y $\mathbf{J}_o(\mathbf{q})$ es la parte del Jacobiano asociada a su orientación

y el **gradiente**

$$\nabla g(\mathbf{q}) = -\mathbf{W}_p \mathbf{J}_p(\mathbf{q})^T \mathbf{W}_p \mathbf{e}_p - \mathbf{W}_o \mathbf{J}_o(\mathbf{q})^T \mathbf{W}_o \mathbf{e}_o$$

donde \mathbf{e}_p es el error de la posición del efecto final y \mathbf{e}_o es su error de orientación(representado en parte vectorial).

Siendo la función a minimizar

$$\min_{\dot{\mathbf{q}}} \quad \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{H} + \nabla g(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (\text{IV.1})$$

Finalmente, se puede aplicar recursividad mediante un parámetro α que determinará el tamaño de paso en el avance del optimizador hasta encontrar los valores articulares adecuados.

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + \alpha \dot{\mathbf{q}}_k \quad (\text{IV.2})$$

4.4 Validación experimental

La fase final está dedicada a la evaluación del sistema en simulaciones realistas. Se diseñan experimentos que reproducen escenarios de sutura, variando las propiedades mecánicas de los bloques simulados para medir el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones. Durante las pruebas, se registran métricas clave como error posicional, tiempo de respuesta y calidad de la retroalimentación háptica.

Los resultados obtenidos como el tiempo de sutura, la fiabilidad de la retroalimentación háptica y la calidad de la sutura se analizan para determinar la precisión y confiabilidad del sistema propuesto . Asimismo, se identifican posibles limitaciones técnicas que podrían abordarse en futuras iteraciones.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados de las pruebas realizadas sobre el banco de trabajo para el seguimiento de trayectorias en un entorno controlado. Asimismo, se compara el comportamiento de las arquitecturas de control propuestas en trayectorias curvas y

los controladores usados para el control cinemático y el método utilizado para la comunicación del dispositivo háptico con el entorno simulado.

5.1 Simulación del brazo robótico UR5 en Gazebo

Para llevar a cabo las pruebas de movilidad y seguimiento a la trayectoria, se llevaron a cabo pruebas en el entorno Gazebo utilizando el sistema ROS 2 Humble, el cual posibilita leer y enviar acciones a parámetros como rotación o velocidad, teniendo en cuenta características físicas como masa o inercia del robot y simulando los efectos de fricción o colisión.

Se logró cargar el modelo del robot UR5, sub modelo e, y asegurar el correcto cargado de los paquetes necesarios para la simulación. Así como los programas que contienen los comandos para enviar movimiento a las articulaciones.

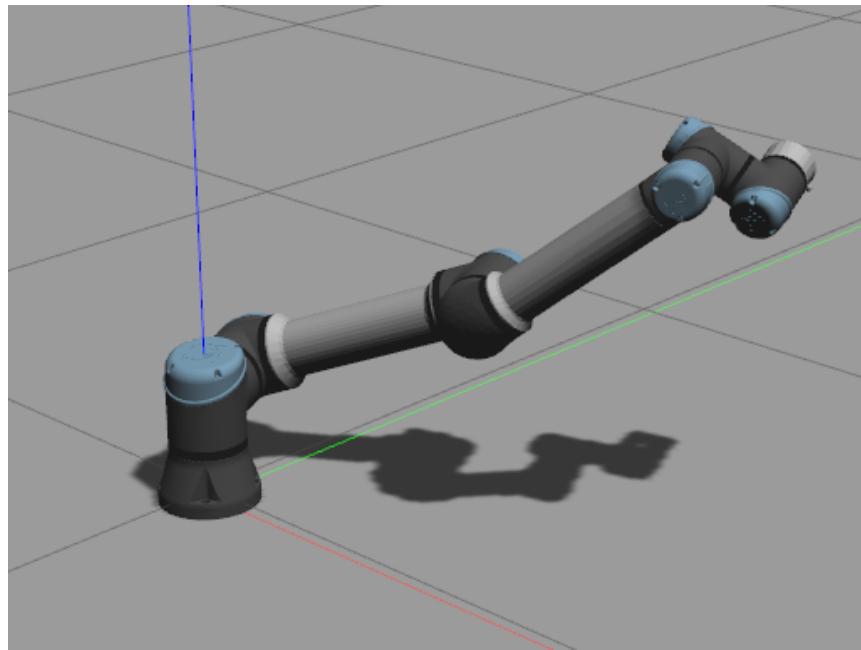


FIGURA 5.1: Simulación en Gazebo

5.2 Diseño de controlador por cinemática inversa y diferencial

Se modeló un sistema de control cinemático, puesto que el robot ur5 solo admite la entrada de señales de posición o velocidad. El sistema de control hace uso de cinemática directa para convertir las posiciones angulares de las articulaciones al espacio cartesiano y poder calcular el error y posteriormente el cambio del error. Esto para poder caracterizar al controlador con un control proporcional y derivativo, permitiendo el seguimiento a una trayectoria deseada.

Se logró la implementación del controlador en el entorno simulado de Gazebo obteniendo un error al seguimiento en los 3 ejes cartesianos dentro de un rango de 0.01 m con una referencia sinusoidal

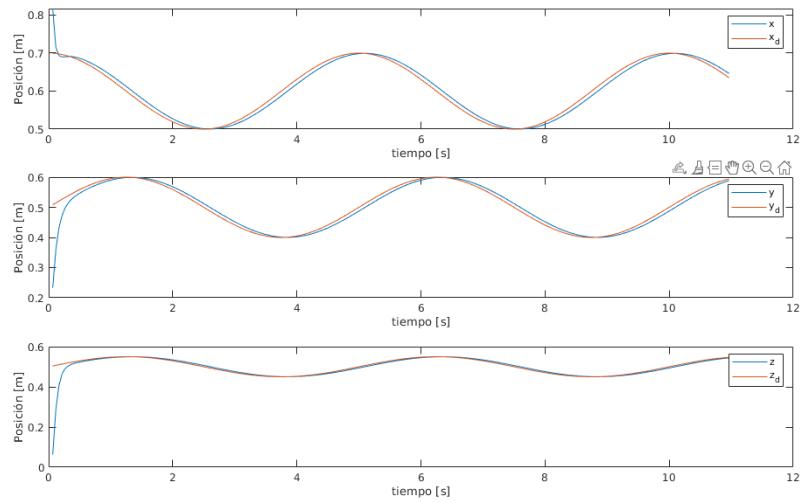


FIGURA 5.2: Seguimiento a la trayectoria en los 3 ejes

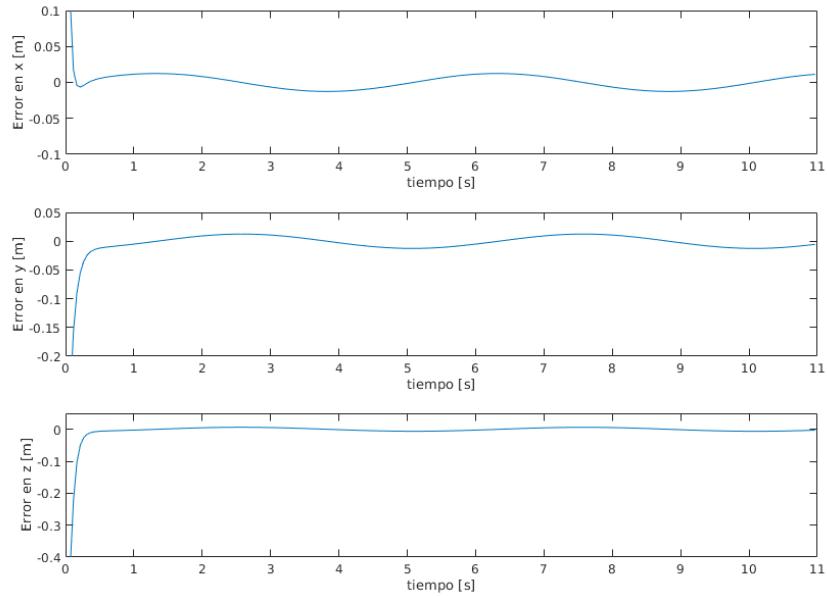


FIGURA 5.3: Error al seguimiento a la trayectoria

5.3 Integración del dispositivo háptico para la teleoperación del efecto final

Dado que se requiere una alta frecuencia para la comunicación de datos entre los dispositivos, se utilizaron librerías principalmente basadas en C/C++. De esta forma, se logró mantener una comunicación con 1 kHz de frecuencia para la lectura de la posición y orientación del efecto final, los ángulos articulares de cada una de las articulaciones que dispone, y el comando para requerir las fuerzas de los 3 grados de libertad actuados que dispone. Esta librería cuenta con las dependencias de las funciones creadas por la empresa 3D Systems para la manipulación a bajo nivel de las características del dispositivo háptico. De esta forma, se obtuvieron los nodos y tópicos mostrados en la Figura ??.

Por otro lado, dado que la lectura de la posición en su estado base (Figura ??) del efecto final se encuentra definida como el origen en su sistema de referencia, no será posible comunicar directamente las posiciones para la manipulación del dispositivo háptico. De esta forma, se calibró una posición inicial deseada por el usuario como un punto de origen para tomar en consideración únicamente la diferencia de posición actual y el origen del módulo háptico.

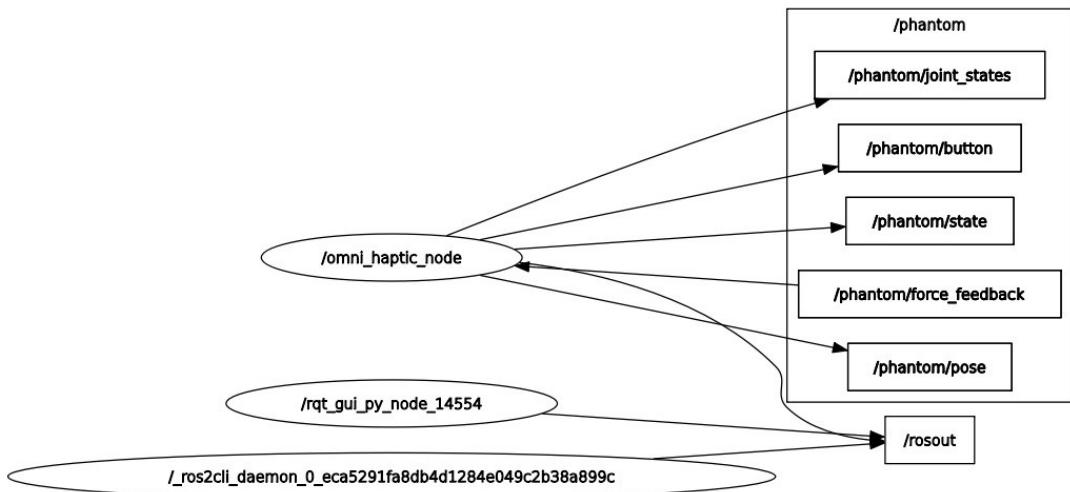


FIGURA 5.4: Diagrama de nodos y tópicos para el control del Geomagic Touch

Se calibraron los parámetros de desempeño del controlador que brinda el UR5 por defecto de fábrica para que establezca la posición deseada en 0.1 segundos y comande la posición cada 0.5 segundos. Estos parámetros se determinaron para que el seguimiento sea lo más rápido posible sin perder precisión, dando suficiente tiempo para que se pueda establecer en la posición deseada. Además, cabe resaltar que en estas primeras pruebas solo se consideró el control de la posición, sin la orientación.

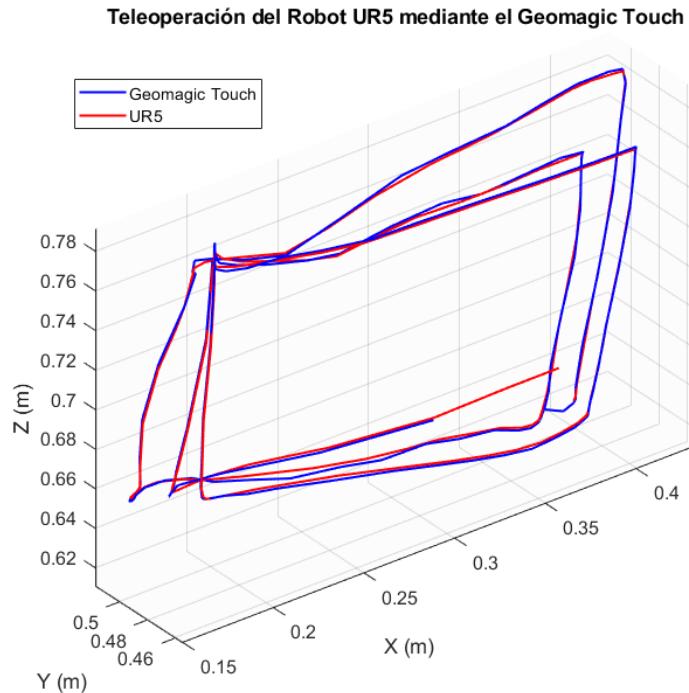


FIGURA 5.5: Seguimiento de trayectoria cuadrada con el efecto final del dispositivo háptico

Como se puede observar en la Figura ??, se logró el seguimiento de la trayectoria al intentar realizar un cuadrado con el efecto final del dispositivo háptico. Asimismo, en las gráficas mostradas en las Figuras ??, ?? y ??, se puede observar que el error durante el seguimiento de trayectoria resultó en todo momento menor a 10 cm. Dado el carácter de la investigación, se buscará que el controlador sea más preciso para que el cirujano pueda mantener un error mínimo durante todo el seguimiento de la trayectoria. Sin embargo, se observó que el desfase para el seguimiento de la trayectoria resultó menor a 0.5 segundos, lo cual resulta óptimo para el seguimiento.

Se considera que, aunque estos parámetros fueron simulados en un entorno de simulación realista, se tendrán que calibrar en el dispositivo real, dado que este

puede contar con ligeras variaciones mecánicas que podrían afectar el desempeño del controlador propuesto.

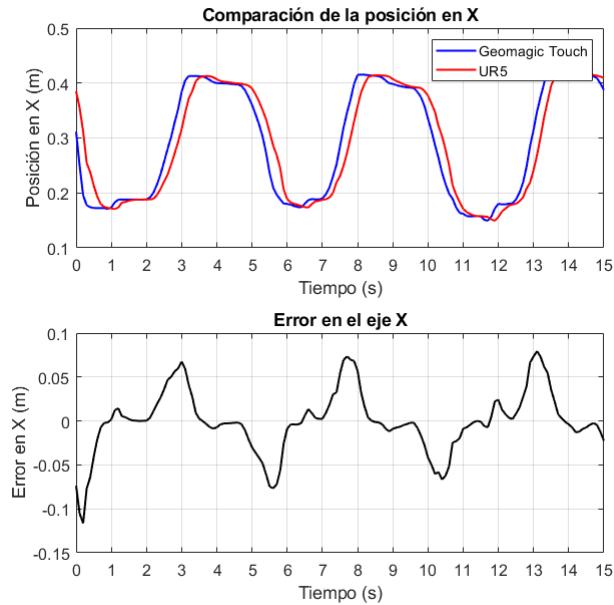


FIGURA 5.6: Seguimiento en el eje X de la trayectoria cuadrada

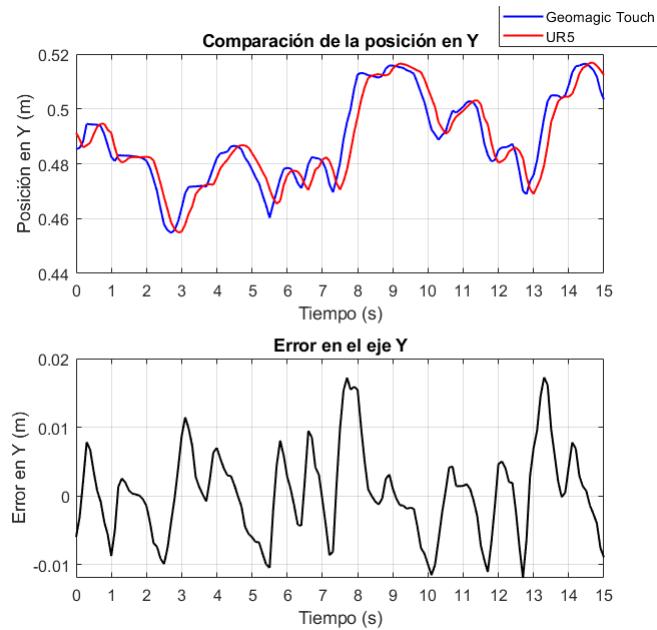


FIGURA 5.7: Seguimiento en el eje Y de la trayectoria cuadrada

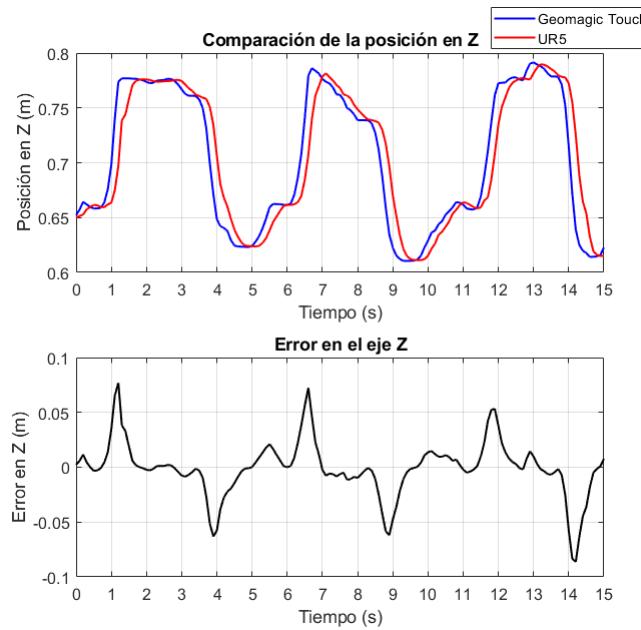


FIGURA 5.8: Seguimiento en el eje Z de la trayectoria cuadrada

5.4 Integración de teleoperación y control por optimización en entorno físico

El sistema completo consta de la comunicación por medio de ROS2 de los nodos del módulo Geomagic Touch y los nodos de control del UR5; mediante el control por optimización HQP se implementó el seguimiento a la referencia de posición en el espacio cartesiano del módulo háptico transformado al espacio de trabajo del robot UR5 y tomando como posición inicial la del efecto final del robot.

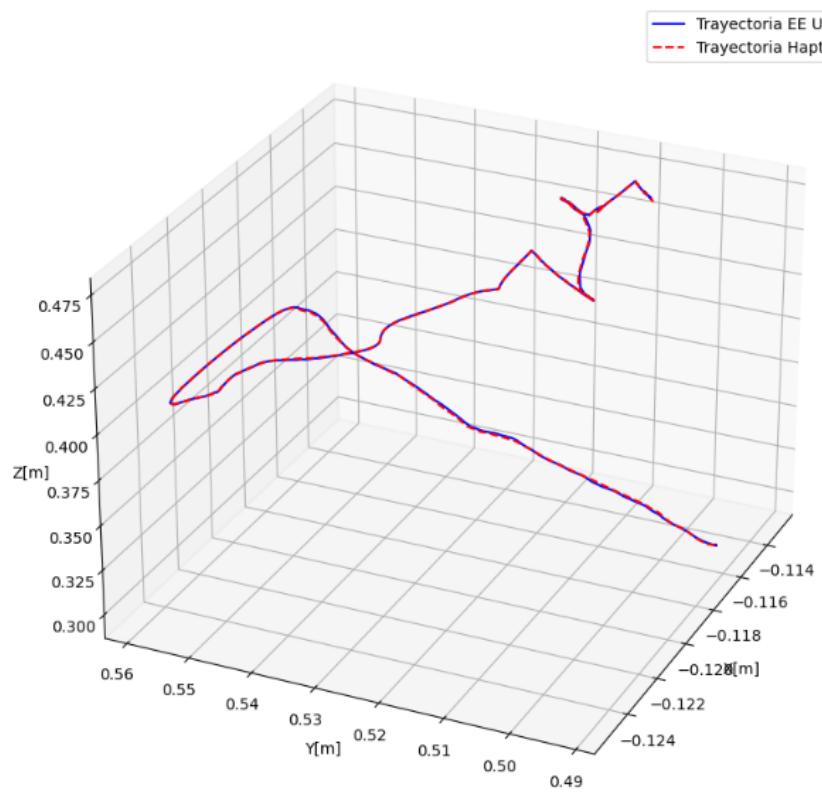


FIGURA 5.9: Seguimiento en el espacio cartesiano

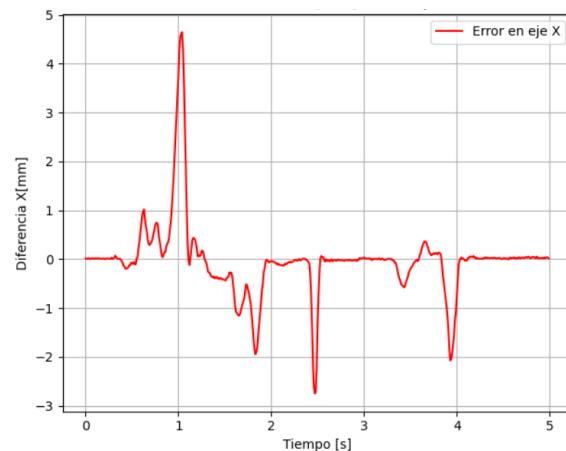


FIGURA 5.10: Error en X [mm] vs Tiempo [s]

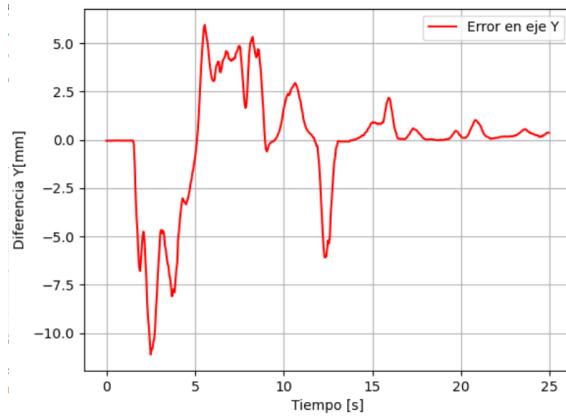


FIGURA 5.11: Error en Y [mm] vs Tiempo [s]

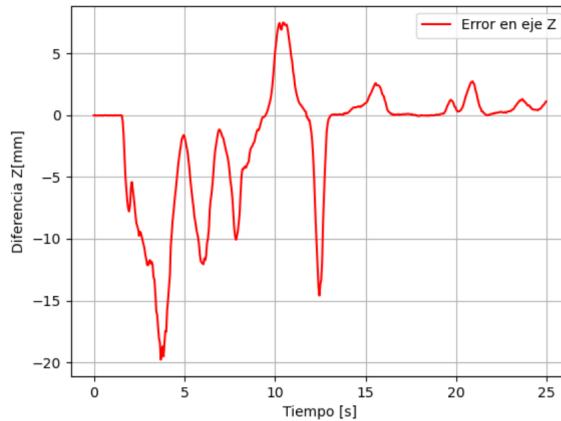


FIGURA 5.12: Error en Z [mm] vs Tiempo [s]

5.5 Diseño y fabricación del adaptador de una pinza genérica para el gripper Robotiq 2F-85 para UR5

El diseño de las piezas se realizó utilizando el software Fusion 360 de la empresa Autodesk. Asimismo, se utilizó instrumentos de presión de 0.01 milímetros para la medición de los elementos físicos que se buscan adaptar. Estas piezas 3D fueron impresas con PLA al 50 % de desidad en el laboratorio de mecatrónica 201 de la UTEC.

Las Figuras ??, ??, ?? y ?? muestran las vistas principales del soporte diseñado para la adaptación mecánica de una pinza genérica.

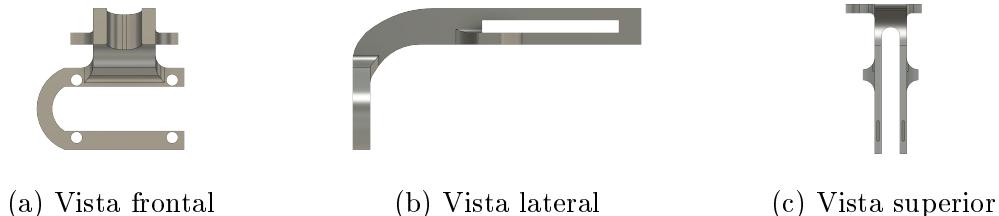


FIGURA 5.13: Vistas principales del diseño del soporte principal de la pinza.

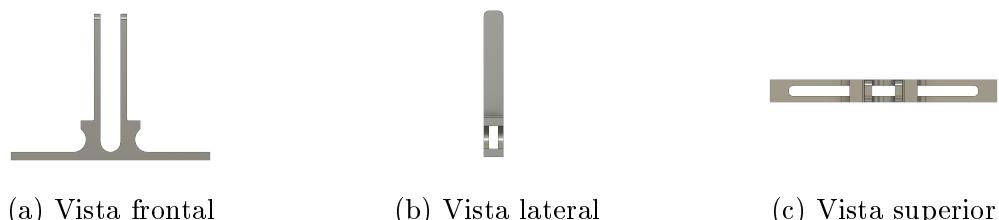


FIGURA 5.14: Vistas principales del diseño del slider de la pinza.

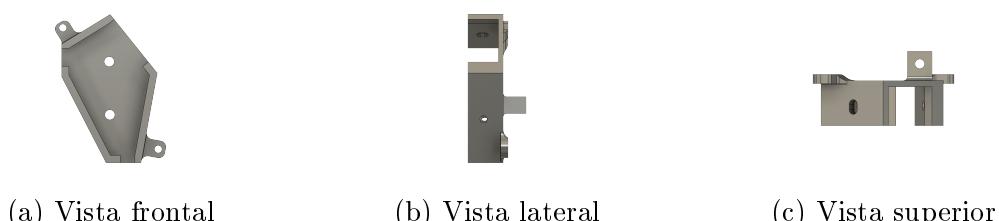
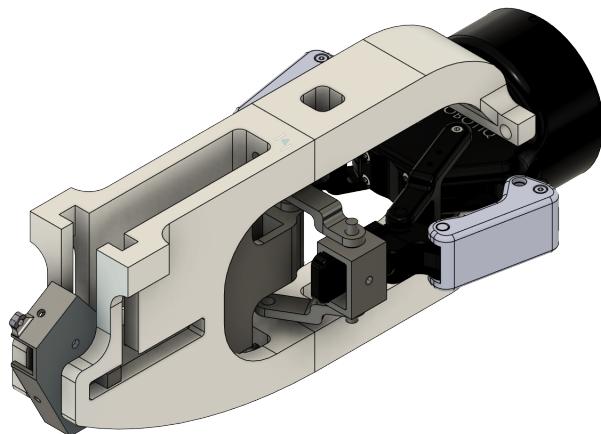


FIGURA 5.15: Vistas principales del diseño del seguro inferior que acopla la pinza.

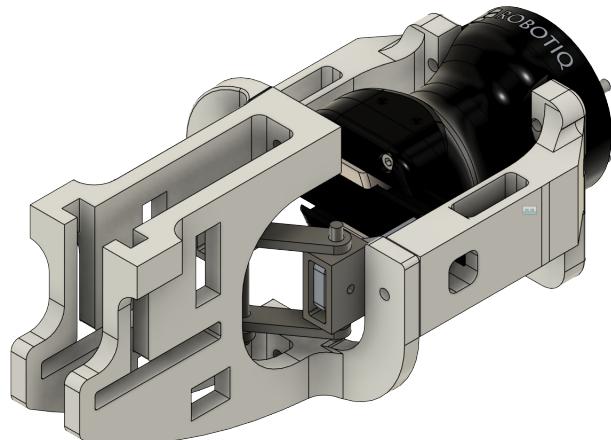


FIGURA 5.16: Vistas principales del diseño del seguro superior que acopla la pinza.

La Figura ?? muestra el resultado final del acople mecánico sobre el gripper 2F85.



(a) Ensamblaje final gripper 2f 85 de la empresa Robotiq

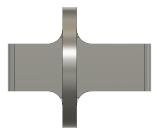


(b) Ensamblaje final gripper hand-e de la empresa Robotiq

FIGURA 5.17: Vistas principales del ensamble final.

5.6 Diseño y fabricación del adaptador de agarre para el efecto final del Geomagic Touch

Las Figuras ??, ?? y ?? muestran las vistas principales del agarre diseñado para el efecto final del dispositivo háptico.



(a) Vista frontal



(b) Vista lateral

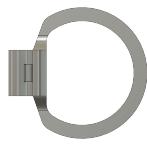


(c) Vista superior

FIGURA 5.18: Vistas principales del diseño del agarre del dedo anular.



(a) Vista frontal



(b) Vista lateral



(c) Vista superior

FIGURA 5.19: Vistas principales del diseño del agarre del dedo pulgar.



(a) Vista frontal



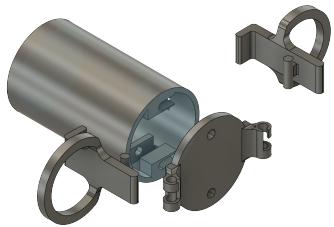
(b) Vista lateral



(c) Vista superior

FIGURA 5.20: Vistas principales del diseño de la tapa del acople.

La Figura ?? muestra el ensamblaje final de las piezas para formar el acople para el dispositivo haptico.



(a) Plano de explosión



(b) Ensamblaje final

FIGURA 5.21: Vistas principales del ensamblaje final.

5.7 Pruebas con el banco de trabajo

Se realizaron pruebas de seguimiento a la trayectoria con las 3 arquitecturas de control para medir los errores máximos y promedios en el espacio de trabajo

CONCLUSIONES

El Banco de pruebas implementado para realizar las pruebas de sutura integran un sistema de Teleoperación para el robot UR5 que permite comandar al robot con Posiciones y Orientaciones distintas a lo largo de una trayectoria creada desde la herramienta Hápatica Geomagic Touch. Para lograr un correcto funcionamiento de este sistema se realiza el diseño de 3 arquitecturas de control basadas en un control cinemático y dos controles Dinámicos. El control cinemático usa un optimizador Jerárquico y los controles dinámicos se modelan con base en el Controlador por Modos Deslizantes y el control por Impedancia.

Durante las pruebas con el control cinemático, se observó un error máximo de ± 0.05 metros en los tres ejes cartesianos durante trayectorias con curvas cerradas o movimientos bruscos. A pesar de estos errores, el tiempo de procesamiento y cálculo de las posiciones articulares fue notablemente bajo, menor a 8 ms en trayectorias suaves. Esto permitió una frecuencia de envío de datos al robot de 0.1 kHz, lo cual es esencial para un comportamiento preciso en tareas que demandan alta exactitud.

La implementación del controlador basado en optimización Jerárquica (HQP) demostró una mejora significativa en la precisión. Los errores en los tres ejes cartesianos del espacio de trabajo se redujeron a un máximo de 8 mm, manteniéndose dentro del rango de precisión establecido para un seguimiento de trayectoria adecuado.

En contraste, las arquitecturas de control dinámicas, específicamente el control dinámico SMC y el control por impedancia, mostraron errores máximos de 18 mm y 40 mm, respectivamente, en el seguimiento de trayectorias. Si bien estos valores se encuentran dentro del rango aceptable, son considerablemente superiores a

los obtenidos con el control cinemático con optimizador, lo que sugiere que para tareas que priorizan la precisión en el seguimiento, las arquitecturas dinámicas podrían requerir una sintonización más fina o ser menos adecuadas.

Finalmente, las pruebas de suturas realizadas sobre un kit de cirugía laparoscópica, integrando todos los elementos del banco de prueba, confirmaron la viabilidad del sistema en un entorno controlado. Se logró un tiempo medio de finalización de 5 minutos con errores máximos de 8 mm en el seguimiento de trayectoria. Es importante destacar la aparición de 3 episodios de Jacobianos indeterminados durante movimientos bruscos, un aspecto a considerar para la robustez del sistema en situaciones dinámicas.

RECOMENDACIONES

 Lorem ipsum dolor sit amet, mei no laboramus gloriatur, no timeam euripidis qui, eu eos aperiam patrioque accommodare. Mei probo accommodare an, ex case minim salutatus sit. Ad doming impetus mei, placerat verterem has no. His assum quaeque et, ea aliquid dissentiet eum. Copiosae evertitur cum te, sea clita disputationi ea.

 Libris ridens malorum cu vis. Per vitae eirmod cotidieque cu. Cum unum mucius alterum eu, nam enim regione appellantur id. Cum putant dignissim te, est dolore essent definiebas ei. Facilisi convenire vix in, dictas delenit et per. Pro tota affert argumentum cu.

e

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Ambulatory and H. C. S. Branch, “National center for health statistics, national hospital ambulatory medical care survey, 2021.” NATIONAL CENTER FOR HEALTH STATISTICS, Tech. Rep., 2021.
- [2] C. I. for Health Information, “Nacrs emergency department visits and lengths of stay by province/territory, 2023–2024 (q1 to q4),” 2024.
- [3] J. Kotcher, *Instrumentación Quirúrgica: Principios y Práctica*. Editorial Médica Panama, 2012.
- [4] A. M. González Cely, A. Miranda Díaz, and J. D. Alviar, “Principios en técnicas de suturas de piel: una guía para estudiantes,” *Medicas UIS*, vol. 31, pp. 65 – 76, 08 2018. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-03192018000200065&nrm=iso
- [5] C. Freschi, V. Ferrari, F. Melfi, M. Ferrari, F. Mosca, and A. Cuschieri, “Technical review of the da vinci surgical telemanipulator,” *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 9, no. 4, pp. 396–406, 2013. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rcs.1468>
- [6] L. Ma and C. Li, “Da Vinci robot-assisted surgery for deep lobe of parotid benign tumor via retroauricular hairline approach: Exploration of a new surgical method for parotid tumors,” *Oral Oncology*, vol. 159, p. 107043, Dec.

2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1368837524003610>
- [7] S. Kalan, S. Chauhan, R. F. Coelho, M. A. Orvieto, I. R. Camacho, K. J. Palmer, and V. R. Patel, “History of robotic surgery,” *Journal of Robotic Surgery*, vol. 4, no. 3, pp. 141–147, 2010. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11701-010-0202-2>
- [8] J. H. Weiss AJ, “Most frequent reasons for emergency department visits, 2018,” December 2021.
- [9] G. S. Sarmiento Valverde, “Burnout en el servicio de emergencia de un hospital,” *Horizonte MÁ(Lima)*, vol. 19, pp. 67 – 72, 01 2019. [Online]. Available: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-558X2019000100011&nrm=iso
- [10] M. Warrén, S.-E. Tronstad, K. Hedberg, J. Bengtsson, P. Jonsson, L. Johansen, and B. Lindvall, “Work-related musculoskeletal disorders when performing laparoscopic surgery,” *Surgical Laparoscopy, Endoscopy Percutaneous Techniques*, vol. 20, pp. 49–56, 2010.
- [11] R. T. Forsch, S. H. Little, and C. Williams, “Laceration repair: A practical approach,” *Am Fam Physician*, vol. 10, no. 95, pp. 628–636, 2017.
- [12] K. Watanabe, T. Kanno, K. Ito, and K. Kawashima, “Single-master dual-slave surgical robot with automated relay of suture needle,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6343–6351, 2018.
- [13] E. You and K. Hauser, “Assisted Teleoperation Strategies for Aggressively Controlling a Robot Arm with 2D Input,” *Robotics: Science and Systems VII*, Jun. 2012. [Online]. Available: <https://direct.mit.edu/books/edited-volume/3728/chapter/123567/Assisted-Teleoperation-Strategies-for-Aggressively>

- [14] M. Syakir, E. S. Ningrum, and I. Adji Sulistijono, “Teleoperation Robot Arm using Depth Sensor,” in *2019 International Electronics Symposium (IES)*, Sep. 2019, pp. 394–399. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8901679>
- [15] I. E. Rassi and J.-M. E. Rassi, “A review of haptic feedback in tele-operated robotic surgery,” *Journal of Medical Engineering Technology*, Jun. 2020.
- [16] M. Sreelakshmi and T. D. Subash, “Haptic technology: A comprehensive review on its applications and future prospects,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, pp. 4182–4187, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317303188>
- [17] H. Mohellebi, A. Kheddar, and S. Espie, “Adaptive haptic feedback steering wheel for driving simulators,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1654–1666, 2009. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4607237>
- [18] S. de Stigter, M. Mulder, and M. M. van Paassen, “Design and evaluation of a haptic flight director,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 30, no. 1, pp. 35–46, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2514/1.20593>
- [19] A. F. Abate, M. Guida, P. Leoncini, M. Nappi, and S. Ricciardi, “A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry,” *Journal of Visual Languages Computing*, vol. 20, no. 5, pp. 318–325, 2009. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1045926X09000548>
- [20] N. Enayati, E. D. Momi, and G. Ferrigno, “Haptics in robot-assisted surgery: Challenges and benefits,” *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 9, pp. 49–65, 2016. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7425205>

- [21] B.-S. M. G.- I. G.- M. Laseca-Arranz A, Sánchez-Dengra B, “Formulaciones para la cicatrización de heridas, presente y futuro,” *Revista Española de Ciencia Farmaceutica*, 2021.
- [22] S. Ballesteros, “Percepción haptica de objetos y patrones realzados: una revisión,” *Psicothema*, vol. 5, no. 2, pp. 311–321, 1993. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2018496>
- [23] C. Spence and A. Gallace, “Making sense of touch,” in *The Neural Bases of Multisensory Processes*. Routledge, 2021, ch. 4, pp. 101–132. [Online]. Available: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781003135616-4/making-sense-touch-charles-spence-alberto-gallace>
- [24] I. A. Ismail, H. Kobayashi, N. Matsuhira, and I. Takahashi, “Teleoperation of an ABB IRB 120 robotic manipulator and BarrettHand BH8-282 using a Geomagic Touch X haptic device and ROS,” in *2018 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2018, pp. 386–391. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8588549>
- [25] X. Wang and H. Furukawa, “Effect of arm pivot joints on stiffness discrimination in haptic environments,” *Multimodal Technologies and Interaction*, vol. 6, no. 11, p. 98, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2414-4088/6/11/98>
- [26] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics*, ser. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, M. J. Grimble and M. A. Johnson, Eds. London: Springer, 2009. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-84628-642-1>
- [27] A. Barrientos, L. F. Peñín, and C. Balaguer, *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill, 2007, google-Books-ID: ArEMPAAACAAJ.
- [28] V. Utkin, J. Guldner, S. S. Ge, F. Lewis, and J. Shi, *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*. CRC Press, 2009.

- [29] H. Tahan and T. G. Cesta, “Managing emergency department overload,” *Nurse Leader*, vol. 3, no. 6, pp. 40–43, 2005.

ANEXOS

Los algoritmos desarrollados