



---

# **Universidad de Valladolid**

FACULTAD DE MEDICINA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO  
GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

## **Modelado y simulación del centro de rotación remoto para robots en cirugía laparoscópica**

Autora:

**D.ª Leyre Fernández Ríos**

Tutor:

**D. Juan Carlos Fraile Marinero**

Valladolid, julio de 2023



---

<b>TÍTULO:</b>	<b>Modelado y simulación del centro de rotación remoto para robots en cirugía laparoscópica</b>
<b>AUTORA:</b>	<b>D.ª Leyre Fernández Ríos</b>
<b>TUTOR:</b>	<b>D. Juan Carlos Fraile Marinero</b>
<b>DEPARTAMENTO:</b>	<b>Ingeniería de Sistemas y Automática</b>

---

**TRIBUNAL**

---

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>D. Javier Pérez Turiel</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>D. Juan Carlos Fraile Marinero</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>D. Jesús Poza Crespo</b>
<b>SUPLENTE 1:</b>	<b>D. Roberto Hornero Sánchez</b>
<b>SUPLENTE 2:</b>	<b>D. Alberto Herreros López</b>

---

---

<b>FECHA:</b>	<b>Julio, 2023</b>
<b>CALIFICACIÓN:</b>	

---



## Resumen

En el presente TFG se lleva a cabo un estudio detallado del concepto de centro de rotación remoto (RCM, *remote center of motion*) en el campo de la robótica y, en concreto, en los sistemas robotizados utilizados en cirugías laparoscópicas. Para ello, se ha llevado a cabo una exhaustiva revisión de la literatura sobre el uso de este mecanismo en robótica, que lo que permite es el movimiento de pivoteo de las herramientas alrededor de las pequeñas incisiones del paciente durante las cirugías mínimamente invasivas, evitando así dañar los tejidos circundantes.

Se ha realizado un modelado de dos de los mecanismos RCM más utilizados hoy en día, que son el RCM circular y el RCM basado en el uso de paralelogramos. Para ello, se han propuesto diferentes modelos, se ha resuelto su estudio cinemático directo y se ha realizado un modelo simbólico para verificar su validez. Por último, se ha llevado a cabo la simulación de estos modelos con un *software* de Matlab, *Robotics Toolbox*.

Para finalizar, se ha propuesto un ejemplo del uso de un mecanismo RCM en un contexto real, como parte de un robot de asistencia quirúrgica, en concreto del sistema da Vinci. Se ha hecho un estudio de las características de su mecánica, en la que se incluye un RCM basado en paralelogramos. Ha sido desarrollado un modelo, a partir de la literatura revisada, del que posteriormente se ha completado su modelado, cinemática directa y se ha realizado una simulación, en la que se aprecia que se ha logrado el objetivo del centro de rotación remoto, que es conservar el punto de fulcro durante el procedimiento quirúrgico.

## Palabras clave

Robótica quirúrgica, cirugía laparoscópica, centro de rotación remoto, modelado, control, simulación, da Vinci.



## Abstract

This dissertation is a detailed study of the concept of remote center of motion (RCM) in the field of robotics and, specifically, in robotic systems used in laparoscopic surgery. To this end, an exhaustive literature review has been carried out on the use of this mechanism in robotics, which is a characteristic such that the surgical tools pivot around their small incision ports and thus avoid damage on the surrounding tissue.

A modelling of two of the most commonly used RCM mechanisms today, namely circular RCM and RCM based on the use of parallelograms, has been carried out. To achieve this, models have been proposed, a direct kinematic study has been carried out and a symbolic model has been created to verify their validity. Finally, the simulation of these models has been performed with Matlab software, Robotics Toolbox.

To conclude, an example of the use of an RCM mechanism in a real context, as part of a surgical assistance robot, specifically the da Vinci system, has been proposed. A study has been made of the characteristics of its mechanics, including a parallelogram-based RCM. A model has been developed, based on the literature reviewed, and its modelling, direct kinematics and simulation have been completed, showing that the objective of the remote center of motion, which is to conserve the fulcrum point during the surgical procedure, has been achieved.

## Keywords

Surgical robotics, laparoscopic surgery, remote center of motion, modelling, control, simulation, da Vinci.



## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi agradecimiento a mi tutor, Juan Carlos Fraile Marinero, por su guía, orientación y motivación a lo largo de todo el desarrollo de este trabajo. Su conocimiento y experiencia han sido de gran ayuda para enriquecer mis ideas y mejorar la investigación.

Querría agradecer también a mis compañeros de grado y, con especial ilusión, a aquellos que se han convertido en mis amigos, por haber sido un gran equipo tanto dentro como fuera de las clases.

Gracias a mi familia, por su apoyo incondicional en todas las decisiones que tomo. El cariño que me hacen sentir siempre ha sido fundamental en este proceso.

Y en resumen gracias a todas las personas que, de una manera u otra, han formado parte de estos cuatro años, que han sido sin duda de los mejores de mi vida.



# Índice de contenido

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	2
1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	3
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	5
2.1. CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA .....	5
2.2. CIRUGÍA ROBÓTICA: CONCEPTO Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	6
2.3. VENTAJAS DE LA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA ROBÓTICA FRENTE A LA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA CONVENCIONAL .....	7
2.4. ROBOTS PARA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA.....	8
2.5. CENTRO DE ROTACIÓN REMOTO EN CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA.....	12
2.5.1. MECANISMO RCM DE SEGUIMIENTO CIRCULAR .....	13
2.5.2. MECANISMO RCM DE DOBLE PARALELOGRAMO .....	14
<b>CAPÍTULO 3. MODELADO CINEMÁTICO DEL CENTRO DE ROTACIÓN REMOTO PARA SU USO EN CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA</b> .....	17
3.1. METODOLOGÍA.....	17
3.2. RCM CIRCULAR .....	20
3.2.1. MODELADO DE RCM CIRCULAR .....	20
3.2.2. SIMULACIÓN DE RCM CIRCULAR.....	25
3.3. RCM BASADO EN PARALELOGRAMOS.....	29
3.3.1. MODELADO DE RCM BASADO EN PARALELOGRAMOS.....	29
3.3.2. SIMULACIÓN DE RCM BASADO EN PARALELOGRAMOS .....	34
<b>CAPÍTULO 4. MODELADO CINEMÁTICO DE ROBOTS DE CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA CON RCM</b> .....	41
4.1. INTRODUCCIÓN .....	41
4.2. ROBOT DA VINCI.....	42
4.2.1. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL ROBOT DA VINCI .....	45
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES</b> .....	61
5.1. GRADO DE CONSECUCCIÓN DE LOS OBJETIVOS .....	61
5.2. CONCLUSIONES EXTRAÍDAS Y APORTACIONES ORIGINALES .....	62
5.3. LIMITACIONES .....	63

5.4. LÍNEAS FUTURAS .....	63
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>69</b>
ANEXO 1 – MODELADO DE UN RCM CIRCULAR.....	69
ANEXO 2 – MODELADO DE UN RCM BASADO EN PARALELOGRAMOS .....	73
ANEXO 3 – MODELADO DE LA PARTE PASIVA DEL BRAZO DEL SISTEMA DA VINCI .....	78
ANEXO 4 – MODELADO DEL BRAZO COMPLETO (PARTE PASIVA Y ACTIVA) DEL SISTEMA DA VINCI.....	81

## Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros DH del RCM circular modelado (en metros y radianes) .....	24
Tabla 2. Valores iniciales y finales (medidos en metros y radianes) de las tres articulaciones del mecanismo RCM circular para cada una de las 18 trayectorias representadas .....	29
Tabla 3. Parámetros DH del RCM paralelogramo modelado .....	32
Tabla 4. Valores iniciales y finales (medidos en radianes) de las cuatro articulaciones del mecanismo RCM paralelogramo para cada una de las 20 trayectorias representadas. Ejemplo 1 .....	39
Tabla 5. Valores iniciales y finales (medidos en radianes) de las cuatro articulaciones del mecanismo RCM paralelogramo para cada una de las 20 trayectorias representadas. Ejemplo 2 .....	39
Tabla 6. Ejemplos de robot MIS que cuentan con mecanismos RCM circulares .....	42
Tabla 7. Ejemplos de robot MIS que cuentan con mecanismos RCM basados en paralelogramos .....	42
Tabla 8. Parámetros DH del brazo pasivo del sistema da Vinci modelado .....	47
Tabla 9. Parámetros DH de todas las articulaciones del modelo da Vinci propuesto .....	49
Tabla 10. Parámetros seleccionados para la simulación del modelo da Vinci.....	54
Tabla 11. Valores iniciales y finales (medidos en metros y radianes) de las nueve articulaciones del brazo da Vinci en cada uno de los movimientos de la trayectoria propuesta .....	58



## Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama de bloques del desarrollo del proyecto .....	3
Ilustración 2. Entorno de una cirugía laparoscópica (Linder Efter, 2021).....	5
Ilustración 3. Robot quirúrgico (Christiansen, 2022) .....	6
Ilustración 4. Sistema da Vinci (HCA Healthcare UK, s.f.) .....	8
Ilustración 5. Sistema Versius (Hospitecnia, 2018) .....	9
Ilustración 6. Sistema quirúrgico Hugo RAS (Roc Clinic) .....	10
Ilustración 7. Sistema ViaCath: instrumento flexible (izquierda) e instrumental externo (derecha) (Peters, Armijo, Krause, Choudhury, & Oleynikov, 2018).....	11
Ilustración 8. Movimiento laparoscópico alrededor del punto de fulcro (Marques Marinho, Costa Bernardes, & Lanari Bo, 2016) .....	12
Ilustración 9. DOF principales de un RCM de mecanismo de seguimiento circular. El primero se consigue con el movimiento alrededor del centro de curvatura y el segundo gracias a la articulación de rotación cuyo eje pasa por el centro de curvatura. (Kuo & Dai, Robotics for Minimally Invasive Surgery: A Historical Review from the Perspective of Kinematics, 2009)....	13
Ilustración 10. Detalles del mecanismo RCM de seguimiento circular (Zhu Yun-ping, 2015) ....	14
Ilustración 11. DOF de un mecanismo RCM basado en doble paralelogramo (Kuo & Dai, Robotics for Minimally Invasive Surgery: A Historical Review from the Perspective of Kinematics, 2009).....	14
Ilustración 12. Detalles del mecanismo RCM basado en doble paralelogramo (Zhu Yun-ping, 2015) .....	15
Ilustración 13. Composición de transformaciones entre sistemas de referencia (Briot & Khalil, 2015) .....	18
Ilustración 14. Descripción general del mecanismo RCM, con los subconjuntos de rotación y traslación (Chng, Duan, & Chui, 2016) .....	21
Ilustración 15. Sistema completo con las dos guías motorizadas (Chng, Duan, & Chui, 2016) ..	22
Ilustración 16. A la izquierda, movimiento roll (rotación $\gamma$ alrededor de un eje fijo X) y a la derecha, movimiento pitch (rotación $\beta$ alrededor de un eje fijo Y) (Chng, Duan, & Chui, 2016)22	
Ilustración 17. Representación esquemática del mecanismo cinemático del RCM circular y el eje de giro de cada una de sus tres articulaciones (Chng, Duan, & Chui, 2016).....	23
Ilustración 18. Esquema realizado con los sistemas de referencia DH para el cálculo de los parámetros en un modelo de RCM circular .....	23

Ilustración 19. Código generado en Matlab para definir las articulaciones que forman parte del RCM circular .....	26
Ilustración 20. Detalles del modelo creado del RCM circular .....	26
Ilustración 21. Simulación del modelo propuesto para un RCM circular.....	27
Ilustración 22. Código generado en Matlab para definir las posibles trayectorias de la herramienta.....	27
Ilustración 23. Posibles trayectorias de la herramienta en el interior del cuerpo del paciente respecto del punto de fulcro.....	28
Ilustración 24. Diferentes estructuras cinemáticas de mecanismos RCM basados en paralelogramos (Trochimczuk, 2017).....	30
Ilustración 25. Representación esquemática del mecanismo cinemático del RCM (Trochimczuk, 2017) .....	30
Ilustración 26. Esquema realizado con los sistemas de referencia DH para el cálculo de los parámetros en un modelo de RCM paralelogramo .....	31
Ilustración 27. Restricciones en los ángulos para la conservación de los paralelogramos en el RCM .....	32
Ilustración 28. Código generado en Matlab para definir las articulaciones que forman parte del RCM basado en paralelogramos .....	35
Ilustración 29. Detalles del modelo creado del RCM basado en paralelogramos .....	35
Ilustración 30. Simulación del modelo propuesto para un RCM basado en paralelogramos.....	36
Ilustración 31. Código de Matlab para definir las trayectorias, modificar los valores de las articulaciones para que cumplan con los criterios y representar el RCM.....	36
Ilustración 32. Diferentes puntos de la trayectoria seguida por las articulaciones del mecanismo RCM .....	37
Ilustración 33. Ejemplo 1 de puntos alcanzados por el TCP del RCM paralelogramo.....	37
Ilustración 34. Ejemplo 2 de puntos alcanzados por el TCP del RCM paralelogramo.....	38
Ilustración 35. Evolución de las diferentes generaciones del sistema da Vinci (Cirugía Robótica Hospital San Rafael , 2021).....	43
Ilustración 36. Brazos PSM y ECM y sus ejes de referencia de un modelo del robot da Vinci (Gondokaryono, Agrawal, Munawar, Nycz, & Fischer, 2019) .....	44
Ilustración 37. Esquema de un brazo del carro robótico del sistema da Vinci, con sus primeros 4 DOF, dados por las primeras cuatro articulaciones ( $J_1$ , $J_2$ , $J_3$ y $J_4$ ) (EntoKey, 2019).....	46
Ilustración 38. Esquema de la estructura del mecanismo RCM del da Vinci, brazo actuado (EntoKey, 2019) .....	46

Ilustración 39. Tipo de RCM incluido en el mecanismo del sistema robótico da Vinci (Freschi, y otros, 2012) .....	47
Ilustración 40. Representación del modelado del brazo pasivo del da Vinci en dos configuraciones distintas .....	48
Ilustración 41. Modelo completo propuesto del sistema robótico da Vinci.....	49
Ilustración 42. Resumen características del modelo creado del brazo da Vinci .....	54
Ilustración 43. Representación en su posición base del esquema del brazo da Vinci propuesto .....	55
Ilustración 44. Parte 1 de los movimientos de la trayectoria especificada del brazo da Vinci ...	56
Ilustración 45. Parte 2 de los movimientos de la trayectoria especificada del brazo da Vinci ...	57
Ilustración 46. Representación gráfica de las coordenadas articulares de $q_1$ , $q_2$ , $q_3$ , $q_4$ , $q_5$ , $q_6$ , $q_7$ , $q_8$ y $q_9$ , respectivamente, a lo largo de toda la trayectoria .....	60



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. INTRODUCCIÓN

La cirugía mínimamente invasiva (MIS, *minimally invasive surgery*), al contrario que la cirugía abierta, que requiere de grandes incisiones para poder acceder a la anatomía de estudio del paciente, utiliza instrumentos quirúrgicos largos, flexibles o rígidos, los cuales se introducen en el cuerpo del paciente a través de pequeñas incisiones (o incluso orificios naturales). El objetivo de la MIS es completar el procedimiento quirúrgico tan segura y rápidamente como sea posible, mientras se minimiza el daño sufrido por los tejidos adyacentes. Este tipo de abordaje es utilizado cada vez con mayor frecuencia como alternativa a la cirugía convencional, debido a las mejoras que aporta en cuanto a la seguridad del paciente, tiempo de recuperación, acortamiento de la estancia hospitalaria y reducción de las complicaciones postoperatorias y dolor (Runciman, Darzi, & Mylonas, 2019).

No obstante, este tipo de procedimientos presenta también una serie de desventajas. Con el objetivo de suplirlas, surge la cirugía mínimamente invasiva asistida por robot (RAS, *robotic assisted surgery*). Durante los procedimientos laparoscópicos, el cirujano observa la operación en un monitor que proporciona una visión bidimensional, lo que conlleva una pérdida de la percepción de profundidad. Además, la cámara es sujeta por otro profesional, por lo que la visión no está controlada por el cirujano, proporcionando un campo de visión algo inestable. Con la ayuda de sistemas robotizados, se pueden paliar estos inconvenientes, principalmente reduciendo la fatiga (Palep, 2009).

Un robot quirúrgico mínimamente invasivo es controlado manualmente o a través de una interfaz informática a la hora de realizar el procedimiento quirúrgico en el interior del cuerpo del paciente. Un robot MIS tiene que manipular el instrumento quirúrgico moviéndose a lo largo de la dirección de penetración y girando alrededor de un punto fijo en el cuerpo del paciente, denominado punto de fulcro. Además, el volumen del espacio de trabajo extracorpóreo debe garantizar que el manipulador quirúrgico no colisione en ningún momento con el paciente durante el procedimiento. Aunque estos objetivos podrían lograrse con una estrategia de control, sería mejor opción utilizar un robot especialmente configurado que realice estos movimientos basándose en su propia configuración estructural, pues esto supondría una reducción de los peligros potenciales causados por un fallo de control o coordinación.

Estas necesidades han llevado a los investigadores a desarrollar un mecanismo que logre un centro de rotación fijo situado a cierta distancia del propio robot. Fue ideado así el concepto de centro de rotación remoto (RCM -*Remote Center of Motion*). Geométricamente, un RCM es un punto fijo en torno al cual rotan algunas articulaciones del propio mecanismo. Además, este punto debería estar situado fuera del volumen del espacio de trabajo cuando se están moviendo

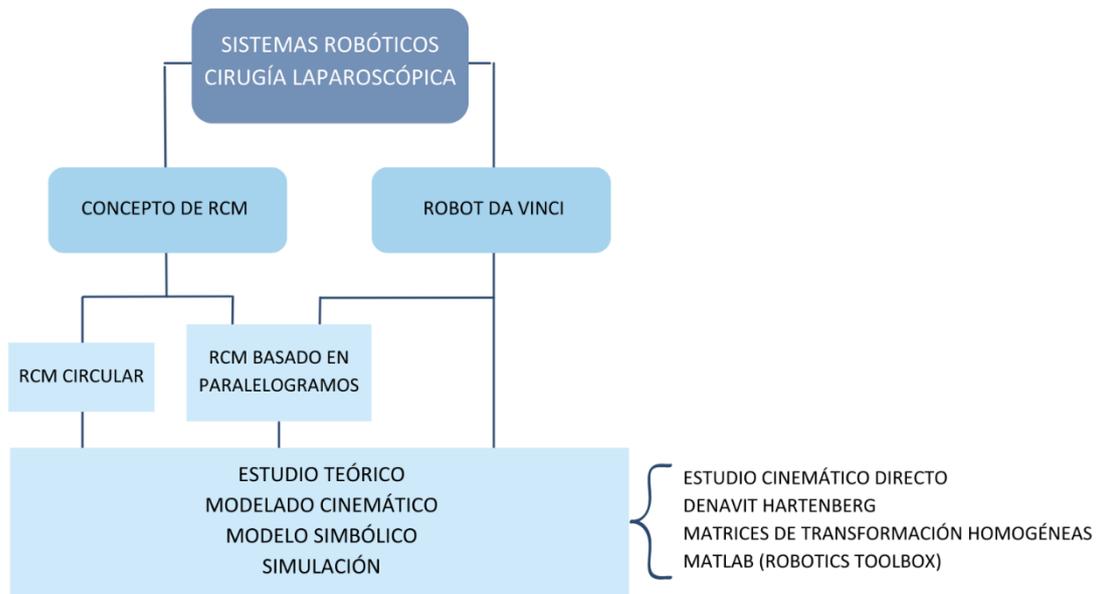
las articulaciones. De manera resumida, un RCM se considera un centro de rotación fijo de una articulación que debe situarse fuera del espacio de trabajo del mecanismo. Así, se considera un mecanismo RCM aquel que tiene uno o más RCM; y un robot RCM es un robot que contiene uno o más mecanismos RCM (Kuo, Dai, & Dasgupta, Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview, 2012).

## 1.2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es realizar un estudio completo del concepto de centro de rotación remoto, una idea clave en los estudios de robótica quirúrgica. Para ello, será necesario realizar un análisis cinemático directo de algunos tipos de RCM, con su correspondiente modelado y posterior simulación. El presente trabajo tiene una finalidad especialmente didáctica, con el objetivo de ilustrar por completo el concepto de centro de rotación remoto que pretende estudiarse y la aportación de ejemplos que apoyen las explicaciones teóricas, incluyendo también un ejemplo en un contexto real y práctico. No obstante, se pretende cumplir una serie de subobjetivos relacionados con el propósito principal de este proyecto.

- Investigación y estudio del concepto de centro de rotación remoto en los procedimientos de cirugía laparoscópica: comprender los conceptos teóricos de este sistema en el contexto de cirugías mínimamente invasivas.
- Desarrollo del modelo cinemático de varios tipos de mecanismos de centro de rotación remoto, para su posterior caracterización matemática.
- Validación de los modelos en un proceso de simulación: verificar la validez del modelo desarrollado mediante herramientas de software especializadas que permitan realizar un modelo simbólico y una simulación del mecanismo RCM.
- Desarrollo de un modelo basado en el sistema robótico da Vinci para estudiar un ejemplo práctico y analizar su centro de rotación remoto. Utilizar el modelo propuesto para simular un caso práctico de cirugía laparoscópica utilizando el robot da Vinci.

En la Ilustración 1 se incluye un esquema en forma de diagrama de bloques de las diferentes etapas en las que va a consistir el desarrollo del presente trabajo.



**Ilustración 1. Diagrama de bloques del desarrollo del proyecto**

### 1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

En esta memoria de TFG se presenta en primer lugar un capítulo dedicado a la introducción de los conceptos que van a ser abordados, recalcando su relevancia dentro de un entorno quirúrgico.

Se dedica después un segundo capítulo a la revisión del estado del arte, con una introducción a los sistemas robóticos en cirugía laparoscópica y a los distintos tipos de RCM que se utilizan en este tipo de procedimientos quirúrgicos.

A continuación, en el capítulo 3, se aborda el modelado cinemático del centro de rotación remoto para su uso en cirugía laparoscópica. Se incluye previamente una explicación de los distintos métodos y algoritmos que se van a utilizar para llevar a cabo dicho modelado. Se realizará un modelado de un RCM circular y de un RCM basado en paralelogramos. Además, en este apartado se incluyen sus respectivas simulaciones en Matlab utilizando librerías especializadas.

En el capítulo 4 se desarrolla el modelado cinemático de un sistema robotizado quirúrgico inspirado en el da Vinci, uno de los instrumentos quirúrgicos más sofisticados que existen hoy en día. Para ello, se estudia su estructura y, en base a sus principales características, se obtiene su modelo cinemático. El capítulo concluye con una simulación del modelado realizado.

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones a las que se ha llegado al finalizar el presente trabajo. Se revisa el grado de consecución de los objetivos que han sido propuestos, realizando un análisis de los resultados alcanzados y considerando las limitaciones que podrían haber afectado al estudio. Se plantean, en último lugar, posibles líneas futuras que pueden seguirse a raíz de este estudio.

Por último, se incluyen anexos y bibliografía.

## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se realiza una breve revisión sobre la cirugía laparoscópica y el uso de la robótica en cirugía laparoscópica, con una pequeña introducción a algunos sistemas robotizados para este tipo de intervenciones. Este capítulo finaliza con una descripción del “centro de rotación remoto” en cirugía laparoscópica (RCM – *remote center of motion*).

### 2.1. CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

De acuerdo con (Clínica Universidad de Navarra, s.f.), la cirugía laparoscópica es una técnica quirúrgica menos invasiva y traumática que la cirugía convencional. En estas cirugías se realizan 3 o 4 pequeñas incisiones, de 0.5 a 1 cm, en el paciente, por donde se introducen los instrumentos con los que se opera. Otra mínima incisión, en un pliegue longitudinal del ombligo, permite la introducción de una cámara, denominada laparoscopio, con la que se puede visualizar el interior de la cavidad pélvica-abdominal. Este entorno viene representado en la Ilustración 2.

Durante la intervención se introduce una pequeña cantidad de gas (dióxido de carbono, normalmente) en la cavidad abdominal, con el fin de aumentar el espacio entre órganos y poder observarlos con mayor claridad.



**Ilustración 2. Entorno de una cirugía laparoscópica (Linder Efter, 2021)**

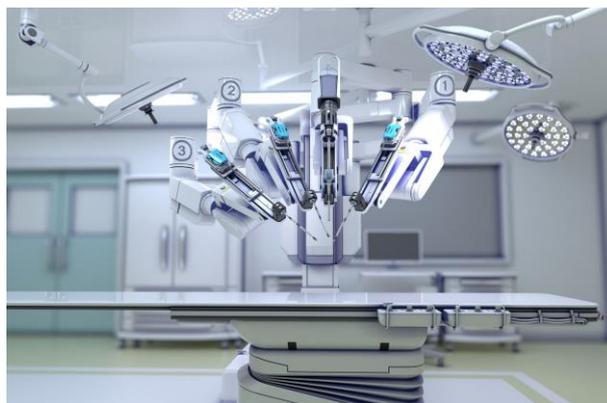
El laparoscopio se compone de una fuente de luz que se transmite por fibra óptica, de un equipo de vídeo, con uno o varios monitores y de la herramienta quirúrgica que se introduce en la cavidad pélvica-abdominal (Cuesta, 2000).

Algunos de los procedimientos quirúrgicos laparoscópicos más comunes son: colecistectomía, cirugía del reflujo gastroesofágico, cirugía de estómago, diverticulitis, enfermedad pancreática, cirugía hepática, cirugía esplénica... Además, gracias al desarrollo que ha experimentado esta técnica, se ha extendido su uso a un gran número de especialidades y ahora el abordaje laparoscópico se encuentra también indicado en algunos casos de cirugía ginecológica, cirugía pediátrica, cirugía vascular, etc. La cirugía laparoscópica también está relacionada con procedimientos de carácter diagnóstico, como puede ser la valoración del paciente politraumatizado (Clínica Universidad de Navarra, s.f.).

Esta técnica ofrece numerosas ventajas: se reduce la superficie dañada en gran medida, disminuye el dolor postoperatorio, las posibilidades de infección o de generación de una hernia son menores y se reduce también la pérdida de sangre. Además, permite una mejora en la estética de la operación y reducir el tiempo de recuperación del paciente (Ietto, Amico, Pettinato, Iori, & Carcano, 2017).

## 2.2. CIRUGÍA ROBÓTICA: CONCEPTO Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA

La cirugía robótica o robotizada es un procedimiento quirúrgico en el cual el cirujano controla de manera remota los instrumentos quirúrgicos conectados a un sistema robotizado (Ilustración 3). Este es dirigido por el profesional a través de un sistema de manipulación y un potente sistema computarizado. La cirugía robótica generalmente está asociada con procedimientos realizados a través de pequeñas incisiones (Pereira Fraga, 2017).



**Ilustración 3. Robot quirúrgico (Christiansen, 2022)**

El campo donde la cirugía robótica ha experimentado mayor desarrollo es el urológico, aunque, en la actualidad, prácticamente cualquier procedimiento laparoscópico puede ser realizado con robótica laparoscópica (general, ginecología, torácica, maxilofacial, oftalmología, etc.). Los procedimientos que experimentan una especial mejora son aquellos que se realizan en campos reducidos o de difícil acceso (Pereira Fraga, 2017).

Algunas de las patologías comúnmente tratadas con cirugía robótica son: cirugías generales, extirpación de la vesícula biliar, cirugía de derivación gástrica, tumores en la garganta o en la lengua, cirugía colorrectal, prostatectomía, reemplazo total de cadera... (Christiansen, 2022).

Algunos autores (Cordero Sánchez, Tafur Puentes, & Rodríguez López, 2022) plantean que la cirugía robótica se convertirá con el tiempo en la vía de abordaje de preferencia.

Aunque la cirugía robótica comenzó a plantearse como hipótesis desde 1967, su origen se sitúa en 1985 con el uso del robot PUMA 560 para la toma de una biopsia cerebral. Una de las primeras intervenciones fue la cirugía colorrectal robótica, descrita por primera vez en el año 2001, y cinco años más tarde se practicó por primera vez una escisión total mesorrectal.

En cuanto a la cirugía hepatobiliopancreática, a lo largo de cientos de años se ha evolucionado en los abordajes quirúrgicos y la primera colecistectomía asistida por robot se realizó hacia 1997 (Cordero Sánchez, Tafur Puentes, & Rodríguez López, 2022). En el año 2010 se logra la primera cirugía completamente robotizada utilizando el sistema robótico da Vinci y el sistema McSleepy, que automatiza la anestesia en los quirófanos (Calvo, 2023).

### 2.3. VENTAJAS DE LA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA ROBÓTICA FRENTE A LA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA CONVENCIONAL

La cirugía laparoscópica asistida por robot es comparable al abordaje laparoscópico convencional en términos de tiempo operatorio, tasa de conversión a cirugía abierta, morbilidad, seguridad oncológica y supervivencia tanto a corto como a largo plazo, según los resultados del estudio (Gutiérrez Delgado, Mera Velasco, Sánchez Gallegos, & Jiménez Rodríguez, 2021).

Son numerosos los estudios que se han realizado comparando los resultados de diferentes cirugías utilizando un abordaje laparoscópico con o sin la asistencia de un robot. En ellos se evidencian también las ventajas de la cirugía laparoscópica sobre la cirugía abierta. Tras revisar la correspondiente bibliografía, algunos resultados concretos encontrados en diferentes investigaciones y que evidencian varias de las ventajas del abordaje robótico frente a la laparoscopia convencional se resumen en los siguientes párrafos:

La fístula pancreática postoperatoria es una de las complicaciones más graves después de la cirugía por cáncer gástrico. Este riesgo disminuye notablemente con la cirugía robótica respecto de la gastrectomía laparoscópica (Washio, Yamashita, Niihara, Hosoda, & Hiki, 2020).

En cuanto a la cirugía de cabeza y cuello, el abordaje robótico ayuda a reducir la morbilidad quirúrgica y aumentar la seguridad del paciente en áreas de difícil acceso (Frenkel, y otros, 2018).

Las ventajas de la cirugía robótica en la timectomía (resección o extirpación quirúrgica del timo) incluyen una reducción de la pérdida de sangre, menos complicaciones postoperatorias, una estancia hospitalaria más corta y una menor tasa de margen positivo (Joong Na & Hyun Kang, 2020).

Además, varios estudios demuestran los beneficios de la cirugía robótica en los procedimientos de extirpación de tumores pulmonares, incluyendo una menor pérdida de sangre, menor tasa de complicaciones, reduciendo la estancia hospitalaria, además de una mejor extirpación de los ganglios linfáticos (Joong Na & Hyun Kang, 2020).

En definitiva, la cirugía robótica ha demostrado una visualización mejorada y una destreza y precisión superior durante procedimientos mínimamente invasivos. Por lo que, para aquellos pacientes en los que está indicado este tipo de abordaje, los beneficios son significativos (Cordero Sánchez, Tafur Puentes, & Rodríguez López, 2022).

#### 2.4. ROBOTS PARA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

La cirugía laparoscópica es una de las áreas más activas en cuanto a la investigación y el desarrollo de los robots quirúrgicos (Kawashima, Kanno, & Tadano, 2019). A continuación, se realizará una pequeña descripción de algunos de los sistemas robotizados de cirugía laparoscópica más populares.

Durante más de 21 años, el sistema de cirugía robótica da Vinci, de Intuitive Surgical, ha revolucionado el campo de la cirugía mínimamente invasiva (Ilustración 4). En concreto el sistema da Vinci XI, es el elegido por cirujanos de todo el mundo. Este robot esclavo y no programable proporciona una visión 3D de la anatomía del paciente a la vez que mejora la precisión y destreza del cirujano disminuyendo los posibles temblores. Cuenta con instrumentos de gran precisión y posee un sistema de control ergonómico. Los principales componentes, que serán desarrollados en profundidad más adelante, son: la consola de mando, el carro robótico con cuatro brazos conectados y una torre laparoscópica. Es utilizado principalmente en procedimientos de ginecología, urología o cirugía general (Surichaqui, Aroni, Pari, Rodríguez, & Arbulú, 2021).



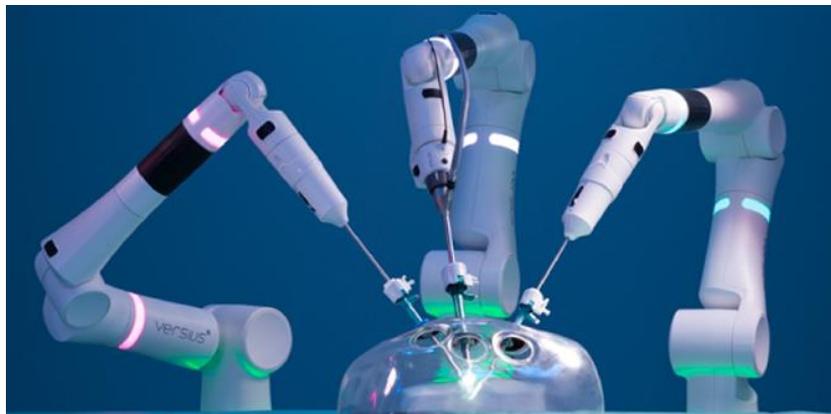
Ilustración 4. Sistema da Vinci (HCA Healthcare UK, s.f.)

Versius es un sistema robótico quirúrgico diseñado para ayudar a los cirujanos a realizar intervenciones quirúrgicas mínimamente invasivas (Ilustración 5). Forma parte de la compañía inglesa CMR Surgical, que cuenta desde hace 2 años con una filial en España, CMR Surgical Spain SL. Su objetivo es optimizar la colocación de los accesos quirúrgicos, manteniendo todos los beneficios de la robótica.

Además de brazos modulares independientes con articulaciones completamente móviles y una consola con visualización 3D de alta definición, su ventaja más destacable sería su pequeño tamaño. Esto permite que su desplazamiento sea asequible no solo en el propio quirófano, sino también entre distintas salas.

Cada brazo de instrumentación está unido a su propio carro, formando distintas unidades móviles auxiliares o BSU (*"bedside unit"*). Normalmente, además del que incluye la cámara, se utilizan hasta 4 brazos de instrumentación, con 7 grados de libertad cada uno. El cirujano los controla desde la consola abierta, junto con un monitor de imagen 3D de la cámara endoscópica y un pequeño panel de control. Con esto, se consigue no solo una gran precisión, control y destreza, sino además un nuevo concepto de trabajo en equipo en el quirófano, ya que el equipo quirúrgico tiene en todo momento fácil acceso al paciente, sin perder la comunicación con el cirujano (Morton, y otros, 2020).

Versius es utilizado tanto en los campos de urología y ginecología como para realizar intervenciones colorrectales o gastrointestinales (De Andrés, 2023).



**Ilustración 5. Sistema Versius (Hospitecnia, 2018)**

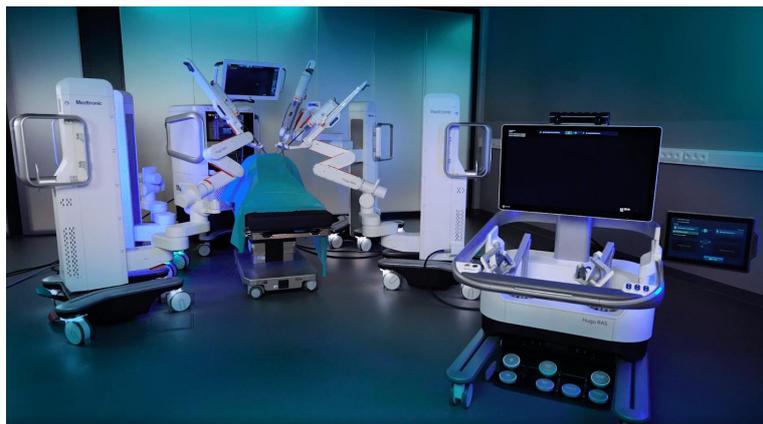
El sistema Hugo RAS es el último sistema robótico presentado por Medtronic y surge con el objetivo de que los hospitales superen las barreras económicas para poder acceder a la laparoscopia robótica (Ilustración 6). Además, cuenta con una nube de vídeos, *Touch Surgery Enterprise*, que, preservando siempre el anonimato, almacena vídeos que graba durante los procedimientos de ginecología y cirugía general.

Se compone de una consola abierta, una torre y cuatro carros de brazos; cada uno de los cuales es independiente y extensible, gracias a sus 6 articulaciones, y de altura modulable en su eje vertical. Estos brazos robóticos se conectan al trócar. Los instrumentos instalados se

controlan con un motor llamado “*instrument drive unit*”. Además, el objetivo es habilitar el sistema para que sea compatible con muchos de los instrumentos ya utilizados en los procedimientos laparoscópicos y abiertos.

Esta independencia dota al procedimiento quirúrgico de gran flexibilidad, pero por otro lado aumenta la complejidad de la coordinación de todos los elementos para evitar cualquier problema logístico o clínico. La consola, desde la que el cirujano controla todos los elementos con unos dispositivos tipo “*pistol grip*”, tiene varios elementos cuya función es optimizar la ergonomía para el usuario. Dispone de dos monitores. Uno muestra la imagen HD en 3D, y el otro, dispone de un panel interactivo para modificar diversos parámetros, como filtros, la escala de movimiento, rotación de la cámara... Cuenta con una unidad de alineamiento por láser, que hay que colocar previamente a la operación en paralelo con la camilla y orientado con el cuerpo del paciente. Esto permite crear un marco de referencia y que cada brazo pueda medir el ángulo de acceso al paciente (GueliAlleti, y otros, 2022).

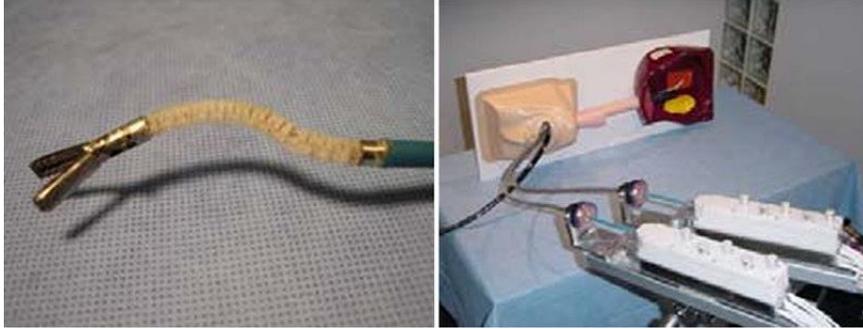
El sistema robótico Hugo RAS es empleado principalmente en el campo de la urología para llevar a cabo una amplia gama de procedimientos quirúrgicos mínimamente invasivos (GueliAlleti, y otros, 2022).



**Ilustración 6. Sistema quirúrgico Hugo RAS (Roc Clinic)**

El sistema ViaCath es un catéter flexible y esterilizable de diagnóstico (Ilustración 7) desarrollado por BIOTRONIK, en Berlín (Alemania). Se trata de un robot endoscópico teleoperado que consiste en una consola que controla instrumentos esclavos de eje largo, los cuales se mueven a lo largo de un colonoscopio o endoscopio estándar a través de un sobretubo articulado flexible. Gracias a su interfaz háptica y sus instrumentos intercambiables, este robot consigue una alta precisión en sus procedimientos.

Se han diseñado específicamente para este sistema instrumentos de diámetro fino y electrónicamente controlados con efectores finales como pinzas, tijeras, electrocauterizadores... Estos instrumentos, junto con el brazo de posicionamiento, tienen siete grados de libertad (DOF – “*degree of freedom*”). El ya mencionado sobretubo es responsable de situar correctamente el endoscopio y los dos canales utilizados por los instrumentos (Peters, Armijo, Krause, Choudhury, & Oleynikov, 2018).



**Ilustración 7. Sistema ViaCath: instrumento flexible (izquierda) e instrumental externo (derecha)**  
(Peters, Armijo, Krause, Choudhury, & Oleynikov, 2018)

Al ser un campo en plena expansión, es interesante comentar también las líneas futuras que se seguirán en los próximos años. Algunos de los retos que pretenden cumplirse en el ámbito de los robots quirúrgicos son (Kawashima, Kanno, & Tadano, 2019):

1. Conseguir que estos dispositivos sean lo más compactos y económicos posible.
2. Mejorar el *feedback* háptico que recibe el cirujano.
3. Trabajar en nuevos abordajes aún menos invasivos como SPA (cirugía robótica de puerto único) o NOTES (cirugía endoscópica transluminal a través de orificios naturales).
4. Avanzar en el campo de la telecirugía.
5. Desarrollar aplicaciones de realidad aumentada en el quirófano.
6. Lograr la automatización de algunas de las tareas que se llevan a cabo durante el procedimiento quirúrgico.

Se están desarrollando robots quirúrgicos con una estructura flexible, con el objetivo de avanzar en los conceptos de SPA y NOTES, para lograr una cirugía aún menos invasiva.

Algunos autores (Kawashima, Kanno, & Tadano, 2019) consideran que el guiado por imagen en cirugía robótica mediante realidad aumentada representa una importante revolución para mejorar la seguridad y hacer frente a las dificultades asociadas a los abordajes mínimamente invasivos. Por ejemplo, la formación preoperatoria, como la imagen de TAC (tomografía axial computarizada), puede mezclarse con la imagen real para ayudar a los cirujanos a encontrar el tumor oculto.

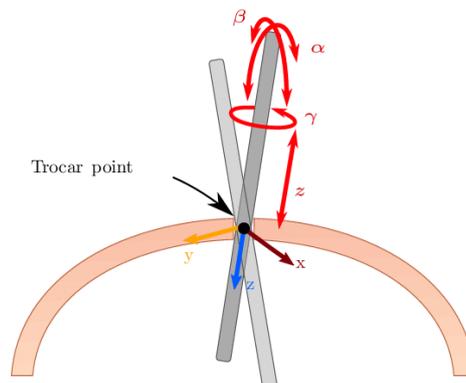
Por otro lado, un nivel superior de autonomía podrá conducir en el futuro a lograr procedimientos quirúrgicos completos sin necesidad de que haya ningún tipo de intervención humana. El objetivo actualmente es conseguir reducir la fatiga del cirujano durante el procedimiento. Los sistemas semiautónomos ya han empezado a utilizarse en procedimientos quirúrgicos y se han empleado en distintas aplicaciones clínicas (Kawashima, Kanno, & Tadano, 2019).

La robótica quirúrgica llevará la cirugía al siguiente nivel con la combinación de robots e IA (inteligencia artificial). El robot de asistencia quirúrgica maestro-esclavo se posiciona como Cirugía 3.0, y la próxima generación se conocerá como Cirugía 4.0. Todo esto contribuirá a que la cirugía sea menos costosa, basada en pruebas, más sencilla y más segura (Kawashima, Kanno, & Tadano, 2019).

## 2.5. CENTRO DE ROTACIÓN REMOTO EN CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

Las principales dificultades del abordaje laparoscópico robótico tienen su origen en las restricciones de movimiento. Estas resultan, precisamente, del tamaño tan pequeño de las incisiones que se practican al paciente.

Como ya ha sido explicado, la cirugía mínimamente invasiva se caracteriza por el uso de pequeñas incisiones de menos de 10 mm, a través de las cuales se introducen herramientas en el cuerpo del paciente. Normalmente, los movimientos de los instrumentos largos y estrechos que se introducen en la incisión se modelan utilizando un punto de pivoteo, denominado punto de fulcro. Esto significa que el movimiento de la herramienta quirúrgica queda reducido a cuatro grados de libertad (ver Ilustración 8), tres rotacionales ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) y uno de traslación ( $z$ ) y el movimiento que realiza fuera de la cavidad se refleja en el interior.



**Ilustración 8. Movimiento laparoscópico alrededor del punto de fulcro (Marques Marinho, Costa Bernardes, & Lanari Bo, 2016)**

Esta restricción se consigue con mecanismo de control de la herramienta denominado centro de rotación remoto, que se sitúa sobre el punto de fulcro. De esta manera, se previenen los posibles daños que pueda sufrir el paciente debidos a un fallo en el controlador (Aksungur, Aydin, & Yakut, 2019).

Los elementos especializados utilizados en los robots quirúrgicos que sostienen y posicionan las herramientas quirúrgicas se denominan mecanismos RCM. Estos mecanismos se utilizan como efectores finales en las operaciones quirúrgicas. Si una pieza del sistema puede

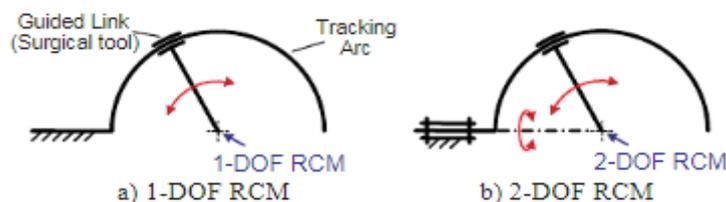
girar alrededor de un punto fijo alejado del instrumento, sin que haya una articulación de rotación física en el punto fijo, se dice que se tiene un mecanismo RCM (Aksungur, Aydin, & Yakut, 2019).

Una posible clasificación de las estructuras cinemáticas de robots utilizados en MIS se basa en los distintos tipos de mecanismos RCM: isocentros, arcos de seguimiento circular, paralelogramos, transmisión de correa síncrona, enlaces esféricos, mecanismos paralelos de muñeca y cadenas de engranajes (Kuo, Dai, & Dasgupta, Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview, 2012).

Cada uno de ellos tiene sus propias ventajas e inconvenientes. A continuación, se analizarán con más detalle dos de los más comunes:

### 2.5.1. MECANISMO RCM DE SEGUIMIENTO CIRCULAR

Este tipo de mecanismos RCM consiste en utilizar como base un “camino” circular y un objeto pasivo que se desliza sobre él. El primer grado de libertad lo encontramos en el centro de curvatura. Además, si el arco se pivota respecto de la base con una articulación de rotación, se añadirá otro DOF (Kuo & Dai, Robotics for Minimally Invasive Surgery: A Historical Review from the Perspective of Kinematics, 2009). Los grados de libertad se muestran en la Ilustración 9.



**Ilustración 9. DOF principales de un RCM de mecanismo de seguimiento circular. El primero se consigue con el movimiento alrededor del centro de curvatura y el segundo gracias a la articulación de rotación cuyo eje pasa por el centro de curvatura. (Kuo & Dai, Robotics for Minimally Invasive Surgery: A Historical Review from the Perspective of Kinematics, 2009)**

Esto significa que estos dos movimientos principales pueden ser realizados a partir de la propia estructura mecánica de la herramienta y su restricción. Además, se pueden conseguir otros dos DOF adicionales generados directamente por dos actuadores.

El principio de movimiento de este tipo de mecanismo se detalla a continuación (Zhu Yun-ping, 2015) y se incorpora una representación gráfica en la Ilustración 10:

- El centro de la órbita circular coincide con el punto fijo (punto de fulcro) de la cirugía.
- La articulación de rotación cuyo eje de rotación pasa por el centro de la órbita circular genera un DOF rotacional que gira alrededor del punto fijo.

- La restricción mecánica entre la órbita circular y la herramienta crea otro DOF rotacional cuando esta gira alrededor del punto fijo. De esta manera, la articulación de traslación crea un DOF rotacional.
- El tercer DOF rotacional (que es capaz de girar la herramienta sobre sí misma) y el DOF de traslación (que consigue el movimiento de traslación de la herramienta) se consiguen gracias a dos servomotores en el propio manipulador.

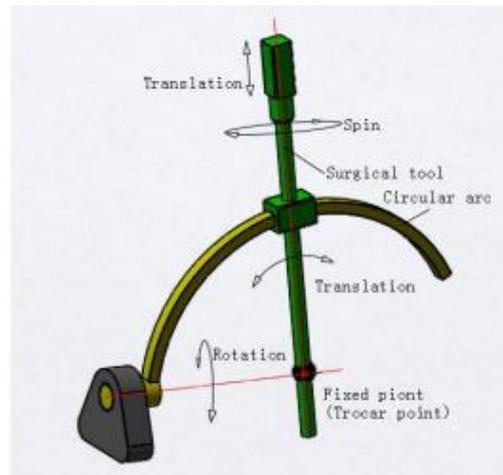


Ilustración 10. Detalles del mecanismo RCM de seguimiento circular (Zhu Yun-ping, 2015)

### 2.5.2. MECANISMO RCM DE DOBLE PARALELOGRAMO

El mecanismo RCM basado en paralelogramos es considerado uno de los más extendidos, gracias a su sencillez y la variedad de estructuras que ofrece. Una de las principales ventajas es su mayor rigidez en comparación con una estructura en serie. Aunque tiene un espacio de operación restringido, un paralelogramo puede ser una buena elección para un robot MIS. Uno de los tipos más comunes es el que incluye en su mecanismo dos paralelogramos. El mecanismo de doble paralelogramo tiene dos DOF, que consiguen a partir de los movimientos de inclinación y rotación (Zhu Yun-ping, 2015). La obtención de estos dos grados de libertad a partir de las rotaciones se muestra en la Ilustración 11.

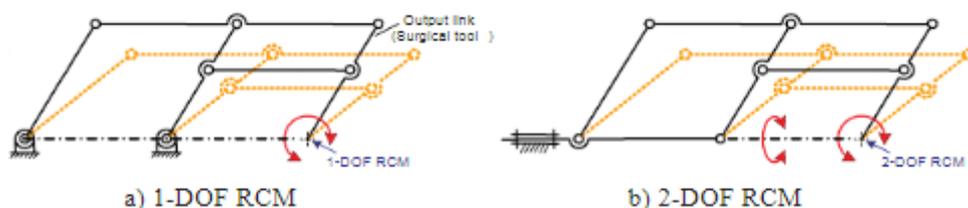


Ilustración 11. DOF de un mecanismo RCM basado en doble paralelogramo (Kuo & Dai, Robotics for Minimally Invasive Surgery: A Historical Review from the Perspective of Kinematics, 2009)

A continuación, se detalla el principio de movimiento de este tipo de mecanismo (Zhu Yun-ping, 2015) y se incluye una representación gráfica en la Ilustración 12:

- El punto de intersección entre el eje de rotación del brazo y el eje de rotación del instrumento es el punto fijo (es decir, el punto de fulcro).
- El eje rotacional de la articulación rotacional situada en el brazo del robot pasa por este punto de fulcro. De esta manera, se genera un DOF rotacional que gira alrededor del punto fijo.
- La restricción mecánica del mecanismo de doble paralelogramo crea el DOF rotacional adicional que gira alrededor del punto fijo.
- Al igual que antes, con el uso de dos servomotores en el instrumento, se pueden conseguir el tercer DOF rotacional y un DOF de traslación adicional.

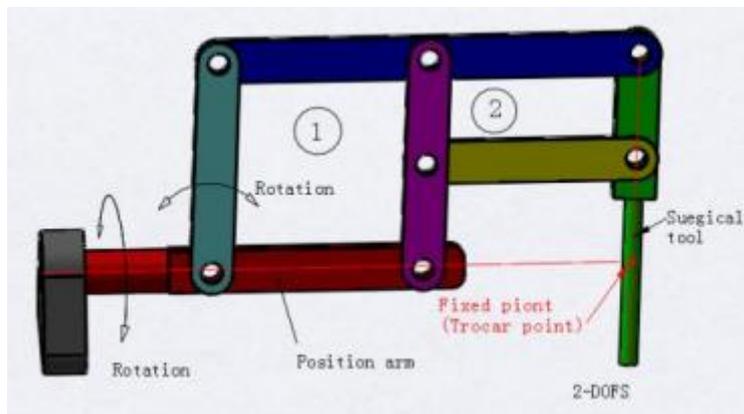


Ilustración 12. Detalles del mecanismo RCM basado en doble paralelogramo (Zhu Yun-ping, 2015)



## CAPÍTULO 3. MODELADO CINEMÁTICO DEL CENTRO DE ROTACIÓN REMOTO PARA SU USO EN CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

En el presente capítulo se continuará profundizando en el concepto de centro de rotación remoto para su utilización en procedimientos laparoscópicos. Para empezar, se explicará la metodología seguida durante el modelado, con la aclaración de algunos conceptos clave para llevar a cabo el modelado cinemático directo. A continuación, se realizará un análisis más exhaustivo de los dos sistemas de RCM explicados en el capítulo anterior, el RCM circular y el RCM basado en paralelogramos, incluyendo un proceso de modelado de ambos con su correspondiente modelo simbólico. Por último, una vez completado el proceso del modelado cinemático, se realizará una simulación en el entorno Matlab de cada uno de ellos.

### 3.1. METODOLOGÍA

El objetivo del análisis de cinemática directa en el estudio de un robot es llegar a caracterizar el valor de la posición final de este. Esta solución es una función de los valores articulares (de traslación o de rotación), que funcionan como variables independientes. Aunque existen diversos métodos para la resolución de este problema, se elegirán las matrices de transformación homogéneas (MTH) y el método de representación sistemática de Denavit-Hartenberg (DH) para el desarrollo de la cinemática directa de los sistemas de interés (RCM circular y RCM basado en paralelogramos). Esta combinación proporciona la ventaja de conocer la posición de cada una de las articulaciones, además de la posición final del manipulador, que es el objetivo principal del problema (Ramírez Arias & Rubiano Fonseca, 2012).

Las matrices de transformación homogéneas se basan en el concepto de transformación de sistemas de referencia, fundamental a la hora de realizar el modelado y la programación de un robot. Tomando como referencia el artículo de investigación (Ramírez Arias & Rubiano Fonseca, 2012), se procede a explicar todos estos conceptos clave que forman parte de la metodología seguida.

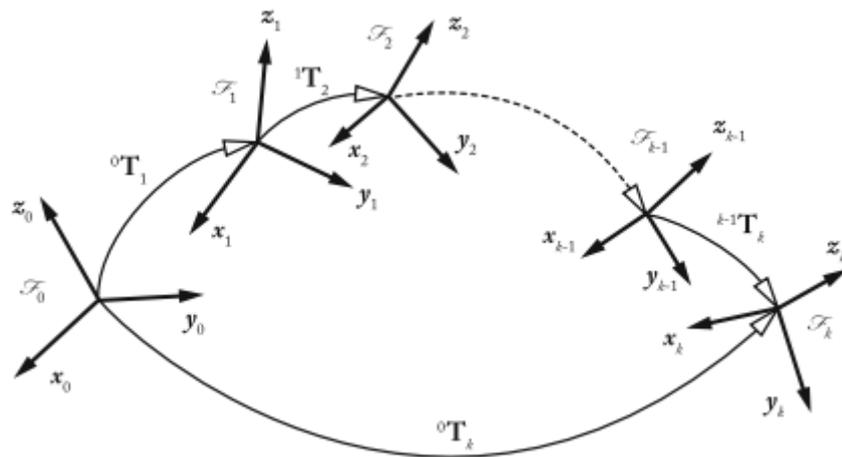
El objetivo final será caracterizar la posición exacta del final de la herramienta respecto al sistema de referencia base en función del valor de cada articulación. Se elegirán  $n+1$  sistemas de referencia diferentes, siendo  $n$  el número de articulaciones del robot ( $i_0, i_1, i_2 \dots i_n$ ). La representación de DH, con sus parámetros correspondientes, se reemplaza en la matriz de transformación homogénea  ${}^{i-1}A_i$ .

Esta es una matriz cuadrada de dimensiones 4x4 y contiene información relativa a la posición y orientación del sistema de referencia  $\{S_i\}$  respecto al sistema de referencia  $\{S_{i-1}\}$ . Por ejemplo, la MTH  ${}^0A_1$  representa la posición y orientación del sistema de referencia  $\{S_1\}$  con respecto del sistema de referencia  $\{S_0\}$ . La MTH  ${}^0A_n$  es aquella que da información sobre el sistema de referencia asociado a la posición final del manipulador respecto al sistema de referencia base o  $\{S_0\}$ . Esta matriz se denomina comúnmente T y puede obtenerse a partir de la composición de MTH entre distintas articulaciones consecutivas, multiplicándolas de manera sucesiva. Su obtención se indica en las siguientes ecuaciones:

$$T = {}^0A_n = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \dots {}^{n-1}A_n$$

$$T = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}A_i$$

Se puede ver la representación gráfica de esta composición de transformaciones en la Ilustración 13, que muestra las diferentes transformaciones (con las rotaciones y traslaciones necesarias) para pasar de un sistema de referencia  $\{S_0\}$  a un sistema  $\{S_k\}$ .



**Ilustración 13. Composición de transformaciones entre sistemas de referencia (Briot & Khalil, 2015)**

Para el cálculo de cada MTH  ${}^{i-1}A_i$  se deben definir primero los parámetros DH correspondientes, los cuales están basados en las características geométricas y los sistemas de referencia tomados para cada articulación.

Los pasos del algoritmo Denavit Hartenberg se detallan a continuación (Barrientos, Felipe Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007):

1. Se numeran los eslabones comenzando por 1 (que corresponde al primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con  $n$  (que corresponde al último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 a la base fija del robot.
2. Se numera cada articulación comenzando por 1 (que corresponde al primer grado de libertad) y acabando en  $n$ .
3. Se localiza el eje de cada articulación. Si esta es de rotación, el eje será su propio eje de giro. Por el contrario, si es prismática, será el eje a lo largo del cual se desplaza.
4. Para  $i$  de 0 a  $n-1$ , se sitúa el eje  $z_i$  sobre el eje de la articulación  $i+1$ .
5. Se sitúa el origen del sistema de referencia base  $\{S_0\}$  en cualquier punto del eje  $z_0$ . Los ejes  $x_0$  e  $y_0$  se sitúan de modo que formen un sistema dextrógiro con  $z_0$  (es decir,  $z_0$  surge del producto vectorial de  $x_0$  con  $y_0$ ).
6. Para  $i$  de 1 a  $n-1$ , se sitúa el origen del sistema  $\{S_i\}$  en la intersección del eje  $z_i$  con la línea normal común a  $z_{i-1}$  y  $z_i$ . Si ambos ejes se cortaran, se situaría  $\{S_i\}$  en el punto de corte; mientras que, si fueran paralelos,  $\{S_i\}$  se situaría en la articulación  $i+1$ .
7. Se coloca  $x_i$  en la línea normal común a  $z_{i-1}$  y  $z_i$ .
8. Se coloca  $y_i$  de manera que forme un sistema dextrógiro con  $x_i$  y  $z_i$  (es decir,  $z_i$  surge del producto vectorial de  $x_i$  con  $y_i$ ).
9. Se sitúa el sistema  $\{S_n\}$  en el extremo del robot, de modo que  $z_n$  coincida con la dirección de  $z_{n-1}$  y  $x_n$  sea perpendicular a  $z_{n-1}$  y  $z_n$ .

Una vez obtenido el modelo del robot, es posible obtener los cuatro parámetros DH para cada articulación. Cada parámetro representa una transformación diferente (Barrientos, Felipe Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007):

- $d_i$ : distancia (medida a lo largo del eje  $z_{i-1}$ ) desde  $\{S_{i-1}\}$  a [intersección de  $z_{i-1}$  con  $x_i$ ]. Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.
- $\theta_i$ : ángulo desde  $x_{i-1}$  a  $x_i$  medido a lo largo del eje  $z_{i-1}$ . Se trata de un parámetro variable en articulaciones de rotación.
- $a_i$ : distancia (medida a lo largo del eje  $x_i$ ) desde [intersección de  $z_{i-1}$  con  $x_i$ ] a  $\{S_i\}$ .
- $\alpha_i$ : ángulo desde  $z_{i-1}$  a  $z_i$  medida a lo largo del eje  $x_i$ .

Obtenidos estos parámetros para cada articulación, se pueden calcular las correspondientes MTH. Las matrices A caracterizarán la relación entre eslabones consecutivos, y, para conocer la relación entre eslabones no consecutivos serán necesarias las matrices T, que, como ya ha sido comentado, se obtienen como producto de un conjunto de matrices A.

La expresión general de una matriz de transformación A obtenida a partir de los parámetros DH para una determinada articulación i es la siguiente:

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

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En la expresión reducida, R se corresponde con una submatriz 3x3 de rotación de los ejes del sistema i respecto a los ejes del sistema i-1; mientras que T es una submatriz 3x1 que expresa la traslación del origen del sistema i respecto al origen del sistema i-1, a lo largo de cada uno de sus tres ejes.

De esta manera, se calculará una MTH por cada articulación del robot y estas se multiplicarán para llegar a la matriz de transformación T, que nos permitirá conocer la posición y orientación del punto final de la herramienta respecto de un sistema de referencia base en función del valor de sus coordenadas articulares, con lo que quedará resuelto el problema cinemático directo.

Cuando se haya completado el modelado de ambos mecanismos de RCM, se llevará a cabo su simulación en Matlab (versión R2022a). Se utilizará para ello *Robotics Toolbox* (versión 4.0); un paquete de software que permite al usuario de Matlab crear y trabajar con tipos de datos característicos en el campo robótico, como son transformaciones homogéneas, cuaternios y trayectorias. Esta librería, desarrollada por el ingeniero australiano Peter Corke, incluye funciones para el trabajo con manipuladores de tipo *serial-link* o de articulaciones en serie. Entre estas aplicaciones se encuentran: resolución de cinemática directa e inversa, trabajo con jacobianos y resolución de dinámica directa e inversa (Corke, 1996).

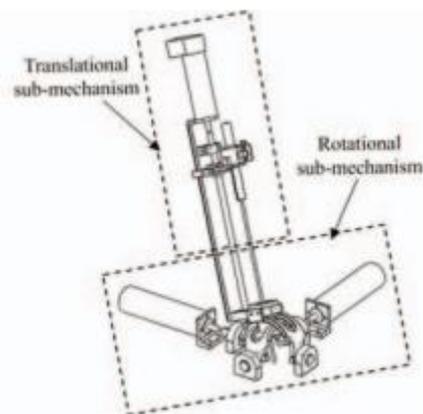
## 3.2. RCM CIRCULAR

### 3.2.1. MODELADO DE RCM CIRCULAR

A continuación, se procede a explicar las características de un RCM desarrollado por la Universidad Nacional de Singapur (Chng, Duan, & Chui, 2016), con el objetivo de tomarlo como modelo para realizar posteriormente un modelado propio de este tipo de mecanismo. Este dispositivo esférico consiste en dos arcos semicirculares, los cuales se mueven gracias a un sistema motorizado. El mecanismo RCM propuesto se divide en dos partes. Primero, una componente rotacional será la que controle la dirección de la herramienta, con el objetivo de

que esta pueda alcanzar la orientación deseada a través del puerto de inserción; y otra componente traslacional, cuya función es determinar el movimiento de traslación de la herramienta, para poder dirigirla hacia el punto objetivo una vez determinada la dirección. Se incluye un esquema de estas dos componentes en la Ilustración 14.

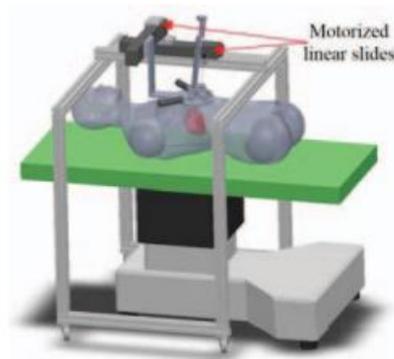
Para conseguir el montaje rotacional, se colocan dos arcos semicirculares de manera perpendicular. El movimiento de estos, controlado por dos motores de corriente continua, se ve restringido por un tubo deslizante que tiene que moverse entre dos ranuras que hay en los arcos. Por su parte, el subconjunto de traslación consigue el movimiento de traslación gracias a un tipo de actuador lineal mecánico. Cuando el eje es accionado por otro motor de corriente continua, el actuador convierte el movimiento de rotación en un movimiento lineal.



**Ilustración 14. Descripción general del mecanismo RCM, con los subconjuntos de rotación y traslación (Chng, Duan, & Chui, 2016)**

Además, en este sistema robótico, se integran también dos guías lineales motorizadas para que el mecanismo RCM pueda moverse en un plano horizontal, como se puede ver en la Ilustración 15. Este mecanismo tiene el objetivo de hacer coincidir el centro remoto de la herramienta quirúrgica y el puerto de inserción en la piel del paciente.

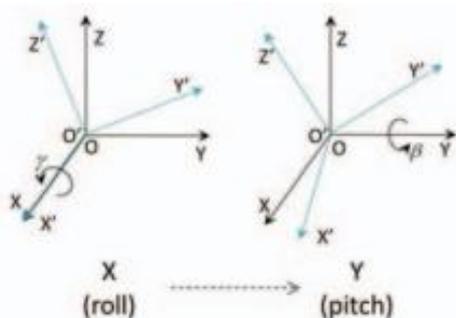
De esta manera, se logra que el centro remoto de la herramienta, el punto de inserción y la posición objetivo dentro del cuerpo se encuentren sobre la misma línea. A continuación, se ajusta la dirección de entrada de la herramienta con el mecanismo rotacional y, por último, el mecanismo de traslación conduce la herramienta hasta el objetivo.



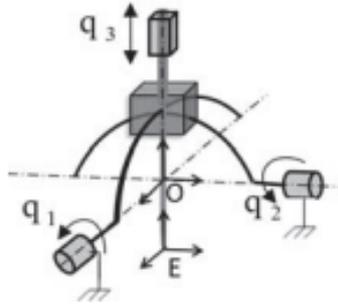
**Ilustración 15. Sistema completo con las dos guías motorizadas (Chng, Duan, & Chui, 2016)**

Para realizar el análisis cinemático de este modelo en el estudio, el movimiento de este mecanismo RCM se determina por la línea de intersección de los dos planos correspondientes a los dos semiarcos.

La representación esquemática del RCM consistiría en tres articulaciones independientes: dos articulaciones de rotación y una articulación prismática. Previamente, ya se ha comprobado en otros estudios que el movimiento rotacional de este tipo de RCM resulta de dos movimientos consecutivos que se esquematizan en la Ilustración 16: *roll* (rotación alrededor de un eje fijo X) y *pitch* (rotación alrededor de un eje fijo Y). Teniendo en cuenta tanto estos movimientos como la estructura mecánica que ha sido comentada anteriormente, se incluye una representación esquemática del mecanismo en la Ilustración 17.

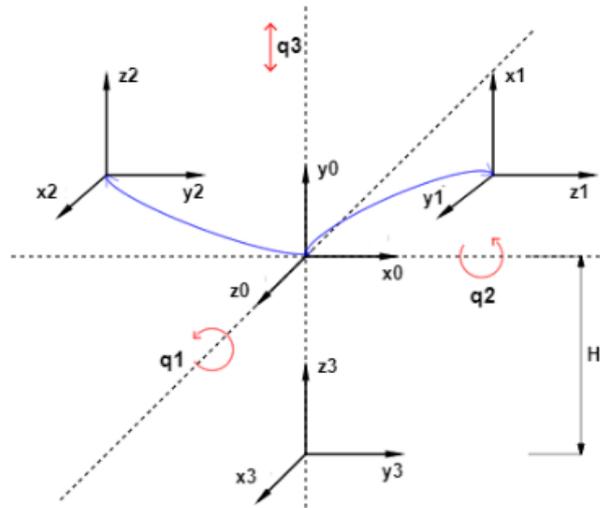


**Ilustración 16. A la izquierda, movimiento *roll* (rotación  $\gamma$  alrededor de un eje fijo X) y a la derecha, movimiento *pitch* (rotación  $\beta$  alrededor de un eje fijo Y) (Chng, Duan, & Chui, 2016)**



**Ilustración 17. Representación esquemática del mecanismo cinemático del RCM circular y el eje de giro de cada una de sus tres articulaciones (Chng, Duan, & Chui, 2016)**

Tomando esta ilustración como referencia, se ha propuesto un modelado en el que, tanto el origen de la articulación 2 como el origen de la articulación 3 se situaran sobre el sistema  $O$ . La Ilustración 18 representa los sistemas de referencia elegidos para obtener el modelo cinemático del RCM circular, utilizando el algoritmo DH. En ella,  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$  representan los ejes de cada articulación ( $q_1$  y  $q_2$  rotacionales, y  $q_3$  prismática). De esta manera, la rotación dependiente de la primera articulación se realiza sobre el eje base  $z_0$ ; la rotación dependiente de la segunda articulación se realiza sobre el eje base  $x_0$  y, por último, el movimiento de traslación, dependiente de la articulación 3, se realiza a lo largo del eje base  $y_0$ .



**Ilustración 18. Esquema realizado con los sistemas de referencia DH para el cálculo de los parámetros en un modelo de RCM circular**

Se puede apreciar que los sistemas de referencia  $\{S_1\}$  y  $\{S_2\}$  tienen su origen en la misma posición que el sistema de referencia base  $\{S_0\}$ ; esto queda representado con las flechas de color azul. Por otra parte, el origen del sistema  $\{S_3\}$  se encuentra a una distancia  $H$  (con signo negativo) respecto al origen del sistema  $\{S_0\}$ , medida a lo largo de  $y_0$ . El sistema  $\{S_3\}$  es el sistema ligado al punto central (TCP – “tool center point”) de la herramienta de este RCM circular.

A partir de este esquema y, siguiendo la metodología explicada en el apartado 3.1, los parámetros DH obtenidos para este sistema RCM circular se recogen en la Tabla 1. En ella, los parámetros indicadores de distancia ( $d_i$  y  $a_i$ ) deben expresarse en metros y los indicadores de ángulos ( $\theta_i$  y  $\alpha_i$ ) deben indicarse en radianes:

**Tabla 1. Parámetros DH del RCM circular modelado (en metros y radianes)**

Articulación i	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$q_1 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$
2	$q_2 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$
3	0	$q_3 + H$	0	0

A partir de estos parámetros se calculan las matrices de transformación homogéneas correspondientes a cada cambio de sistema de referencia:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} -\text{sen}(q_1) & 0 & \text{cos}(q_1) & 0 \\ \text{cos}(q_1) & 0 & \text{sen}(q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} -\text{sen}(q_2) & 0 & \text{cos}(q_2) & 0 \\ \text{cos}(q_2) & 0 & \text{sen}(q_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 - H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Como ha sido comentado anteriormente, a partir del producto de estas, es posible obtener la matriz de transformación homogénea T, que proporciona el modelo cinemático directo del RCM circular:

$$T = {}^0A_3 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 =$$

$$= \begin{bmatrix} \text{sen}(q_1)\text{sen}(q_2) & \text{cos}(q_1) & -\text{cos}(q_2)\text{sen}(q_1) & -\text{cos}(q_2)\text{sen}(q_1)(q_3 - H) \\ -\text{cos}(q_1)\text{sen}(q_2) & \text{sen}(q_1) & \text{cos}(q_1)\text{cos}(q_2) & \text{cos}(q_1)\text{cos}(q_2)(q_3 - H) \\ \text{cos}(q_2) & 0 & \text{sen}(q_2) & \text{sen}(q_2)(q_3 - H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Esta matriz caracteriza por completo la posición y orientación (pose) del TCP de la herramienta, sistema  $\{S_3\}$  respecto al sistema de referencia base  $\{S_0\}$ , en función de los valores de las tres articulaciones ( $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$ ). Además, como ya ha sido indicado, puede ser observada una submatriz  $3 \times 3$  de rotación que indica la orientación de los ejes del sistema  $\{S_3\}$  respecto a los ejes del sistema  $\{S_0\}$ ; y una submatriz  $3 \times 1$  que expresa la traslación del origen del sistema  $\{S_3\}$  respecto al origen del sistema  $\{S_0\}$ .

- La orientación del eje  $x_3$  respecto de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$  viene determinada por los elementos 1, 2 y 3, respectivamente, de la primera columna de la matriz T.
- La orientación del eje  $y_3$  respecto de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$  viene determinada por los elementos 1, 2 y 3, respectivamente, de la segunda columna de la matriz T.
- La orientación del eje  $z_3$  respecto de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$  viene determinada por los elementos 1, 2 y 3, respectivamente, de la tercera columna de la matriz T.
- Por último, la posición del origen del sistema de referencia  $\{S_3\}$  se consigue con traslaciones a lo largo de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$ . Estas vienen determinadas por los elementos 1, 2 y 3, respectivamente, de la cuarta columna de la matriz T.

Por último, para comprobar la validez de este modelo simbólico se va a considerar el caso particular en el que se sustituyen los valores de las articulaciones  $[q_1, q_2, q_3]$  por  $[0, 0, 0]$ . La matriz resultante es la siguiente:

$$T([q_1, q_2, q_3] = [0, 0, 0]) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -H \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se puede comprobar que, en la posición base de las tres articulaciones, el eje  $x_3$  coincide con el eje  $z_0$ ; el eje  $y_3$  coincide con el eje  $x_0$ ; y, el eje  $z_3$  coincide con el eje  $y_0$ . Además, se observa que el origen del sistema de referencia  $\{S_3\}$  está desplazado a lo largo del eje  $y_0$  una distancia de  $-H$ . Este análisis corresponde exactamente con la representación gráfica vista con anterioridad en la Ilustración 18; por lo que el modelado cinemático, así como el análisis simbólico se concluyen con unos resultados satisfactorios. Se procede a continuación a realizar una simulación de este modelo.

### 3.2.2. SIMULACIÓN DE RCM CIRCULAR

Una vez resuelto el modelado cinemático del mecanismo RCM circular, se procederá a realizar su simulación en un entorno Matlab (versión R2022a), con el objetivo de proporcionar un análisis más visual del modelo realizado de RCM circular y poder entender mejor cuál es el movimiento del efector final de un robot que incluye este tipo de mecanismos.

Como ya ha sido comentado, se utiliza el *toolbox* de Peter Corke (versión 4.0), que permite diseñar, simular y trabajar con robots manipuladores. En primer lugar, con el código mostrado en la Ilustración 19 se crean (*Link*) las tres articulaciones del RCM circular, a partir de los parámetros DH obtenidos anteriormente y se unen (*SerialLink*) para crear el modelo del RCM. Los detalles del modelo creado se incluyen en la Ilustración 20.

```
L(1)= Link('revolute','d', 0, 'a', 0, 'alpha', pi/2);
L(2)= Link('revolute','d', 0, 'a', 0, 'alpha', pi/2);
L(3)= Link('prismatic','theta',0, 'a', 0, 'alpha',0);
L(1).offset=pi/2;
L(2).offset=pi/2;
RCM = SerialLink(L);
RCM.name='          ';
```

**Ilustración 19. Código generado en Matlab para definir las articulaciones que forman parte del RCM circular**

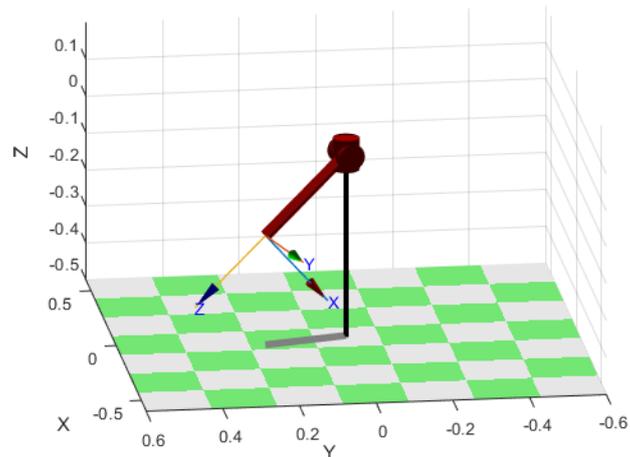
```
RCM =
      (3 axis, RRP, stdDH, fastRNE)

+-----+-----+-----+-----+-----+
| j |   theta |       d |       a |   alpha |   offset |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 |     q1 |       0 |       0 |   1.571 |   1.571 |
| 2 |     q2 |       0 |       0 |   1.571 |   1.571 |
| 3 |       0 |     q3 |       0 |       0 |       0 |
+-----+-----+-----+-----+

grav =   0   base = 1 0 0 0   tool = 1 0 0 0
         0         0 1 0 0         0 1 0 0
        9.81        0 0 1 0         0 0 1 0
                   0 0 0 1         0 0 0 1
```

**Ilustración 20. Detalles del modelo creado de RCM circular**

A continuación, se llevará a cabo una representación del modelo, para comprobar a nivel gráfico que las articulaciones y sus ejes se corresponden con el modelado que se había realizado previamente. Esta representación se observa en la Ilustración 21. En ella, los ejes X, Y, Z de la propia ilustración se corresponden con los ejes del sistema de referencia base  $\{S_0\}$ . Por lo que Z representa el eje de giro de la primera articulación rotacional y X, el de la segunda; mientras que el eje Y de la imagen representa el eje a lo largo del cual la herramienta realiza el movimiento de traslación. El sistema de referencia representado con tres flechas se corresponde con  $\{S_3\}$ . En la ilustración, se representa la configuración  $[q_1, q_2, q_3] = [2.8798, -0.6981, 0.3]$ , donde los valores correspondientes a  $q_1$  y  $q_2$  (articulaciones de rotación) se miden en radianes y el valor que corresponde a  $q_3$  es la medida del parámetro H, que se ha medido en metros. El programa que se ha utilizado para realizar esta simulación está incluido en el Anexo 1.



**Ilustración 21. Simulación del modelo propuesto para un RCM circular**

Con el objetivo de simular los movimientos del efector final respecto a los diferentes valores que pueden tomar las articulaciones, se realizaron representaciones de varias trayectorias. Para definir y registrar todos los puntos que pueden alcanzar el TCP de este RCM circular, a partir de variaciones en las posiciones de las articulaciones de rotación siguiendo diversas trayectorias, se crea el código mostrado en la Ilustración 22.

```

t=0:.04:2;
matrizposx = [];
matrizposy = [];
matrizposz = [];
for j=1:36
    ang=10*j;
    confi2=[deg2rad(ang),deg2rad(-50),H;
            deg2rad(ang),deg2rad(-130),H];
    tra2=jtraj(confi2(1,:),confi2(2,:),t);
    CD=RCM.fkine(tra2);
    for i=1:length(t)
        TCP_x = CD(1,4,i);
        matrizposx(j,i)=TCP_x;
        TCP_y = CD(2,4,i);
        matrizposy(j,i)=TCP_y;
        TCP_z = CD(3,4,i);
        matrizposz(j,i)=TCP_z;
    end
end
end

```

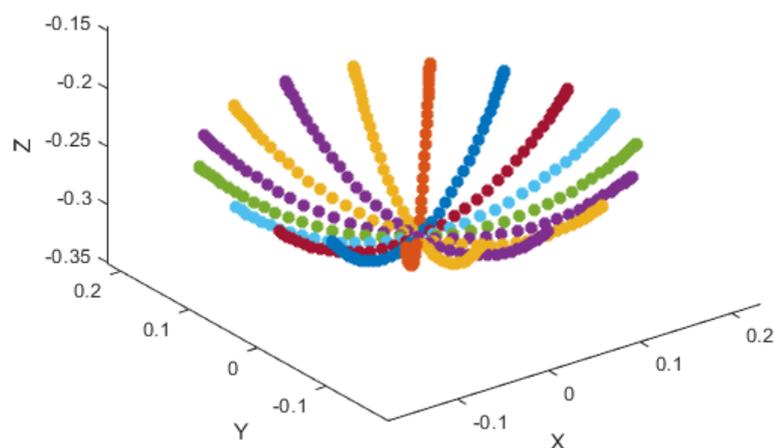
**Ilustración 22. Código generado en Matlab para definir las posibles trayectorias de la herramienta**

Todas estas posiciones del TCP obtenidas con la ejecución del código anterior se muestran en la Ilustración 23. Se presentan todas las posibles ubicaciones que puede alcanzar el TCP de la herramienta del RCM circular en el interior del cuerpo del paciente durante la operación de cirugía laparoscópica. Para obtener esta superficie cóncava se ha realizado un movimiento de pivoteo de la herramienta respecto del punto de fulcro, que es precisamente el punto de RCM que permanece fijo. En la imagen, el eje Z corresponde al eje de la herramienta del RCM circular cuando las articulaciones se encuentran en su estado base. Este eje coincide con la normal del plano que representaría el cuerpo del paciente operado.

Para representar estas 18 trayectorias distintas, se ha utilizado el *software* incluido en el Anexo 1. Debido a que el objetivo es representar un movimiento de pivoteo de la herramienta respecto del punto de fulcro (sin cambiar la profundidad de la herramienta), se escogen las siguientes condiciones:

- $q_1$  toma un valor diferente en cada una de las trayectorias dando una vuelta completa (de 20 a 360 grados, convertidos a radianes), pero este valor no varía durante el movimiento; es decir, el valor inicial de la articulación es igual al valor final.
- $q_2$  toma siempre el mismo valor inicial y final. Es decir, esta articulación realiza las 36 veces la misma trayectoria.  $[q_{2\text{inicial}}, q_{2\text{final}}] = [-0.8727, -2.2689]$ , medido en radianes.
- El valor de  $q_3$  permanece siempre constante y se ha tomado  $[q_3] = [0.3]$ , medido en metros, pues esta articulación es prismática.

Los valores concretos iniciales y finales que han tomado las tres articulaciones en cada una de las 18 trayectorias se recogen en la Tabla 2, medidos en radianes y en metros.



**Ilustración 23. Posibles trayectorias de la herramienta en el interior del cuerpo del paciente respecto del punto de fulcro**

**Tabla 2. Valores iniciales y finales (medidos en metros y radianes) de las tres articulaciones del mecanismo RCM circular para cada una de las 18 trayectorias representadas**

Trayectoria	q1		q2		q3	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	0.3491	0.3491	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
2	0.6981	0.6981	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
3	1.0472	1.0472	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
4	1.3963	1.3963	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
5	1.7453	1.7453	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
6	2.0944	2.0944	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
7	2.4435	2.4435	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
8	2.7925	2.7925	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
9	3.1416	3.1416	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
10	3.4907	3.4907	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
11	3.8397	3.8397	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
12	4.1888	4.1888	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
13	4.5379	4.5379	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
14	4.8869	4.8869	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
15	5.2360	5.2360	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
16	5.5851	5.5851	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
17	5.9341	5.9341	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30
18	6.2832	6.2832	-0.8727	-2.2689	0.30	0.30

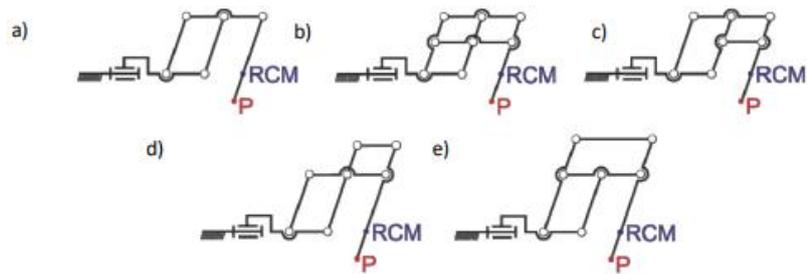
### 3.3. RCM BASADO EN PARALELOGRAMOS

#### 3.3.1. MODELADO DE RCM BASADO EN PARALELOGRAMOS

En este apartado, se realizará el modelado de un mecanismo RCM basado en el uso de paralelogramos. Para ello, se tomará como referencia un análisis realizado por la Universidad de Biaystok, en Polonia (Trochimczuk, 2017).

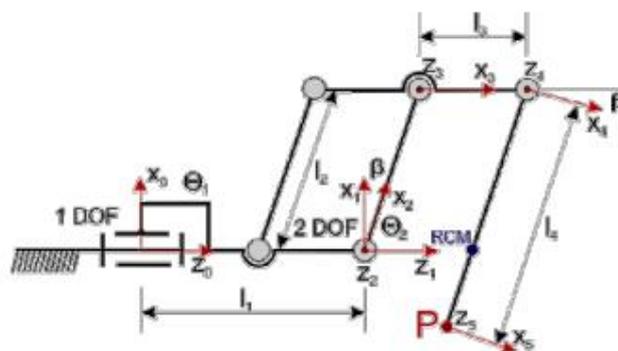
Desde un punto de vista práctico, esta estructura geométrica es extensa y compleja, y requiere de una gran precisión durante los procesos de fabricación y montaje final. No obstante, permite simplificar considerablemente el método de control del telemanipulador, al limitar el número de accionamientos y sistemas de sensores respecto de otros mecanismos de RCM utilizados.

Los diseños de telemanipuladores con un mecanismo de manipulación de paralelogramo que permite cumplir la condición cinemática RCM, se pueden clasificar en los tipos que aparecen en la Ilustración 24.



**Ilustración 24. Diferentes estructuras cinemáticas de mecanismos RCM basados en paralelogramos (Trochimczuk, 2017)**

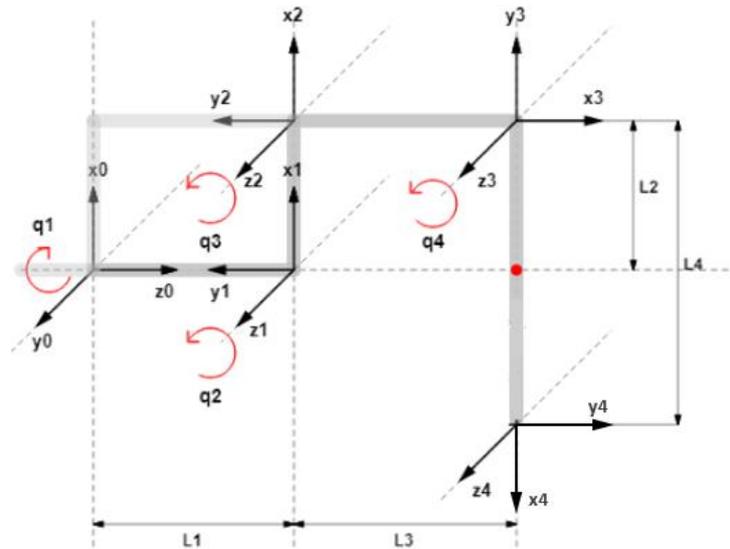
El ejemplo de la Ilustración 24.a (arriba izquierda) es la opción más clásica, con un enganche de cuatro barras. Esta configuración puede encontrarse con frecuencia en el diseño de robots industriales, donde sirve para aumentar la rigidez. A partir del diseño clásico, se realizaron pequeñas modificaciones para diseñar un telemanipulador quirúrgico original (Trochimczuk, 2017). En este estudio, se incluye un análisis de la cinemática del mecanismo basado en paralelogramos de este tipo. En la Ilustración 25 se muestra la estructura geométrica más detallada del RCM basado en paralelogramos, que será considerada para obtener el modelo cinemático directo.



**Ilustración 25. Representación esquemática del mecanismo cinemático del RCM (Trochimczuk, 2017)**

Para la mayoría de los mecanismos RCM, en particular los mecanismos paralelos, la posición del punto RCM suele estar limitada por los ejes de las articulaciones. En concreto, si las posiciones de las articulaciones de base y las accionadas por servomotores están determinadas, la posición del RCM estará de igual manera determinada. Esta restricción puede afectar e interferir en escenarios complejos de MIS (Wang, Zhang, & Ding, 2020).

Tomando la Ilustración 25 como referencia, se ha realizado el modelado cinemático utilizando los parámetros DH, considerando el RCM paralelogramo formado por 4 articulaciones de rotación  $[q_1, q_2, q_3, q_4]$ . Un esquema del conjunto, el origen de los sistemas de referencia ligados a las articulaciones (según DH) y sus correspondientes ejes se presentan a continuación en la Ilustración 26.



**Ilustración 26. Esquema realizado con los sistemas de referencia DH para el cálculo de los parámetros en un modelo de RCM paralelogramo**

Las flechas circulares de color rojo  $q_1, q_2, q_3$  y  $q_4$  representan los sentidos de giro de cada una de las cuatro articulaciones. En base a ellos y, siguiendo la metodología DH propuesta, se determinan las posiciones de los orígenes y los ejes de cada sistema de referencia. El punto rojo, que se encuentra en la línea del eje de giro de la primera articulación representa el RCM o el punto de fulcro que se mantendrá estático a pesar de los movimientos del mecanismo.

Hay que tener en cuenta que los dos paralelogramos delimitados por las articulaciones (1,2,3 y 2,3,4, respectivamente), además de por la propia estructura mecánica o virtual del mecanismo, tienen que conservarse durante todo su movimiento, con el objetivo de poder mantener el punto RCM. Para ello, es importante que se cumplan unas restricciones en los ángulos que componen estos paralelogramos.

Pueden apreciarse en la Ilustración 27 dos representaciones del modelo de RCM basado en paralelogramos en distintas posiciones. En ambas, cada articulación viene nombrada con la letra Q, los ángulos se representan gráficamente en color azul y el punto de fulcro o RCM está ilustrado con un punto rojo (se comprueba que este mantiene la misma posición en los dos casos). En la primera representación el mecanismo está en su posición base y entre todas las barras existen ángulos rectos ( $\pi/2$ ) si se toma como referencia el sistema de referencia planar dibujado en la imagen. Se supone ahora que la articulación 2 rota un ángulo  $\beta$  sobre su eje de rotación, como muestra la segunda situación. Para lograr la conservación de los paralelogramos, la barra de unión entre  $Q_3$  y  $Q_4$  tiene que permanecer paralela a la línea entre  $Q_1$  y  $Q_2$ . Para ello, el ángulo correspondiente a  $Q_3$  tiene que aumentar en la misma medida que  $Q_2$ . El ángulo propuesto en la imagen llegará a ser  $\pi/2 + \beta$  radianes. Además, esto se reflejará de igual manera en la esquina superior izquierda del primer paralelogramo. Por el contrario, el ángulo que corresponde a  $Q_4$  tiene que disminuir en igual proporción, para que permanezcan paralelas entre sí las barras verticales, en este caso. Es decir, el ángulo correspondiente en la imagen alcanzará  $\pi/2 - \beta$  radianes.

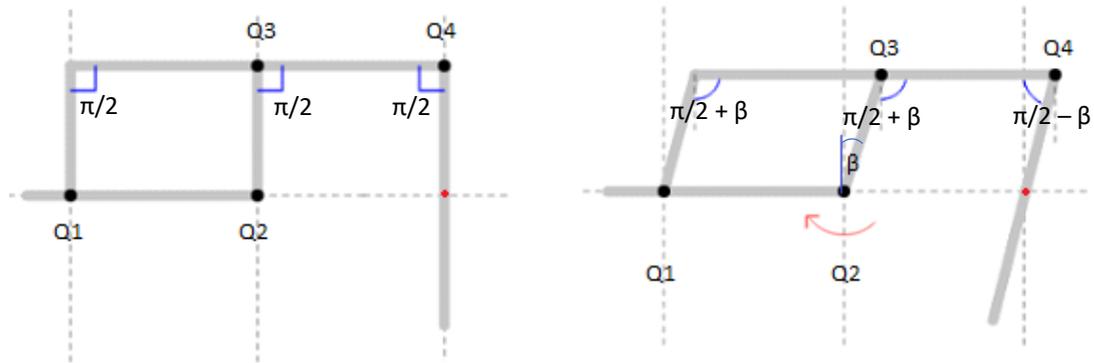


Ilustración 27. Restricciones en los ángulos para la conservación de los paralelogramos en el RCM

A partir de este esquema, con los pasos correspondientes del método DH y teniendo en cuenta los sistemas de referencia especificados anteriormente, se obtienen los cuatro parámetros correspondientes a cada articulación que se recogen en la Tabla 3. Al igual que antes, las unidades de medida son metros en el caso de las distancias y radianes en el caso de los ángulos.

Tabla 3. Parámetros DH del RCM paralelogramo modelado

Articulación $i$	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$q_1$	$L_1$	0	$-\pi/2$
2	$q_2$	0	$L_2$	0
3	$q_3 - \pi/2$	0	$L_3$	0
4	$q_4 - \pi/2$	0	$L_4$	0

A partir de estos parámetros es posible calcular las matrices de transformación homogéneas correspondientes a cada cambio de sistema de referencia:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & -\text{sen}(q_1) & 0 \\ \text{sen}(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\text{sen}(q_2) & 0 & \cos(q_2)L_2 \\ \text{sen}(q_2) & \cos(q_2) & 0 & \text{sen}(q_2)L_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\text{sen}(q_3) & 0 & \cos(q_3)L_3 \\ \text{sen}(q_3) & \cos(q_3) & 0 & \text{sen}(q_3)L_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_4) & -\text{sen}(q_4) & 0 & \cos(q_4)L_4 \\ \text{sen}(q_4) & \cos(q_4) & 0 & \text{sen}(q_4)L_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Como ha sido comentado anteriormente, a partir del producto de estas, se obtiene la matriz T:

$$T = {}^0A_4 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 =$$

$$= \begin{bmatrix} c_{234} c_1 & -s_{234} c_1 & -s_1 & c_1 (L_3 c_{23} + L_2 c_2 + L_4 c_{234}) \\ c_{234} s_1 & -s_{234} s_1 & c_1 & s_1 (L_3 c_{23} + L_2 c_2 + L_4 c_{234}) \\ -s_{234} & -c_{234} & 0 & L_1 - L_3 s_{23} - L_2 s_2 - L_4 s_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

siendo:

$$c_{234} c_1 = \cos(q_2 + q_3 + q_4)\cos(q_1)$$

$$c_{234} s_1 = \cos(q_2 + q_3 + q_4)\text{sen}(q_1)$$

$$-s_{234} = -\text{sen}(q_2 + q_3 + q_4)$$

$$-s_{234} c_1 = -\text{sen}(q_2 + q_3 + q_4)\cos(q_1)$$

$$-s_{234} s_1 = -\text{sen}(q_2 + q_3 + q_4)\text{sen}(q_1)$$

$$-c_{234} = -\cos(q_2 + q_3 + q_4)$$

$$-s_1 = -\text{sen}(q_1)$$

$$c_1 (L_3 c_{23} + L_2 c_2 + L_4 c_{234}) \\ = \cos(q_1)(L_3 \cos(q_2 + q_3) + L_2 \cos(q_2) + L_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4))$$

$$s_1 (L_3 c_{23} + L_2 c_2 + L_4 c_{234}) \\ = \text{sen}(q_1)(L_3 \cos(q_2 + q_3) + L_2 \cos(q_2) + L_4 \cos(q_2 + q_3 + q_4))$$

$$L_1 + L_3 s_{23} - L_2 s_2 - L_4 s_{234} \\ = L_1 + L_3 \text{sen}(q_2 + q_3) - L_2 \text{sen}(q_2) - L_4 \text{sen}(q_2 + q_3 + q_4)$$

Esta matriz caracteriza por completo la posición del final de la herramienta en función de los valores de las cuatro articulaciones ( $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  y  $q_4$ ) respecto al sistema de referencia base  $\{S_0\}$ . Como ya ha sido indicado, puede ser observada una submatriz 3x3 de rotación que indica la orientación de los ejes del sistema  $\{S_4\}$  respecto a los ejes del sistema  $\{S_0\}$ ; y una submatriz 3x1 que expresa la traslación del origen del sistema  $\{S_4\}$  respecto al origen del sistema  $\{S_0\}$  a lo largo de sus ejes.

- La orientación del eje  $x_4$  respecto de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$  viene determinada por los elementos 1, 2 y 3, respectivamente, de la primera columna de la matriz T.
- La orientación del eje  $y_4$  respecto de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$  viene determinada por los elementos 1, 2 y 3, respectivamente, de la segunda columna de la matriz T.
- La orientación del eje  $z_4$  respecto de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$  viene determinada por los elementos 1, 2 y 3, respectivamente, de la tercera columna de la matriz T.
- Por último, la posición del origen del sistema de referencia  $\{S_4\}$  se consigue con traslaciones a lo largo de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$ . Estas vienen determinadas por los elementos 1, 2 y 3, respectivamente, de la cuarta columna de la matriz T.

Por último, para comprobar este modelo simbólico se va a estudiar un caso particular en el que se sustituyen los valores de las articulaciones  $[q_1, q_2, q_3, q_4]$  por  $[0, 0, 0, 0]$ ; pues estos son los valores en los que el RCM alcanza la configuración propuesta en el esquema del modelado. La matriz resultante es la siguiente:

$$T([q_1, q_2, q_3, q_4] = [0, 0, 0, 0]) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -(L_4 - L_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 + L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se puede comprobar que, en la posición que ha sido tomada como base de las tres articulaciones, el eje  $x_4$  coincide (en sentido negativo) con el eje  $x_0$ ; el eje  $y_4$  coincide con el eje  $z_0$ ; y, el eje  $z_4$  coincide con el eje  $y_0$ .

Además, se observa que el origen del sistema de referencia  $\{S_4\}$  está desplazado respecto del origen de  $\{S_0\}$  una distancia de:  $-(L_4 - L_2)$  a lo largo del eje  $x_0$  y de  $L_1 + L_3$  a lo largo del eje  $z_0$ . Este análisis corresponde con la representación gráfica vista con anterioridad en la Ilustración 26; por lo que el modelado cinemático del RCM basado en paralelogramos se concluye con unos resultados satisfactorios.

### 3.3.2. SIMULACIÓN DE RCM BASADO EN PARALELOGRAMOS

Una vez ha sido resuelto el modelado del mecanismo RCM paralelogramo, se procederá, igual que anteriormente, a realizar su simulación en un entorno Matlab, con el objetivo de proporcionar un análisis más visual del modelo realizado del RCM basado en paralelogramos. El código correspondiente se encuentra en el Anexo 2.

Se crearán primeramente las articulaciones necesarias a partir de los parámetros DH que han sido obtenidos y estas serán unidas para crear el modelo del RCM. Esto se ve reflejado en el código que se muestra en la Ilustración 28. Se incluyen los detalles del modelo creado en la Ilustración 29.

```
L(1) = Link([0,L1,0,-pi/2,0], 'standard');
L(1).offset=0;
L(2) = Link([0,0,L2,0,0], 'standard');
L(2).offset=0;
L(3) = Link([0,0,L3,0,0], 'standard');
L(3).offset=0;
L(4) = Link([0,0,L4,0,0], 'standard');
L(4).offset=0;
RCM_pa = SerialLink(L);
RCM_pa.name='';
```

**Ilustración 28. Código generado en Matlab para definir las articulaciones que forman parte del RCM basado en paralelogramos**

```
RCM_pa =
    (4 axis, RRRR, stdDH, fastRNE)

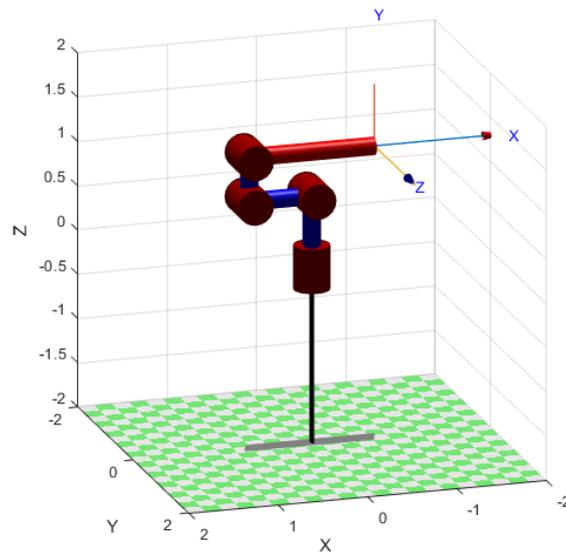
+---+-----+-----+-----+-----+-----+
| j |   theta |     d |     a |   alpha |   offset |
+---+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 |    q1 |    0.8 |    0 |  -1.571 |    0 |
| 2 |    q2 |    0 |    0.7 |    0 |    0 |
| 3 |    q3 |    0 |    0.5 |    0 | -1.571 |
| 4 |    q4 |    0 |    1.4 |    0 | -1.571 |
+---+-----+-----+-----+-----+-----+

grav =    0 base = 1 0 0 0 tool = 1 0 0 0
         0      0 1 0 0      0 1 0 0
        9.81    0 0 1 0      0 0 1 0
              0 0 0 1      0 0 0 1
```

**Ilustración 29. Detalles del modelo creado del RCM basado en paralelogramos**

A continuación, se llevará a cabo una representación del modelo, para comprobar a nivel gráfico que las articulaciones y sus ejes se corresponden con el diseño que se había realizado previamente. Esta representación se observa en la Ilustración 30, en la que se muestra la configuración base del mecanismo,  $[q_1, q_2, q_3, q_4] = [0, 0, 0, 0]$  y que procede del código programado que se incluye en el Anexo 2.

En la imagen, los ejes X, Y, Z se corresponden con los ejes del sistema de referencia base  $\{S_0\}$ . Por lo que Z representa el eje de giro de la primera articulación  $q_1$  e Y coincide con el eje de giro de las otras tres articulaciones. El sistema de referencia representado con tres flechas de colores se corresponde con  $\{S_4\}$ .



**Ilustración 30. Simulación del modelo propuesto para un RCM basado en paralelogramos**

Al igual que antes, se va a representar una posible trayectoria de las articulaciones con el objetivo de comprobar que el RCM modelado cumple el objetivo; es decir, es capaz de mantener en todo momento la estructura de los paralelogramos y, además, de mantener fijo el punto de fulcro durante toda la operación.

Para ello, se definen los cambios en las articulaciones. La articulación 1 va a pasar de 0 radianes (posición de base) a  $-0.4363$  radianes, mientras que la articulación 2 va a pasar de 0 radianes (posición de base) a  $-0.5236$  radianes. Con el código especificado en la Ilustración 31, además, se especifican los valores de las articulaciones 3 y 4, pues estos dependen en todo momento del valor que tome la articulación 2.

```
configuracion=[0,0,-pi/2,-pi/2;
              deg2rad(-25),deg2rad(-30),-pi/2,-pi/2];
t=0:.04:2;
tra1=jtraj(configuracion(1,:),configuracion(2,:),t);
CD=RCM_pa.fkine(tra1);

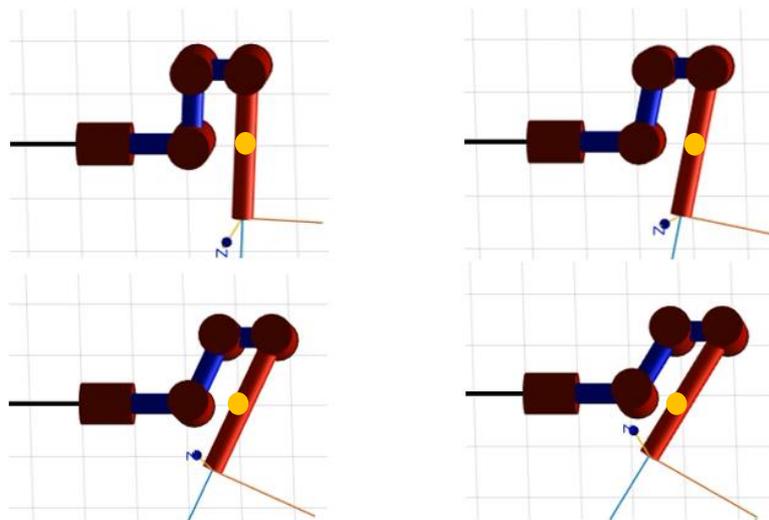
tra1modi=tra1;
tra1modi(:,3)=tra1(:,3)-tra1(:,2);
tra1modi(:,4)=tra1(:,4)+tra1(:,2);

for i=1:length(t)
    axis([-2 2 -2 2 -2 2]);
    hold on;
    RCM_pa.plot(tra1modi(i,:), 'workspace', [-2 2 -2 2 -2 2]);
end
```

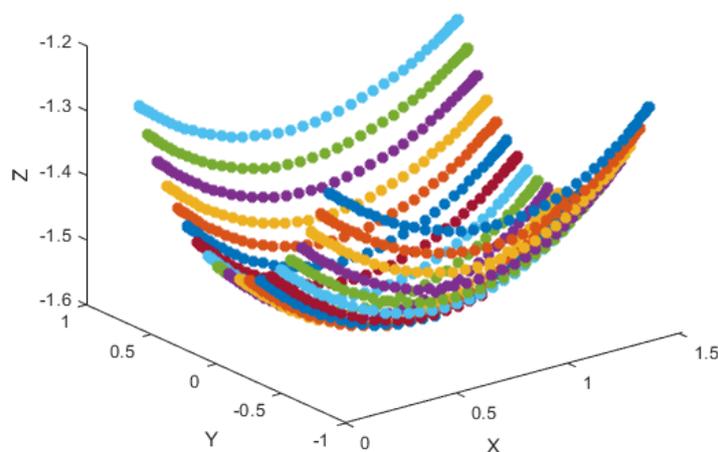
**Ilustración 31. Código de Matlab para definir las trayectorias, modificar los valores de las articulaciones para que cumplan con los criterios y representar el RCM**

Se incluye, a continuación, una imagen que demuestra que, en fotogramas distintos tomados durante la representación de la trayectoria, se cumple la conservación de los paralelogramos y del punto RCM, representado en la figura con los puntos amarillos. Esto se ejemplifica en la Ilustración 32.

Al igual que en el modelado anterior, se ha creído conveniente realizar una representación gráfica en la de las posibles posiciones alcanzables por el punto final de la herramienta. Para el caso del RCM basado en paralelogramos se tomarán dos situaciones distintas. El código desarrollado para generar estas representaciones viene recogido en el Anexo 2.

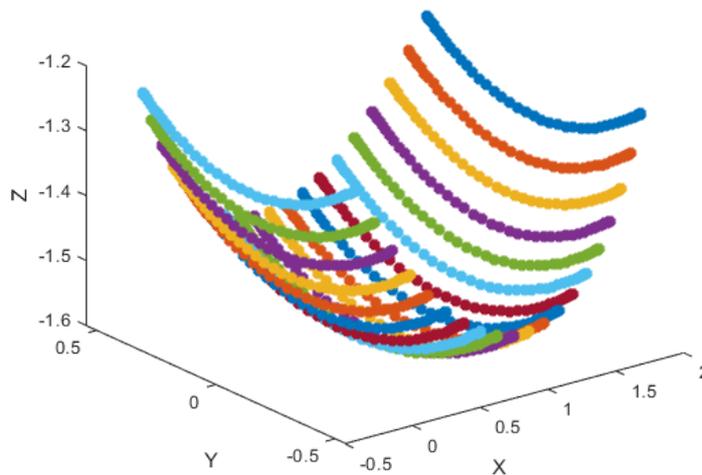


**Ilustración 32. Diferentes puntos de la trayectoria seguida por las articulaciones del mecanismo RCM**



**Ilustración 33. Ejemplo 1 de puntos alcanzados por el TCP del RCM paralelogramo**

En el primer caso, representado en la Ilustración 33, se realiza un movimiento de pivoteo de la herramienta respecto a la articulación  $q_2$  (y los correspondientes movimientos restringidos de las articulaciones  $q_3$  y  $q_4$ ); y se recorren mediante un bucle en el código de Matlab 20 posiciones diferentes de la articulación  $q_1$ . De esta manera, para cada determinada configuración de la articulación  $q_1$ , cuyo valor final coincide con su valor inicial, se realiza siempre el mismo movimiento con la articulación  $q_2$ , siendo  $[q_{2\text{inicial}}, q_{2\text{final}}] = [0.3491, -0.3491]$ , medido en radianes.



**Ilustración 34. Ejemplo 2 de puntos alcanzados por el TCP del RCM paralelogramo**

En el caso de la Ilustración 34, se realiza el proceso contrario. Con un bucle en el código de Matlab se recorren 20 distintos valores que va a tomar la articulación  $q_2$  (con los correspondientes movimientos resultantes de la tercera y cuarta articulaciones de rotación). Para cada valor de  $q_2$  seleccionado, que se mantiene constante durante todo el movimiento, se va a realizar el mismo movimiento de pivoteo respecto de la articulación  $q_1$ , que es capaz de inclinar todo el mecanismo RCM respecto de su eje  $z_0$ , siendo  $[q_{1\text{inicial}}, q_{1\text{final}}] = [0.3491, -0.3491]$ , medidos en radianes.

Los valores concretos iniciales y finales de las cuatro articulaciones para cada una de las 20 trayectorias seguidas en cada uno de los dos casos, el ejemplo 1 y el ejemplo 2, quedan recogidos, respectivamente en la Tabla 4 y la Tabla 5. En estas se ven reflejados también los cambios a los que se han forzado los valores de las articulaciones  $q_3$  y  $q_4$ , con el objetivo de la conservación de los paralelogramos.

**Tabla 4. Valores iniciales y finales (medidos en radianes) de las cuatro articulaciones del mecanismo RCM paralelogramo para cada una de las 20 trayectorias representadas. Ejemplo 1**

Trayectoria	q1		q2		q3		q4	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	-0.5236	-0.5236	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
2	-0.4685	-0.4685	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
3	-0.4134	-0.4134	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
4	-0.3583	-0.3583	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
5	-0.3031	-0.3031	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
6	-0.2480	-0.2480	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
7	-0.1929	-0.1929	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
8	-0.1378	-0.1378	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
9	-0.0827	-0.0827	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
10	-0.0276	-0.0276	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
11	0.0276	0.0276	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
12	0.0827	0.0827	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
13	0.1378	0.1378	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
14	0.1929	0.1929	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
15	0.2480	0.2480	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
16	0.3031	0.3031	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
17	0.3583	0.3583	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
18	0.4134	0.4134	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
19	0.4685	0.4685	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491
20	0.5236	0.5236	0.3491	-0.3491	-0.3491	0.3491	0.3491	-0.3491

**Tabla 5. Valores iniciales y finales (medidos en radianes) de las cuatro articulaciones del mecanismo RCM paralelogramo para cada una de las 20 trayectorias representadas. Ejemplo 2**

Trayectoria	q1		q2		q3		q4	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	0.3491	-0.3491	-0.5236	-0.5236	0.5236	0.5236	-0.5236	-0.5236
2	0.3491	-0.3491	-0.4685	-0.4685	0.4685	0.4685	-0.4685	-0.4685
3	0.3491	-0.3491	-0.4134	-0.4134	0.4134	0.4134	-0.4134	-0.4134
4	0.3491	-0.3491	-0.3583	-0.3583	0.3583	0.3583	-0.3583	-0.3583
5	0.3491	-0.3491	-0.3031	-0.3031	0.3031	0.3031	-0.3031	-0.3031
6	0.3491	-0.3491	-0.2480	-0.2480	0.2480	0.2480	-0.2480	-0.2480
7	0.3491	-0.3491	-0.1929	-0.1929	0.1929	0.1929	-0.1929	-0.1929
8	0.3491	-0.3491	-0.1378	-0.1378	0.1378	0.1378	-0.1378	-0.1378
9	0.3491	-0.3491	-0.0827	-0.0827	0.0827	0.0827	-0.0827	-0.0827
10	0.3491	-0.3491	-0.0276	-0.0276	0.0276	0.0276	-0.0276	-0.0276
11	0.3491	-0.3491	0.0276	0.0276	-0.0276	-0.0276	0.0276	0.0276
12	0.3491	-0.3491	0.0827	0.0827	-0.0827	-0.0827	0.0827	0.0827
13	0.3491	-0.3491	0.1378	0.1378	-0.1378	-0.1378	0.1378	0.1378
14	0.3491	-0.3491	0.1929	0.1929	-0.1929	-0.1929	0.1929	0.1929
15	0.3491	-0.3491	0.2480	0.2480	-0.2480	-0.2480	0.2480	0.2480
16	0.3491	-0.3491	0.3031	0.3031	-0.3031	-0.3031	0.3031	0.3031
17	0.3491	-0.3491	0.3583	0.3583	-0.3583	-0.3583	0.3583	0.3583
18	0.3491	-0.3491	0.4134	0.4134	-0.4134	-0.4134	0.4134	0.4134
19	0.3491	-0.3491	0.4685	0.4685	-0.4685	-0.4685	0.4685	0.4685
20	0.3491	-0.3491	0.5236	0.5236	-0.5236	-0.5236	0.5236	0.5236

En el primer caso, se puede corroborar que se cumplen las condiciones propuestas. La articulación  $q_1$  toma 20 valores diferentes, de  $-0.5236$  a  $0.5236$  radianes, que se corresponde con un intervalo de  $-30$  a  $30$  grados; y este valor se mantiene constante desde el principio hasta el fin de cada movimiento. El valor de la articulación  $q_2$  para cada uno de los movimientos cambia siempre desde  $0.3491$  a  $-0.3491$  radianes, o, lo que es lo mismo, de  $20$  a  $-20$  grados. Como ha sido explicado anteriormente, los valores de las articulaciones  $q_3$  y  $q_4$  dependen del valor que tome la articulación  $q_2$  en ese momento. Las tres articulaciones  $q_2$ ,  $q_3$  y  $q_4$  comparten el mismo eje de giro y, para conservar el paralelogramo y los ángulos correspondientes, las tres tienen que variar en la misma medida. Sin embargo, mientras que el giro de  $q_2$  y  $q_4$  coincide en cuanto al sentido, el sentido de giro de  $q_3$  debe ser contrario. Es por ello que, para cada una de las 20 trayectorias,  $q_4$  varía, de igual manera que  $q_2$ , de  $0.3491$  a  $-0.3491$  radianes, pero  $q_3$  cambia de  $-0.3491$  a  $0.3491$  radianes.

Por su parte, en el caso del segundo ejemplo, puede también observarse que se cumple con los criterios expuestos. En este caso es la articulación  $q_1$  la que varía siempre en el mismo rango, desde  $0.3491$  a  $-0.3491$  radianes, o, expresado de otra manera, de  $20$  a  $-20$  grados. La que cambia con cada trayectoria, en esta ocasión, es la articulación  $q_2$ , que va a tomar distintos valores que se van a mantener constantes durante todo el desarrollo del movimiento. En cada una de las 20 trayectorias toma un valor diferente y estos valores recorren el intervalo de  $-0.5236$  a  $0.5236$  radianes, que se corresponde con un rango de  $-30$  a  $30$  grados. Debido a la misma razón que ha sido explicada en el párrafo anterior, en cada caso  $q_4$  coincide con el valor que toma  $q_2$  y también se mantiene constante de principio a fin. En el caso de  $q_3$ , este valor también permanece constante y coincide con la magnitud de  $q_2$ , pero en sentido contrario (empezando en  $0.5236$  radianes para la primera trayectoria y terminando en  $-0.5236$  en la vigésima trayectoria).

## CAPÍTULO 4. MODELADO CINEMÁTICO DE ROBOTS DE CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA CON RCM

Una vez realizado el modelado y la simulación de los mecanismos RCM estudiados, se procede a realizar una visión general del uso de estos. Para ello, se realizará una revisión de robots de cirugía laparoscópica que poseen mecanismos RCM. Y, para finalizar, se llevará a cabo un análisis en profundidad del sistema robótico da Vinci, uno de los robots quirúrgicos más extendidos y en cuyo funcionamiento incluye un mecanismo RCM. Con ello, se pretende dar una visión del concepto estudiado teóricamente en un nivel más práctico e ilustrativo.

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Como ya ha sido comentado anteriormente, la movilidad particular requerida por parte de las herramientas quirúrgicas MIS es un factor importante que va a determinar su diseño. El centro de rotación remoto de un mecanismo es, desde el punto de vista geométrico, un punto que consiste en el centro de uno o más movimientos rotacionales; los cuales son controlados “remotamente” por dicho mecanismo. Este punto RCM coincidirá con el punto de entrada del instrumento quirúrgico. Ese diseño permite que los robots MIS puedan contar con un gran espacio de trabajo fuera del cuerpo del paciente a la vez que, en el interior, se refleja el movimiento deseado de la herramienta (Kuo & Dai, *Robotics for Minimally Invasive Surgery: A Historical Review from the Perspective of Kinematics*, 2009).

Se recogen a continuación en la Tabla 6 algunos ejemplos de robots MIS que utilizan en sus diseños mecanismos RCM circulares, indicando algunos detalles de relevancia sobre cada uno. La Tabla 7 incluye, por su parte, ejemplos de robots MIS que incluyen mecanismos RCM basados en paralelogramos (Kuo, Dai, & Dasgupta, *Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview*, 2012). En el caso del apartado grados de libertad del mecanismo RCM, es necesario tener en cuenta que no se incluyen los DOF provistos por la instrumentación auxiliar del RCM.

**Tabla 6. Ejemplos de robot MIS que cuentan con mecanismos RCM circulares**

Robot	Institución	País	Año	DOF del RCM
EndoBot	Instituto Politécnico Rensselaer	Estados Unidos	2001	2 rotacionales
Probot	<i>Imperial College London</i>	Reino Unido	1991	2 rotacionales
UMI	Universidad de Tokio	Japón	2002	1 rotacional
ViKY	EndoControl	Francia	2003	2 rotacionales

**Tabla 7. Ejemplos de robot MIS que cuentan con mecanismos RCM basados en paralelogramos**

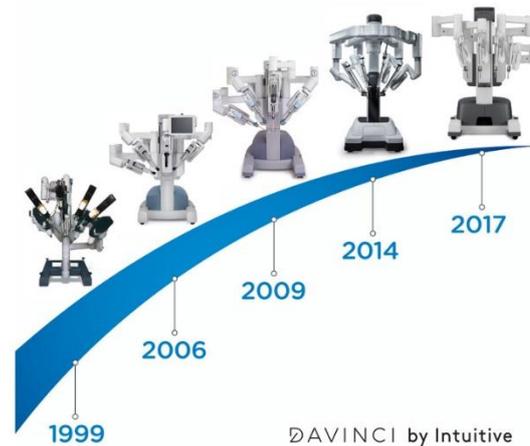
Robot	Institución	País	Año	DOF del RCM
Da Vinci	<i>Intuitive Surgical</i>	Estados Unidos	1999	2 rotacionales
ARTEMIS	Instituto Tecnológico Karlsruher	Alemania	1996	2 rotacionales
Neurobot	<i>Imperial College London</i>	Reino Unido	2000	2 rotacionales
PantoScope	Escuela Politécnica Federal de Zúrich	Suiza	1997	2 rotacionales
VERSALIUS	Universidad Católica de Lovaina	Bélgica	2003	2 rotacionales

Además de los ejemplos de estos dos tipos de mecanismos, que son los que han sido explicados y modelados en apartados previos, es interesante nombrar algún otro robot MIS que cuenta con distintos tipos de mecanismos RCM. El sistema robótico quirúrgico Zeus, desarrollado en Estados Unidos por la empresa *Computer Motion* en el año 1998 cuenta con un mecanismo pasivo RCM, con 3 grados de libertad de tipo rotacional. El manipulador CLEM (*Compliant Laparoscopic Endoscope Manipulator*) fue desarrollado en el Instituto Albert Bonniot, en Francia, en el año 2002 y su mecanismo RCM, de tipo isocentro con correas flexibles, cuenta con 3 grados de libertad rotacionales además de otro de tipo traslacional. Como último ejemplo, ha sido desarrollado en 2010 en la Universidad de Miguel Hernández, en España, un manipulador de “muñeca paralela” con 3 grados de libertad rotacionales (Kuo, Dai, & Dasgupta, Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview, 2012).

## 4.2. ROBOT DA VINCI

El sistema robótico da Vinci es considerado actualmente una de las tecnologías más sofisticadas en el campo de la cirugía mínimamente invasiva, siendo el sistema robotizado quirúrgico más utilizado. Fue originalmente diseñado con el objetivo de ayudar en cirugías cardíacas sin necesidad de abrir el tórax del paciente; que se probaron en primer lugar en París y Leipzig en 1998. A partir de ese momento, fueron incorporándose nuevos procedimientos pertenecientes tanto a cirugía general como urológica o ginecológica (Torres Peña, 2019).

La versión original, el da Vinci Standard, constaba de tres elementos, una consola, una columna de visión, y un carro móvil con tres brazos robóticos. En 2007 surgió una nueva versión, da Vinci S, cuya principal novedad fue la reducción del tamaño y motorización del carro, para facilitar su desplazamiento. Apareció dos años más tarde la tercera generación del sistema, el da Vinci Si; aportando así una disminución del peso, del tamaño de la endocámara y del tamaño de la consola y la incorporación de un cuarto brazo (Torres Peña, 2019). Se representa esta evolución a lo largo de los años en la Ilustración 35.



**Ilustración 35. Evolución de las diferentes generaciones del sistema da Vinci (Cirugía Robótica Hospital San Rafael , 2021)**

La cuarta generación y en la que se va a centrar este estudio, da Vinci XI, apareció en abril de 2014. Este sistema consigue colocarse en cualquier posición alrededor del paciente y acceder a cualquier cuadrante abdominal, gracias a la funcionalidad del sistema de cuatro brazos quirúrgicos suspendidos desde una plataforma móvil. La última versión aprobada por la FDA incluye, además, una mesa operatoria integrada, con lo que se logra repositionar al paciente durante la cirugía sin necesidad de desatracar los puertos de los brazos del tele-manipulador (Torres Peña, 2019).

El sistema robótico maestro-esclavo da Vinci consta de las siguientes partes (Surichaqui, Aroni, Pari, Rodríguez, & Arbulú, 2021):

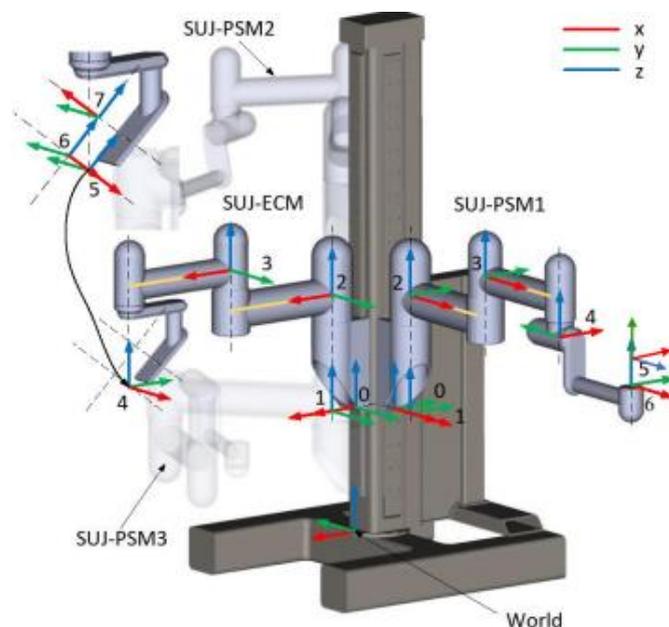
- **Consola de mando:** consiste en el lugar de trabajo del cirujano, puesto que es desde donde controla los movimientos de los cuatro brazos robóticos a través de unos pedales y de unos manipuladores en forma de anillos. Incluye, además, unos binoculares para conseguir una visión 3D del paciente totalmente inmersiva. Si el cirujano retira la cabeza de las gafas, los brazos robóticos serán automáticamente desactivados como mecanismo de seguridad.

- Carro robótico: consta de cuatro brazos robóticos. Estos están conectados por un sistema de cables, lo que les permite replicar con precisión los movimientos del cirujano. Mientras que tres brazos controlan los distintos instrumentos que pueden intercambiarse, el último tiene conectada una endocámara.
- Torre laparoscópica: cuenta con los instrumentos necesarios para realizar el neumoperitoneo, una consola de energía y un monitor de visión 2D.

Desde un punto de vista funcional, el sistema ofrece dos características: permite la visualización del campo quirúrgico, gracias al endoscopio conectado al sistema de visión 3D y la transformación de los movimientos de las manos del cirujano en movimientos de los instrumentos quirúrgicos (Freschi, y otros, 2012).

De esta manera, lo que consigue el sistema da Vinci XI es tener una visión de alta resolución del campo operatorio, a la vez que anula el temblor de las manos del cirujano e impide los movimientos involuntarios. Por otro lado, utiliza un *software* denominado da Vinci OS4, que proporciona información útil a la hora de tomar decisiones acerca del procedimiento (Torres Peña, 2019).

A continuación, se presenta la estructura general del carro robótico del sistema en la Ilustración 36. Como ya ha sido comentado, suelen ser cuatro los brazos utilizados: tres manipuladores esclavos situados cerca del paciente (PSM – “Patient Side Manipulators”) y un manipulador esclavo de cámara endoscópica (ECM – “Endoscope Camera Manipulator”), que se conectan al carro de articulación pasiva (SUJ – “Setup Joint”).



**Ilustración 36. Brazos PSM y ECM y sus ejes de referencia de un modelo del robot da Vinci (Gondokaryono, Agrawal, Munawar, Nycz, & Fischer, 2019)**

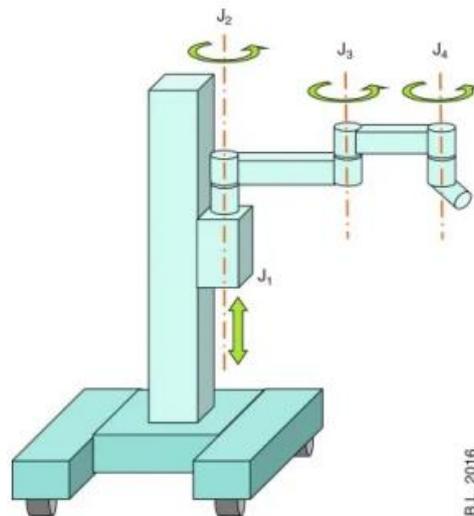
El carro SUJ se utiliza para posicionar los manipuladores de herramientas y cámara (PSM y ECM, respectivamente) en la configuración deseada con respecto al paciente antes del procedimiento quirúrgico. Las herramientas de cada manipulador se insertan a través de un trocar colocado en la incisión del paciente. El cirujano, desde la consola de mando, controla el movimiento de estas herramientas mediante dos manipuladores maestros de herramientas (MTM - “*Master Tool Manipulators*”) (Gondokaryono, Agrawal, Munawar, Nycz, & Fischer, 2019).

Se realizará, a continuación, un modelado y simulación de un modelo propuesto basado en esta estructura de un brazo perteneciente al sistema da Vinci.

#### 4.2.1. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL ROBOT DA VINCI

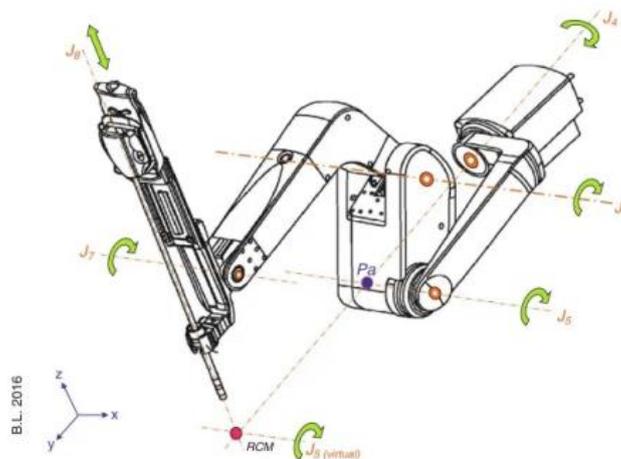
Algunos autores realizan también la división en dos partes diferentes de cada uno de los cuatro brazos robóticos. Muchas veces se refieren a la parte proximal del brazo (respecto del carro) como la parte pasiva, y denominan parte activa o actuada a la parte distal. La parte pasiva del brazo, compuesta por 4 articulaciones, estará dedicada a configurar el punto en el que comienza el RCM de cada brazo, puesto que estas articulaciones se ajustan manualmente soltando los frenos necesarios. La primera articulación es prismática y permite ajustar la altura. Seguidamente se encuentran 3 articulaciones planas de rotación, permitiendo así una fácil manipulación pasiva. Mientras que la articulación prismática es accionada eléctricamente, las tres restantes contienen frenos que se pueden liberar con el pulsador durante el proceso de configuración. La base del sistema, siendo bastante voluminosa, es lo suficientemente pesada como para inmovilizar todo el sistema una vez que se activan los frenos de los rodillos y, por tanto, el sistema no está asegurado mecánicamente a la mesa de operaciones (EntoKey, 2019).

Estas articulaciones, que van a otorgar los primeros grados de libertad a cada brazo del carro robótico, se pueden ver representadas en la Ilustración 37.



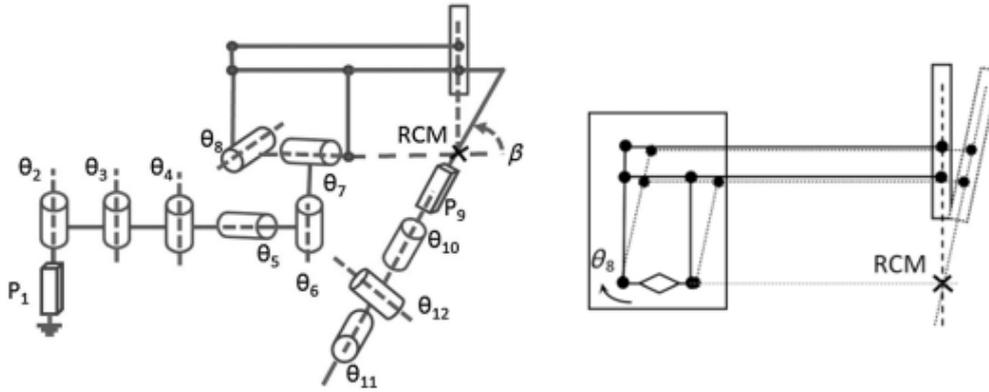
**Ilustración 37. Esquema de un brazo del carro robótico del sistema da Vinci, con sus primeros 4 DOF, dados por las primeras cuatro articulaciones ( $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  y  $J_4$ ) (EntoKey, 2019)**

Seguidamente, se encuentra lo que en la literatura es llamado el “brazo actuado” que es lo que se correspondería con la estructura relativa al mecanismo RCM. En la Ilustración 38 es posible ver un esquema de la parte actuada de un brazo del da Vinci, en el que es encontrado un mecanismo RCM basado en paralelogramos, como había sido comprobado en revisiones anteriores (EntoKey, 2019).



**Ilustración 38. Esquema de la estructura del mecanismo RCM del da Vinci, brazo actuado (EntoKey, 2019)**

Se puede apreciar en la Ilustración 39 cómo es formado este tipo de RCM; puesto que a partir de una serie de articulaciones vistas en la figura de la izquierda se forma un doble paralelogramo; cuya función será mantener el punto RCM fijo. Se determina así un punto de fulcro que se encuentra a cierta distancia de la propia estructura. Este es el punto que permitirá orientar correctamente el instrumento robótico sin cambiar de posición respecto del punto de entrada, evitando así dañar el tejido circundante (Freschi, y otros, 2012).



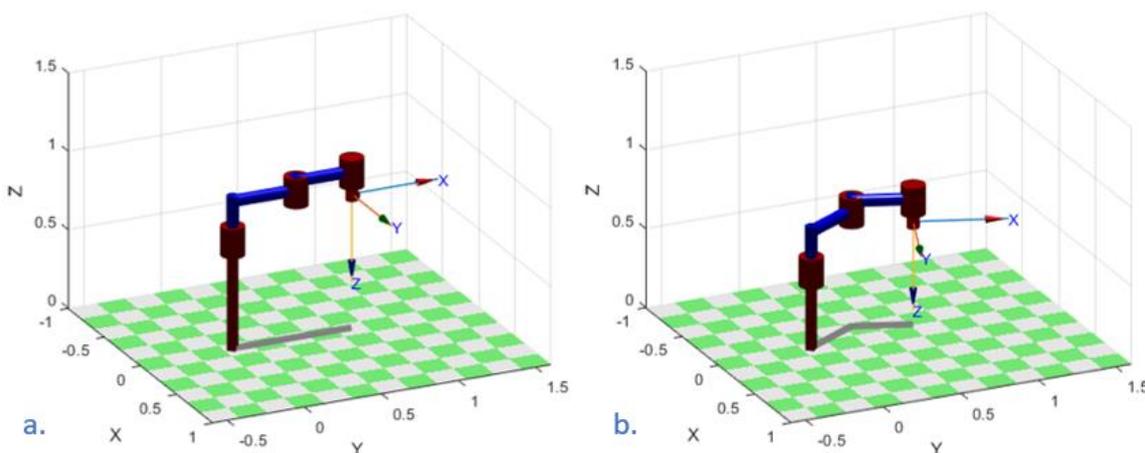
**Ilustración 39. Tipo de RCM incluido en el mecanismo del sistema robótico da Vinci (Freschi, y otros, 2012)**

Se realizará a continuación un modelado de uno de los brazos PSM del sistema da Vinci, con el objetivo de visualizar en su contexto el modelado del mecanismo RCM basado en paralelogramos desarrollado anteriormente. Basado en el esquema de la Ilustración 37, se designa un sistema de referencia de acuerdo con el algoritmo DH asociado a cada una de las articulaciones de la parte pasiva del brazo. En base a estos, se indican los parámetros DH de estas cuatro primeras articulaciones en la Tabla 8, expresados en metros y radianes. Para proponer estas medidas, se ha tomado como referencia las utilizadas en el modelo desarrollado en (Sun, Van Meer, Bailly, & Yeung, 2007), adaptándolas a un modelo propio que va a representarse a continuación.

**Tabla 8. Parámetros DH del brazo pasivo del sistema da Vinci modelado**

Articulación i	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\pi/2$	q1	0	0
2	q2	0.2485	0.4120	0
3	q3	0.0578	0.3620	0
4	q4	-0.1447	0	$\pi$

Antes de continuar con el modelado, se realizará una pequeña simulación en un entorno Matlab, con el objetivo de proporcionar una visión general de la parte pasiva del brazo y asegurar que se corresponda con el modelo realizado. De igual manera que en el capítulo anterior, utilizando la librería de Peter Corke, se crean las articulaciones y se unen para crear el modelo. La representación gráfica se observa en la Ilustración 40, donde se presentan dos configuraciones diferentes del brazo pasivo del sistema da Vinci modelado. El desarrollo del código correspondiente se incluye en el Anexo 3. La Ilustración 40.a se corresponde con la siguiente configuración articular:  $[q1, q2, q3, q4] = [0.7, 0, 0, 0]$ ; es decir, todas las articulaciones de rotación en su posición base y se toma como altura de referencia 0.7 metros (parámetro que corresponde a q1, la articulación prismática). Mientras que en la Ilustración 40.b se representa esta otra configuración:  $[q1, q2, q3, q4] = [0.5, 0.5236, -0.8727, 0]$ ; es decir, se disminuye la altura de la articulación q1 y rotan q2 en sentido positivo y q3, en negativo.



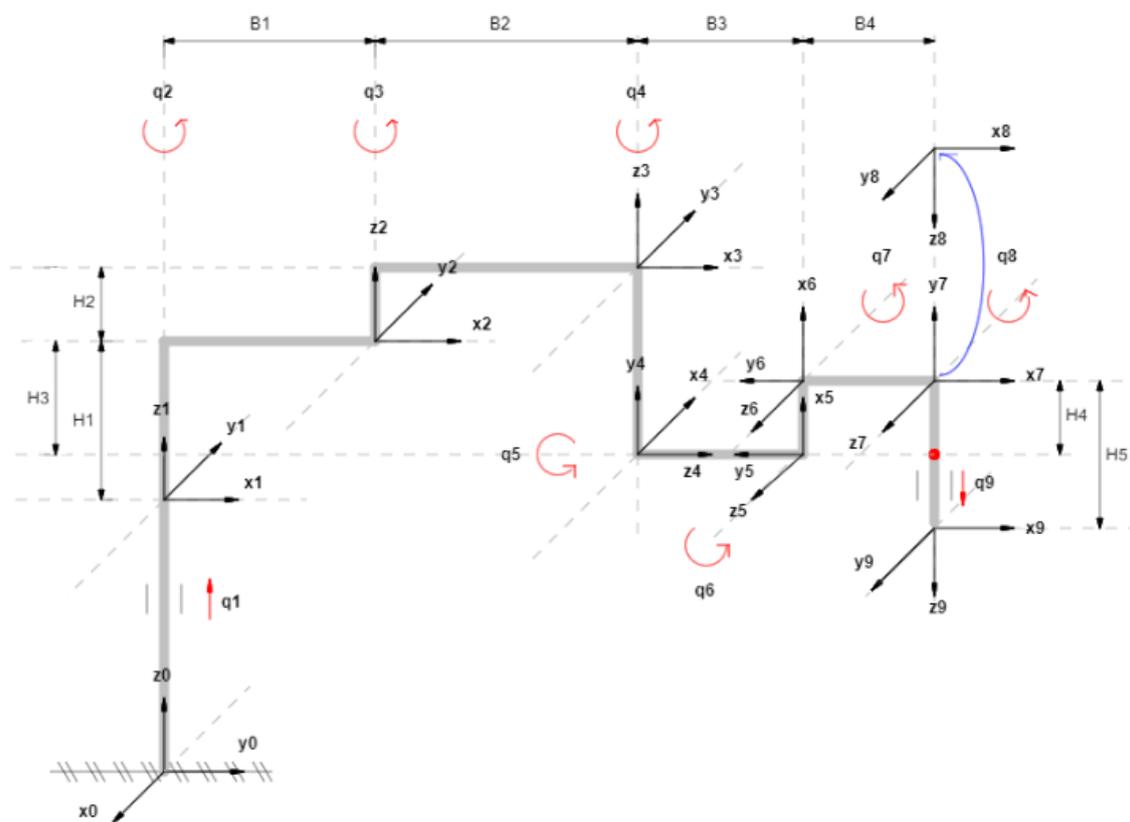
**Ilustración 40. Representación del modelado del brazo pasivo del da Vinci en dos configuraciones distintas**

Sería importante tener en cuenta las limitaciones del trabajo del robot extracorpóreo, es decir los movimientos de la estructura pasiva que van a tener lugar fuera del cuerpo del paciente. Cada articulación debe poder moverse libremente en el quirófano, pero no puede tocar al paciente durante la intervención, por lo que esto introduce otro requisito esencial durante el diseño del manipulador robótico (Kuo, Dai, & Dasgupta, Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview, 2012).

A continuación, y con el objetivo de completar de manera más exhaustiva el modelado del sistema da Vinci, se procederá a realizar un modelado de, tanto la parte pasiva del brazo, como la parte activa. Se realizará una adaptación y posterior unión del brazo pasivo junto con un modelo de RCM basado en paralelogramos, que es el sistema utilizado por el da Vinci, y que también ha sido modelado en el capítulo anterior.

Con ello, se pretende conseguir la representación de un modelo completo del sistema da Vinci, desde el brazo sujeto al carro SUJ hasta el punto RCM, que coincidiría con el punto de acceso al interior del paciente. Además, con el objetivo de conseguir que la simulación se parezca lo máximo posible a un movimiento real del robot controlado por el cirujano y, en base a la literatura revisada (Freschi, y otros, 2012) se incluye una articulación prismática adicional que forma parte del propio mecanismo de la herramienta quirúrgica y que va a permitir controlar su profundidad de inserción.

De esta manera, forman parte del mecanismo completo: cuatro articulaciones (una prismática,  $q_1$ , y tres rotacionales,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ ) pertenecientes a la parte pasiva del brazo; otras cuatro articulaciones de rotación que controlan el paralelogramo del mecanismo RCM ( $q_5$ ,  $q_6$ ,  $q_7$ ,  $q_8$ ); y, por último, se añade una articulación prismática que pertenecería al propio mecanismo de la herramienta y permite controlar la profundidad que esta alcanza dentro del cuerpo del paciente ( $q_9$ ). Todo el sistema de 9 DOF es representado en la Ilustración 41.



**Ilustración 41. Modelo completo propuesto del sistema robótico da Vinci**

En este caso, los parámetros obtenidos para cada articulación de la parte pasiva del brazo según el algoritmo DH sufren ligeras variaciones y se añaden, además, los parámetros correspondientes a las siguientes articulaciones, con lo que la caracterización completa de las 9 articulaciones del modelo da Vinci propuesto se recoge en la Tabla 9. Estas medidas se expresan en metros y radianes, dependiendo del tipo de parámetro.

**Tabla 9. Parámetros DH de todas las articulaciones del modelo da Vinci propuesto**

Articulación $i$	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\pi/2$	$q_1$	0	0
2	$q_2$	H1	B1	0
3	$q_3$	H2	B2	$\pi/2$
4	$q_4 + \pi/2$	$-H_2 - H_3$	0	$-\pi/2$
5	$q_5 + \pi/2$	B3	0	$-\pi/2$
6	$q_6$	0	H4	0
7	$q_7 - \pi/2$	0	B4	0
8	$q_8$	0	0	$\pi/2$
9	0	$q_9 + H_5$	0	0

Las MTH correspondientes, cuya obtención ha sido ya explicada, se indican a continuación:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q2) & -\text{sen}(q2) & 0 & \cos(q2)B1 \\ \text{sen}(q2) & \cos(q2) & 0 & \text{sen}(q2)B1 \\ 0 & 0 & 1 & H1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q3) & -\text{sen}(q3) & 0 & \cos(q3)B2 \\ \text{sen}(q3) & \cos(q3) & 0 & \text{sen}(q3)B2 \\ 0 & 0 & 1 & H2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} -\text{sen}(q4) & 0 & \cos(q4) & 0 \\ \cos(q4) & 0 & \text{sen}(q4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -H2 - H3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} -\text{sen}(q5) & 0 & -\cos(q5) & 0 \\ \cos(q5) & 0 & -\text{sen}(q5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & B3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos(q6) & -\text{sen}(q6) & 0 & \cos(q6)H4 \\ \text{sen}(q6) & \cos(q6) & 0 & \text{sen}(q6)H4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^6A_7 = \begin{bmatrix} \text{sen}(q7) & \cos(q7) & 0 & \text{sen}(q7)B4 \\ -\cos(q7) & \text{sen}(q7) & 0 & -\cos(q7)B4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^7A_8 = \begin{bmatrix} \cos(q8) & 0 & \text{sen}(q8) & 0 \\ \text{sen}(q8) & 0 & -\cos(q8) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^8A_9 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H5 + q9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Al igual que antes, la matriz de transformación homogénea T va a obtenerse del producto de las matrices que acaban de ser representadas. Al ser una expresión demasiado extensa, se incluye una matriz simbólica que se aclara a continuación:

$$T = {}^0A_4 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 {}^6A_7 {}^7A_8 {}^8A_9 =$$

$$= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

siendo:

$$R_{11} = \text{sen}(q8) * (\text{cos}(q7) * (\text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q6) + \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5)) + \text{sen}(q7) * (\text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) - \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6))) - \text{cos}(q8) * (\text{cos}(q7) * (\text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) - \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6)) - \text{sen}(q7) * (\text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q6) + \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5)))$$

$$R_{21} = \text{cos}(q8) * (\text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{cos}(q7) - \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q6) * \text{sen}(q7) + \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q7) + \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q7) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6)) - \text{sen}(q8) * (\text{cos}(q7) * (\text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q6) - \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5)) + \text{sen}(q7) * (\text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) + \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6)))$$

$$R_{31} = \text{sen}(q6 + q7 + q8) * \text{cos}(q5)$$

$$R_{12} = \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q5)$$

$$R_{22} = \text{sin}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q5)$$

$$R_{32} = -\text{sen}(q5)$$

$$R_{13} = -\text{sen}(q8) * (\text{cos}(q7) * (\text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) - \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6)) - \text{sen}(q7) * (\text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q6) + \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5))) - \text{cos}(q8) * (\text{cos}(q7) * (\text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q6) + \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5)) + \text{sen}(q7) * (\text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) - \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6)))$$

$$R_{23} = \text{sen}(q8) * (\text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{cos}(q7) - \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q6) * \text{sen}(q7) + \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q7) + \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q7) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6)) + \text{cos}(q8) * (\text{cos}(q7) * (\text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q6) - \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5)) + \text{sen}(q7) * (\text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{cos}(q6) + \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6)))$$

$$R_{33} = -\text{cos}(q6 + q7 + q8) * \text{cos}(q5)$$

$$T_1 = (H4 * \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q5 + q6))/2 - B2 * \text{sen}(q2 + q3) - B1 * \text{sen}(q2) - B3 * \text{sen}(q2 + q3 + q4) - (H5 + q9) * (\text{sen}(q2 + q3 + q4 + q5 - q6 - q7 - q8)/4 + \text{sen}(q5 - q3 - q4 - q2 + q6 + q7 + q8)/4 - \text{sen}(q2 + q3 + q4 - q5 + q6 + q7 + q8)/4 - \text{cos}(q2 + q3 + q4 + q6 + q7 + q8)/2 + \text{cos}(q2 + q3 + q4 - q6 - q7 - q8)/2 + \text{sen}(q2 + q3 + q4 + q5 + q6 + q7 + q8)/4) + H4 * \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{sin}(q6) - B4 * \text{cos}(q7) * (\text{cos}(q2 + q3) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q4) + \text{sen}(q2 + q3) * \text{cos}(q4) * \text{cos}(q6) - \text{cos}(q2 + q3) * \text{cos}(q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6) + \text{sen}(q2 + q3) * \text{sen}(q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6)) + B4 * \text{sen}(q7) * (\text{cos}(q2 + q3) * \text{sen}(q4) * \text{sen}(q6) + \text{sen}(q2 + q3) * \text{cos}(q4) * \text{sen}(q6) + \text{cos}(q2 + q3) * \text{cos}(q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5) - \text{sen}(q2 + q3) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5)) + (H4 * \text{sen}(q5 - q6) * \text{cos}(q2 + q3 + q4))/2$$

$$T_2 = B2 * \text{cos}(q2 + q3) - (H5 + q9) * (\text{cos}(q2 + q3 + q4 - q5 + q6 + q7 + q8)/4 - \text{sen}(q2 + q3 + q4 + q6 + q7 + q8)/2 + \text{sen}(q2 + q3 + q4 - q6 - q7 - q8)/2 - \text{cos}(q2 + q3 + q4 + q5 + q6 + q7 + q8)/4 - \text{cos}(q2 + q3 + q4 + q5 - q6 - q7 - q8)/4 + \text{cos}(q5 - q3 - q4 - q2 + q6 + q7 + q8)/4) + B1 * \text{cos}(q2) + B3 * \text{cos}(q2 + q3 + q4) + (H4 * \text{sen}(q2 + q3 + q4) * \text{sin}(q5 + q6))/2 - H4 * \text{cos}(q2 + q3 + q4) * \text{sen}(q6) + B4 * \text{cos}(q7) * (\text{cos}(q2 + q3) * \text{cos}(q4) * \text{cos}(q6) - \text{sen}(q2 + q3) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q4) + \text{cos}(q2 + q3) * \text{sen}(q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6) + \text{sen}(q2 + q3) * \text{cos}(q4) * \text{sen}(q5) * \text{sen}(q6)) + B4 * \text{sen}(q7) * (\text{sen}(q2 + q3) * \text{sen}(q4) * \text{sen}(q6) - \text{cos}(q2 + q3) * \text{cos}(q4) * \text{sen}(q6) + \text{cos}(q2 + q3) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q4) * \text{sen}(q5) + \text{sen}(q2 + q3) * \text{cos}(q4) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q5)) + (H4 * \text{sen}(q5 - q6) * \text{sen}(q2 + q3 + q4))/2$$

$$T_3 = H1 - H3 + q1 + H4 * \text{cos}(q5) * \text{cos}(q6) - \text{cos}(q6 + q7 + q8) * \text{cos}(q5) * (H5 + q9) + B4 * \text{cos}(q5) * \text{cos}(q6) * \text{sen}(q7) + B4 * \text{cos}(q5) * \text{cos}(q7) * \text{sen}(q6)$$

Esta matriz T caracteriza por completo la orientación y la traslación del TCP del robot ( $\{S_9\}$ ) respecto al sistema de referencia base  $\{S_0\}$ , en función de los valores de las articulaciones  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8$  y  $q_9$ .

- La orientación del eje  $x_9$  respecto de los ejes  $x_0, y_0$  y  $z_0$  viene determinada por los elementos  $R_{11}, R_{21}$  y  $R_{31}$ , respectivamente, de la matriz T.

- La orientación del eje  $y_9$  respecto de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$  viene determinada por los elementos  $R_{12}$ ,  $R_{22}$  y  $R_{32}$ , respectivamente, de la matriz T.
- La orientación del eje  $z_9$  respecto de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$  viene determinada por los elementos  $R_{13}$ ,  $R_{23}$  y  $R_{33}$ , respectivamente, de la matriz T.
- Por último, la posición del origen del sistema de referencia  $\{S_9\}$  se consigue con traslaciones del sistema de referencia  $\{S_0\}$  a lo largo de los ejes  $x_0$ ,  $y_0$  y  $z_0$ . Estas vienen determinadas por los elementos  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ , respectivamente, de la matriz T.

Debido a que esta matriz es demasiado larga y difícil de interpretar se va a realizar, al igual que antes, el modelo simbólico correspondiente dando valores concretos a las articulaciones. Se elegirán aquellos valores que se corresponden a la posición base del robot (representado en la Ilustración 41), con el objetivo de comprobar si esta matriz se corresponde con las transformaciones observadas. Es decir, se sustituye  $[q1, q2, q3, q4, q5, q6, q7, q8, q9] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$ ; y la matriz resultante es la siguiente:

$$T([q1, q2, q3, q4, q5, q6, q7, q8, q9] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & B1 + B2 + B3 + B4 \\ 0 & 0 & -1 & H1 - H3 + H4 - H5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En la posición que ha sido tomada como base de las tres articulaciones, el eje  $x_9$  coincide con el eje  $y_0$ ; el eje  $y_9$  coincide con el eje  $x_0$ ; y, el eje  $z_9$  coincide en sentido negativo con el eje  $z_0$ . Además, se puede observar que el origen del sistema de referencia  $\{S_9\}$ , correspondiente al TCP, está desplazado respecto del origen de  $\{S_0\}$  una distancia de:  $(B1 + B2 + B3 + B4)$  a lo largo del eje  $y_0$  y de  $(H1-H3+H4-H5)$  a lo largo del eje  $z_0$ . Estas especificaciones coinciden con lo observable en el esquema propuesto anteriormente.

Para finalizar el presente capítulo, se va a llevar a cabo la simulación de un robot en Matlab obtenido a partir del modelo propuesto. Se utiliza de nuevo la librería *Robotics Toolbox* (versión 4.0), de Peter Corke y se crean las nueve articulaciones ( $q1, q2, q3$  y  $q4$ , pertenecientes al brazo pasivo;  $q5, q6, q7$  y  $q8$ , para modelar el mecanismo RCM utilizado por el da Vinci y  $q9$ , para el desplazamiento de la herramienta a lo largo de su eje).

El resumen de las características del sistema modelado se puede observar en la Ilustración 42. Los parámetros que han tenido que ser especificados para esta simulación son indicados en la Tabla 10. Esta elección de las medidas no está basada en la literatura revisada, sino que ha sido especificada en base a la representación obtenida en Matlab, con el objetivo de que esta fuera lo más clara posible a nivel visual, dentro de unos límites factibles. El código que ha sido desarrollado en Matlab (versión R2022a) para esta parte final del capítulo se recoge en el Anexo 4.

DV =

(9 axis, PRRRRRRRP, stdDH, fastRNE)

j	theta	d	a	alpha	offset
1	1.571	q1	0	0	0
2	q2	0.46	0.485	0	0
3	q3	0.145	0.535	0	0
4	q4	-0.615	0	1.571	1.571
5	q5	0.46	0	-1.571	1.571
6	q6	0	0.25	0	0
7	q7	0	0.32	0	-1.571
8	q8	0	0	1.571	0
9	0	q9	0	0	0

```

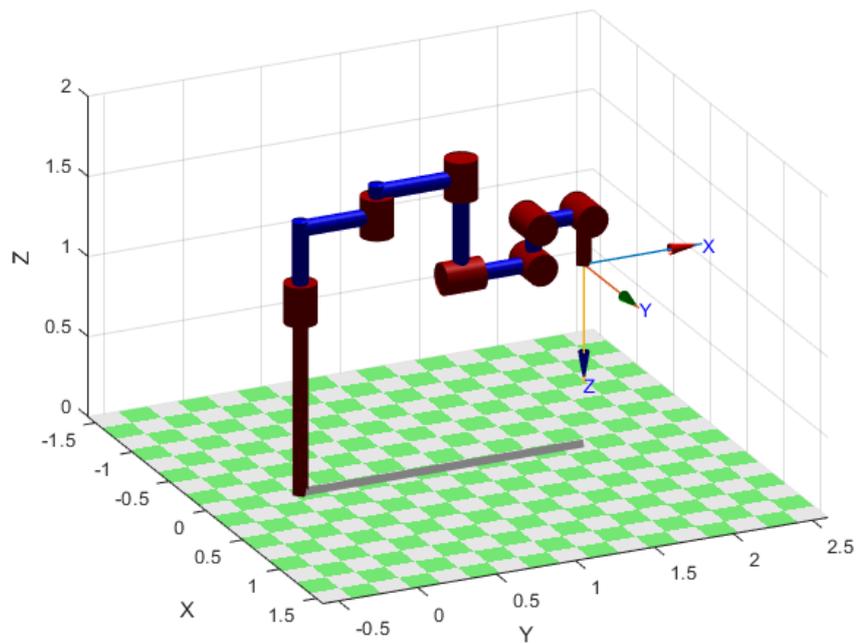
grav = 0 base = 1 0 0 0 tool = 1 0 0 0
        0         0 1 0 0         0 1 0 0
        9.81      0 0 1 0         0 0 1 0
                0 0 0 1         0 0 0 1
    
```

Ilustración 42. Resumen características del modelo creado del brazo da Vinci

Tabla 10. Parámetros seleccionados para la simulación del modelo da Vinci

Parámetro	Medida (metros)
B1	0.485
B2	0.535
B3	0.460
B4	0.320
H1	0.460
H2	0.145
H3	0.470
H4	0.250
H5	0.310

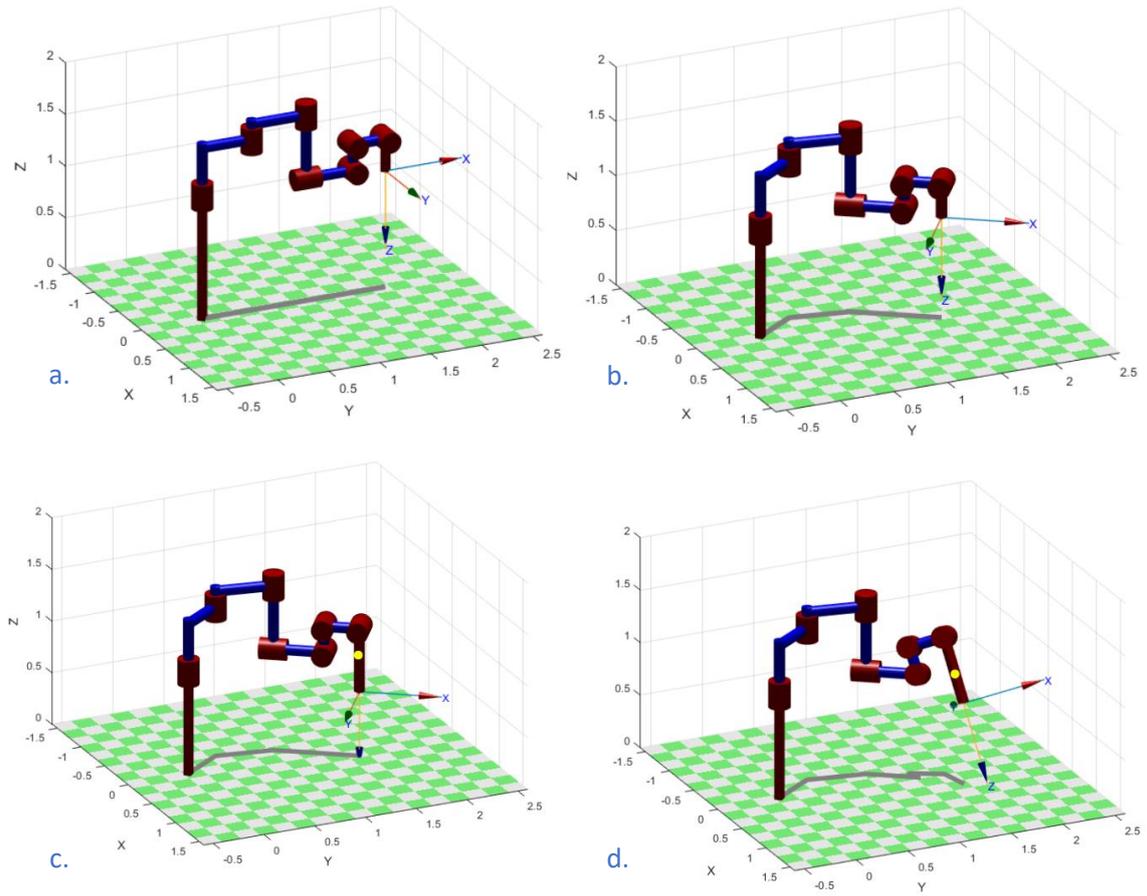
Se incluye en primer lugar una representación del modelo en su posición base en la Ilustración 43. Para ello se toman los siguientes valores:  $[q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9] = [1.2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.31]$ . Todas las articulaciones rotacionales toman un valor de rotación nulo, mientras que para las dos articulaciones prismáticas ( $q_1$  y  $q_9$ ) se han escogido valores con el objetivo de que el modelo simulado se pareciera lo máximo posible al modelo esquematizado. El código necesario para realizar esta representación se recoge igualmente en el Anexo 4.



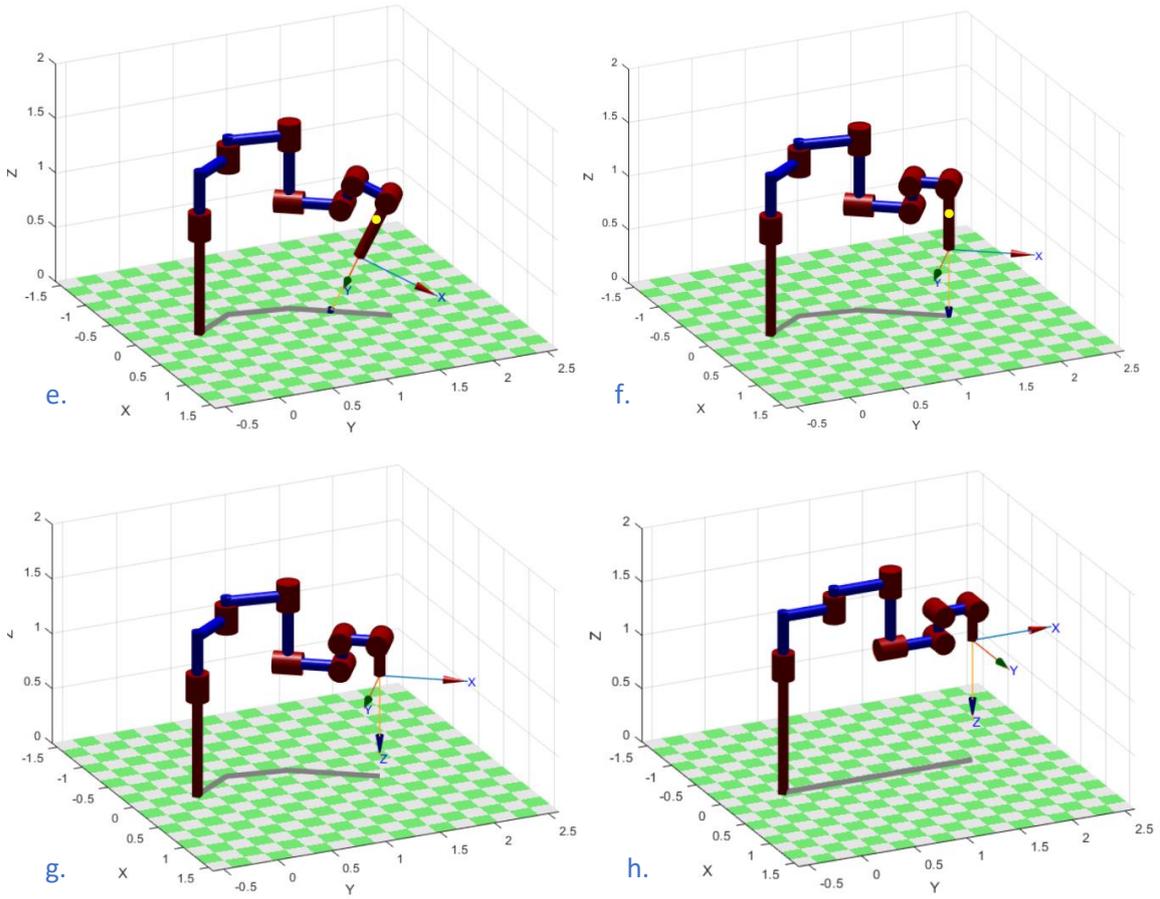
**Ilustración 43. Representación en su posición base del esquema del brazo da Vinci propuesto**

Además, con el objetivo de simular un movimiento que se asemejara lo máximo posible al trabajo que este sistema robotizado realiza en el quirófano, se va a programar una trayectoria que consista en los siguientes movimientos consecutivos (también incluida en el Anexo 4):

- El robot empieza colocado en la posición que antes ha sido determinada como configuración base (Ilustración 44.a).
- Se coloca el mecanismo en la posición deseada, moviendo la parte pasiva del brazo, a partir de la especificación de los valores articulares correspondientes (Ilustración 44.b).
- Se realiza después el movimiento que representa la introducción de la herramienta quirúrgica en el cuerpo del paciente, gracias a un desplazamiento de la articulación prismática  $q_9$  (Ilustración 44.c). A partir de este momento y, mientras el instrumento se encuentre en el interior del cuerpo del paciente, la conservación del punto de fulcro gracias al RCM se representa con un punto amarillo.
- A continuación, se representa un pivoteo de la herramienta respecto del RCM, primero en una trayectoria (Ilustración 44.d) y después en otra diferente (Ilustración 45.e), a través del movimiento de las articulaciones  $q_5$  y  $q_6$ , y las correspondientes restricciones que sufren, por su parte,  $q_7$  y  $q_8$ , para la conservación de los paralelogramos.
- Por último, se devolverá el robot a su posición inicial siguiendo el orden inverso: recuperación de la posición base del paralelogramo (Ilustración 45.f), extracción de la herramienta del cuerpo del paciente al volver al valor anterior de  $q_9$  (Ilustración 45.g) y recuperación de la posición base de las articulaciones correspondientes a la parte pasiva del brazo (Ilustración 45.h).



**Ilustración 44. Parte 1 de los movimientos de la trayectoria especificada del brazo da Vinci**



**Ilustración 45. Parte 2 de los movimientos de la trayectoria especificada del brazo da Vinci**

Se incluye a continuación la Tabla 11, donde se adjuntan, de manera específica, los valores iniciales y finales que toma cada una de las nueve articulaciones a lo largo de todos los movimientos pertenecientes a la trayectoria representada, expresados en metros y radianes. Se comprueba que, para cada uno de los movimientos (especificados debajo de la tabla), el valor final coincide con el valor inicial del siguiente para las nueve articulaciones.

**Tabla 11. Valores iniciales y finales (medidos en metros y radianes) de las nueve articulaciones del brazo da Vinci en cada uno de los movimientos de la trayectoria propuesta**

Articulación		Mov. 1	Mov. 2	Mov. 3	Mov. 4	Mov. 5	Mov. 6	Mov. 7
q1	Inicial	1.2	1	1	1	1	1	1
	Final	1	1	1	1	1	1	1.2
q2	Inicial	0	0.6109	0.6109	0.6109	0.6109	0.6109	0.6109
	Final	0.6109	0.6109	0.6109	0.6109	0.6109	0.6109	0
q3	Inicial	0	-0.7854	-0.7854	-0.7854	-0.7854	-0.7854	-0.7854
	Final	-0.7854	-0.7854	-0.7854	-0.7854	-0.7854	-0.7854	0
q4	Inicial	0	-0.4363	-0.4363	-0.4363	-0.4363	-0.4363	-0.4363
	Final	-0.4363	-0.4363	-0.4363	-0.4363	-0.4363	-0.4363	0
q5	Inicial	0	0	0	-0.3491	0	0	0
	Final	0	0	-0.3491	0	0	0	0
q6	Inicial	0	0	0	0.3491	-0.4363	0	0
	Final	0	0	0.3491	-0.4363	0	0	0
q7	Inicial	0	0	0	-0.3491	0.4363	0	0
	Final	0	0	-0.3491	0.4363	0	0	0
q8	Inicial	0	0	0	0.3491	-0.4363	0	0
	Final	0	0	0.3491	-0.4363	0	0	0
q9	Inicial	0.31	0.31	0.61	0.61	0.61	0.61	0.31
	Final	0.31	0.61	0.61	0.61	0.61	0.31	0.31

- Mov. 1: se cambia de la posición base a la colocación de la parte pasiva del brazo, varían q1, q2, q3 y q4.
- Mov. 2: se introduce la herramienta quirúrgica en el cuerpo del paciente, varía q9.
- Mov. 3: primer movimiento de pivoteo de la herramienta, varían q5, q6, q7 y q8.
- Mov. 4: segundo movimiento de pivoteo de la herramienta, varían q5, q6, q7 y q8.
- Mov. 5: se devuelve el paralelogramo a su posición base, varían q5, q6, q7 y q8.
- Mov. 6: se extrae la herramienta quirúrgica del cuerpo del paciente, varía q9.
- Mov. 7: se devuelve la parte pasiva del brazo a su posición base, varían q1, q2, q3 y q4.

Para concluir el capítulo, se realiza también a nivel gráfico una representación de la evolución temporal de las coordenadas de cada articulación que se muestra en la Ilustración 46; donde se indica la posición de cada articulación (en metros o en grados), respecto del tiempo (en segundos). El código se incluye en el Anexo 4.

Se observa una clara relación entre la trayectoria explicada anteriormente y la representación gráfica del movimiento. En los primeros dos segundos, varía la posición de las articulaciones  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  y  $q_4$ , mientras que el resto permanecen en la misma posición. Con esto se establece la altura y la posición del mecanismo RCM deseadas para llevar a cabo la operación laparoscópica. Entre los segundos 2 y 4, sólo cambia la posición de  $q_9$ , que realiza el movimiento que se asemeja a la introducción de la herramienta quirúrgica en el cuerpo del paciente. Después, entre los segundos 4 y 10, se observa un movimiento solamente de las articulaciones  $q_5$ ,  $q_6$ ,  $q_7$  y  $q_8$ , es decir, de las articulaciones que pertenecen al mecanismo RCM. Estos movimientos se corresponden a dos movimientos de pivoteo de la herramienta respecto de diferentes ejes y a la recuperación de la posición base. Por último, entre los segundos 10 y 12 la articulación  $q_9$  vuelve a su valor base, extrayendo la herramienta del interior del cuerpo. Y en los dos últimos segundos el resto de las articulaciones ( $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  y  $q_4$ ) regresan también a su posición base.

### Evolución temporal de las coordenadas articulares

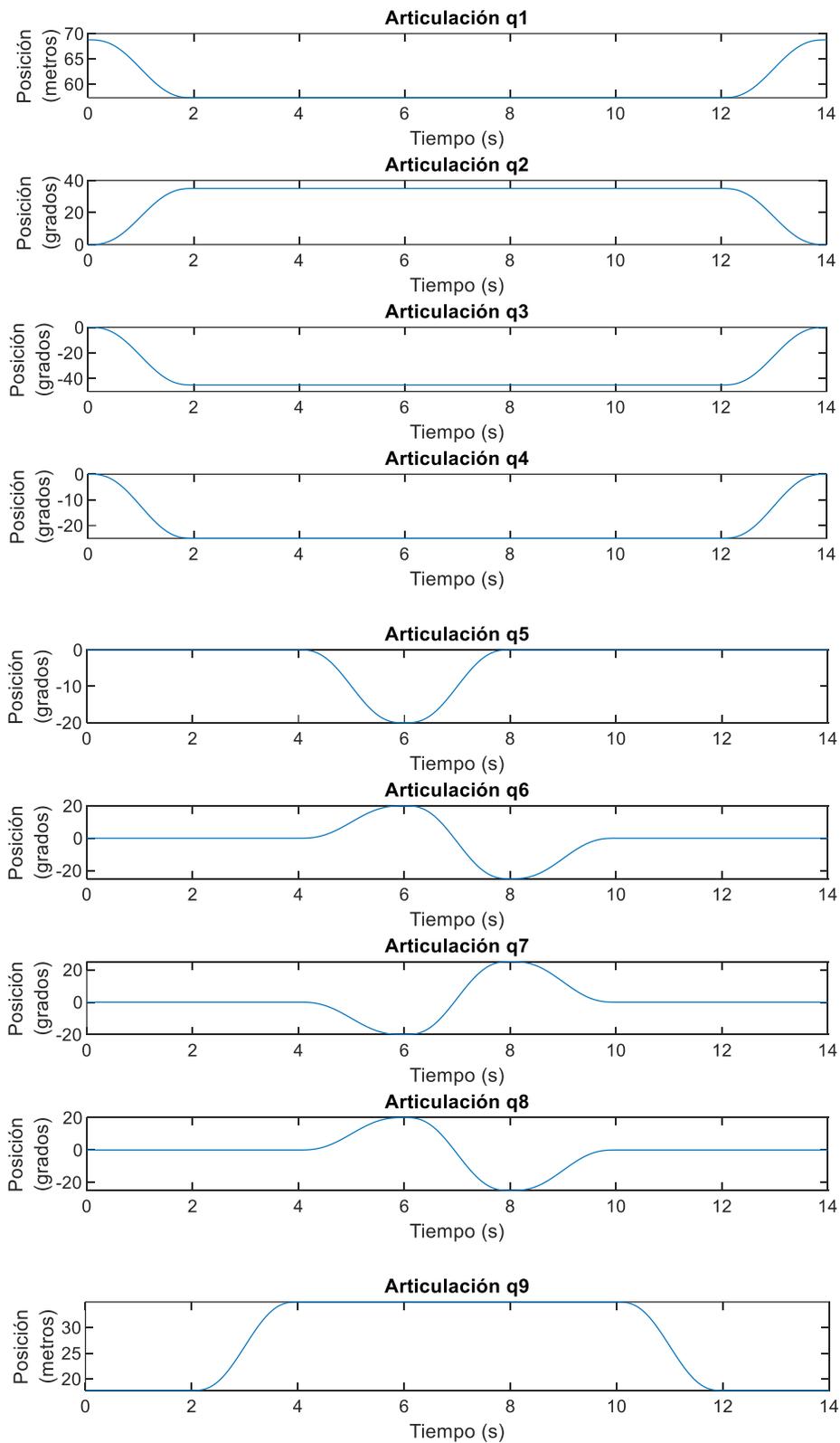


Ilustración 46. Representación gráfica de las coordenadas articulares de q1, q2, q3, q4, q5, q6, q7, q8 y q9, respectivamente, a lo largo de toda la trayectoria

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este último capítulo, se presentarán las conclusiones obtenidas de este trabajo, incluyendo un resumen del grado de consecución de los objetivos. Además, se abordarán las limitaciones encontradas durante la realización del proyecto y serán sugeridas posibles líneas futuras de investigación.

Antes de empezar con el primer apartado, me gustaría recalcar la gran utilidad de la que me han sido los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera durante el desarrollo de este proyecto, especialmente en las asignaturas de Robótica médica, Ingeniería de rehabilitación, Equipos de simulación biomédicos y Modelado y simulación de sistemas biológicos. Las competencias adquiridas en dichas asignaturas han sido de gran ayuda a la hora de completar los objetivos propuestos.

### 5.1. GRADO DE CONSECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS

El presente trabajo ha logrado alcanzar de manera satisfactoria los objetivos planteados, los cuales fueron centrados en realizar un estudio exhaustivo del concepto de centro de rotación remoto en el ámbito de la robótica quirúrgica, así como desarrollar modelos cinemáticos, y realizar simulaciones para comprender y analizar su aplicación en el contexto de la cirugía laparoscópica.

En primer lugar, se llevó a cabo un estudio del concepto central del TFG, el centro de rotación remoto en los procedimientos de cirugía laparoscópica. Tras una detallada revisión de la literatura existente, se logró comprender los conceptos teóricos de este tipo de mecanismo, explorando sus principales características y sentando las bases teóricas para el desarrollo de los siguientes objetivos planteados.

En segundo lugar, se logró el desarrollo de varios modelos de mecanismos de centro de rotación remoto. Estos fueron diseñados con el objetivo de caracterizar matemáticamente el problema de cinemática directa para estos sistemas. Gracias a la aplicación de conceptos teóricos robóticos, se logró representar de manera detallada los movimientos y posiciones alcanzables por el TCP del mecanismo de centro de rotación remoto.

El tercer objetivo planteado consistía en la validación de dichos modelos gracias a un proceso de simulación. Mediante el uso de herramientas de software especializadas ha sido realizado un modelo simbólico y una simulación, con los que se pudo garantizar la veracidad y

fiabilidad del modelo que había sido propuesto. Además, las simulaciones permitieron observar de una manera mucho más visual e intuitiva los conceptos explicados.

Por último, se logró el desarrollo de un modelo basado en el sistema robotizado da Vinci para estudiar un ejemplo práctico y analizar el centro de rotación remoto en un entorno real. Utilizando el modelo desarrollado, se presentó también la simulación propuesta, con lo que se completó la contextualización del concepto principal del TFG. Se brindó así una comprensión más profunda de su utilización y desempeño en un entorno clínico.

Se ha cumplido así el principal objetivo indicado, relacionado con lograr un estudio, análisis, modelado y simulación del RCM con fines didácticos, utilizando los conceptos y las herramientas informáticas que se imparten en asignaturas de grados relacionadas con sistemas mecánicos y sistemas robotizados.

## 5.2. CONCLUSIONES EXTRAÍDAS Y APORTACIONES ORIGINALES

Tras completar el estudio y cumplir los objetivos propuestos en este trabajo fin de grado, se han extraído diversas conclusiones que aportan conocimientos novedosos sobre el tema tratado. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes y las aportaciones originales realizadas:

Se ha comprendido la importancia de los mecanismos estudiados en el abordaje quirúrgico con la asistencia de robots y, gracias a este estudio teórico y su correspondiente modelado, se ha llegado a desarrollar modelos matemáticos específicos para los mecanismos estudiados. Además, la propuesta de una representación de un brazo robótico real ha sido útil para poder contextualizar el conocimiento adquirido. El estudio de cinemática directa realizado permite caracterizar por completo el comportamiento del robot y la posición de su TCP en función de sus valores articulares.

Con todos los análisis realizados, se ha conseguido recoger en un mismo documento toda la información necesaria para entender y caracterizar por completo el concepto RCM estudiado, incluyendo un ejemplo que puede servir de prototipo ilustrativo.

En resumen, este TFG ha proporcionado conclusiones sólidas y ha realizado aportaciones al estudio del centro de rotación remoto en la robótica quirúrgica. Estas conclusiones contribuyen al avance didáctico del estudio de este campo y ofrecen nuevas perspectivas, recogiendo los conocimientos necesarios para mejorar el estudio de la importancia de los mecanismos RCM en los procedimientos quirúrgicos mínimamente invasivos.

### 5.3. LIMITACIONES

Una vez concluido el presente trabajo, sería de utilidad destacar las principales limitaciones encontradas, que han podido influir en los resultados obtenidos.

Con respecto a los recursos, se han presentado limitaciones en cuanto a la herramienta de software utilizada para la simulación. La *Robotics Toolbox* de Matlab ha proporcionado simulaciones relativamente simples. Aunque esta librería ha ofrecido funciones muy útiles para modelar y simular sistemas robóticos, su nivel de complejidad y sofisticación puede ser limitado en comparación con otras herramientas especializadas en la simulación de robots quirúrgicos. Esta limitación ha podido afectar a la precisión y fidelidad de las simulaciones realizadas como parte del estudio. Debido a estas simplificaciones, no se ha capturado completamente la complejidad de los movimientos en un entorno quirúrgico real, por lo que este tipo de resultados pueden reflejar solo una aproximación limitada de la realidad.

Otra limitación identificada durante la realización del proyecto ha sido la escasez de bibliografía disponible sobre modelados previamente realizados o datos concretos sobre los mecanismos RCM. El acceso a una mayor cantidad de datos y ejemplos específicos proporcionaría una base más sólida para el desarrollo de los modelos, mejorando la precisión de los resultados obtenidos. Además, permitiría una comprensión más profunda de las características de estos mecanismos en diferentes contextos clínicos.

Aunque estas limitaciones no deben restar valor a los resultados y contribuciones propuestos, es importante identificarlas para reconocer también potenciales líneas de investigación para futuros trabajos.

### 5.4. LÍNEAS FUTURAS

Se presentan a continuación algunas líneas futuras de investigación que podrían derivarse del presente estudio. Se exponen algunas sugerencias para investigaciones futuras, que podrían contribuir al avance en el campo de estudio del centro de rotación remoto en los sistemas robotizados para cirugías laparoscópicas:

- Para futuras investigaciones, se sugiere considerar el uso de herramientas informáticas más avanzadas y específicas para la simulación de robots quirúrgicos, que brinden una mayor precisión y realismo en la representación de los sistemas estudiados. Esto permitiría obtener resultados más detallados, contribuyendo a un análisis más completo y visual, en lugar de esquemático.
- Otra línea futura de investigación interesante sería el estudio y análisis de otros tipos de mecanismos de centro de rotación remoto, además de los ya modelados en este estudio (circular y basado en paralelogramos). Algunos ejemplos de mecanismos que podrían ser explorados incluyen: RCM de transmisión de correa síncrona, basados en

mecanismos paralelos de muñeca o en cadenas de engranajes. Aunque no son tan utilizados como los dos tipos que han sido incluidos en el presente TFG, sería también interesante realizar un estudio de su funcionamiento, con su correspondiente modelado y simulación, con el fin de profundizar en su conocimiento y ver si se utilizan o podrían utilizarse en algún sistema robotizado utilizado en procedimientos laparoscópicos.

- Otra línea de investigación interesante sería la inclusión en el modelado del robot de otros grados de libertad adicionales. Se añadirían así otras articulaciones pertenecientes al propio mecanismo de la herramienta, añadiendo aún más realismo a la posterior simulación, que se acercaría más al comportamiento real del robot durante una operación.
- Por último, se propone el estudio de un RCM en un robot quirúrgico diferente al sistema da Vinci, puesto que esto serviría para ampliar aún más el conocimiento sobre la aplicación de este mecanismo en la cirugía laparoscópica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aksungur, S., Aydin, M., & Yakut, O. (2019). Real-time PID control of a novel RCM mechanism designed and manufactured for use in laparoscopic surgery. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 153-166.
- Barrientos, A., Felipe Peñín, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw Hill.
- Briot, S., & Khalil, W. (2015). *Dynamics of Parallel Robots*. Nantes: Springer.
- Calvo, J. (15 de Marzo de 2023). Obtenido de Cirugía robótica en León: 'Da Vinci' y sus 600 operaciones: <https://www.leonoticias.com/leon/cirugia-robotica-leon-vinci-600-operaciones-20230314203328-nt.html>
- Chng, C.-B., Duan, B., & Chui, C.-K. (2016). Modeling and Simulation of a Remote Center of Motion Mechanism. *TENCON*. Singapore.
- Christiansen, S. (3 de Noviembre de 2022). *Verywell Health*. Obtenido de Robotic Surgery: Everything You Need to Know: <https://www.verywellhealth.com/robotic-surgery-4843262>
- Cirugía Robótica Hospital San Rafael*. (21 de Enero de 2021). Obtenido de La cirugía robótica Da Vinci cumple 15 años en España: <https://cirugiaroboticasanrafael.com/la-cirugia-robotica-da-vinci-cumple-15-anos-en-espana/>
- Clínica Universidad de Navarra*. (s.f.). Obtenido de Cirugía laparoscópica: <https://www.cun.es/enfermedades-tratamientos/tratamientos/cirugia-laparoscopica>
- Cordero Sánchez, D., Tafur Puentes, D., & Rodríguez López, L. M. (2022). Avances en la cirugía robótica, una revisión sistemática enfocada en Cirugía General. *Scientific and Education Medical Journal*.
- Corke, P. (1996). A Robotics Toolbox for MATLAB. *Robotics and Automation Magazine*.
- Cuesta, M. (2000). Laparoscopic surgery. *Cirugía Española*, 420-423.
- De Andrés, M. (3 de Junio de 2023). Obtenido de La cirugía asistida por robots ahorraría costes al Sistema Nacional de Salud: [https://www.larazon.es/sociedad/cirugia-asistida-robots-ahorraria-costes-sistema-nacional-salud\\_2023030664053c341e80a4000150882b.html](https://www.larazon.es/sociedad/cirugia-asistida-robots-ahorraria-costes-sistema-nacional-salud_2023030664053c341e80a4000150882b.html)
- EntoKey*. (9 de Junio de 2019). Obtenido de The da Vinci® system: technology and surgical analysis: <https://entokey.com/the-da-vinci-system-technology-and-surgical-analysis/>
- Frenkel, C. H., Yang, J., Zhang, M., Ferrara, A., Telem, D. A., & Samara, G. J. (2018). Gastrostomy in the era of minimally invasive head and neck cancer surgery. 847-851.
- Freschi, C., Ferrari, V., Melfi, F., Ferrari, M., Mosca, F., & Cuschieri, A. (2012). Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 396-406.

- Gondokaryono, R. A., Agrawal, A., Munawar, A., Nycz, C. J., & Fischer, G. S. (2019). An Approach to Modeling Closed-Loop Kinematik Chain Mechanisms, Applied to Simulations of the da Vinci Surgical System.
- GueliAlleti, S., Chiantera, V., Arcuri, G., Gioé, A., Oliva, R., Monterossi, G., . . . Scambia, G. (2022). Introducing the New Surgical Robot HUGO™ RAS: System Description and Docking Settings for Gynecological Surgery. *Front Oncol Journal*.
- Gutiérrez Delgado, M. d., Mera Velasco, S., Sánchez Gallegos, P., & Jiménez Rodríguez, R. M. (2021). Análisis comparativo de los resultados de la cirugía laparoscópica vs cirugía robótica en cáncer rectal electivo.
- HCA Healthcare UK. (s.f.). Obtenido de Robotic excellence with the da Vinci surgical system: <https://www.hcahealthcare.co.uk/about-hca-uk/robotics-and-technology-at-hca/the-da-vinci-surgical-system>
- Hospitecnia. (5 de Septiembre de 2018). Obtenido de Llega al NHS el nuevo sistema de cirugía robótica Versius: <https://hospitecnia.com/noticias/nuevo-sistema-de-cirugia-robot-versius/>
- letto, G., Amico, F., Pettinato, G., Iori, V., & Carcano, G. (2017). Laparoscopy in Emergency: Why Not? Advantages of Laparoscopy in Major Emergency: A Review. *Life*.
- Joong Na, K., & Hyun Kang, C. (2020). Robotic thymectomy for advanced thymic epithelial tumor: indications and technical aspects. *Journal of Thoracic Disease*, 63-69.
- Kawashima, K., Kanno, T., & Tadano, K. (2019). Robots in laparoscopic surgery: current and future status. *BMC Biomedical Engineering*.
- Kuo, C.-H., & Dai, J. S. (2009). Robotics for Minimally Invasive Surgery: A Historical Review from the Perspective of Kinematics. *International Symposium on History of Machines and Mechanisms* (págs. 337-354). Springer.
- Kuo, C.-H., Dai, J. S., & Dasgupta, P. (2012). Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview. *International Journal of Medical Robotics*, 127-145.
- Linder Efter, C. (12 de Agosto de 2021). *Top Doctors México*. Obtenido de Cirugía Laparoscópica: sus beneficios dentro de la Ginecología y Obstetricia: <https://www.topdoctors.mx/articulos-medicos/cirugia-laparoscopica-sus-beneficios-dentro-de-la-ginecologia-y-obstetricia#>
- Marques Marinho, M., Costa Bernardes, M., & Lanari Bo, A. P. (2016). Using General-Purpose Serial-Link Manipulators for Laparoscopic Surgery with Moving Remote Center of Motion. *Journal of Medical Robotics Research*.
- Morton, J., Hardwick, R. H., Tilney, H. S., Gudgeon, A. M., Jah, A., Stevens, L., . . . Slack, M. (2020). Preclinical evaluation of the versius surgical system, a new robot-assisted surgical device for use in minimal access general and colorectal procedures.
- Noonan, K., O'Brien, D., & Snoeyink, J. (2005). Probik: Protein Backbone Motion by Inverse Kinematics. *The International Journal of Robotics Research*.

- Palep, J. H. (2009). Robotic assisted minimally invasive surgery. *Journal of Minimal Access Surgery*.
- Pereira Fraga, J. G. (2017). Present time of the robotic surgery. *Revista Cubana de Cirugía*.
- Peters, B. S., Armijo, P. R., Krause, C., Choudhury, S. A., & Oleynikov, D. (2018). Review of emerging surgical robotic technology.
- Ramírez Arias, J. L., & Rubiano Fonseca, A. (2012). Modelamiento matemático de la cinemática directa e inversa de un robot manipulador de tres grados de libertad. *Ingeniería Solidaria*.
- Runciman, M., Darzi, A., & Mylonas, G. P. (2019). Soft Robotics in Minimally Invasive Surgery. *Soft Robot*.
- Shareef, I. R., & Abd Al Kareem, I. A. (2014). Investigating Forward kinematic Analysis of a 5-axes Robotic Manipulator Using Denavit-Hartenberg Method and Artificial Neural Network. *Eng. and Tech. Journal*.
- Sun, L.-W., Van Meer, F., Bailly, Y., & Yeung, C. K. (2007). Design and Development of a Da Vinci Surgical System Simulator. *International Conference on Mechatronics and Automation*.
- Surichaqui, P., Aroni, R., Pari, J., Rodríguez, H., & Arbulú, M. (2021). Asistencia Robótica en Cirugía Laparoscópica 4.0. *EXPOTECH 2021 Ciencia, Ingeniería y Sociedad "Innovación Tecnológica para la Competitividad y Productividad"*.
- Torres Peña, R. (2019). Robotic surgery: ¿a disruptive technology? *Revista de Información para la Dirección en Salud*.
- Trochimczuk, R. (2017). Analysis of parallelogram mechanism used to preserve remote center of motion for surgical telemanipulator. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 229-240.
- Wang, Z., Zhang, W., & Ding, X. (2020). Design and analysis of a novel mechanism with a two-DOF remote center of motion. *Mechanism and Machine Theory Journal*.
- Washio, M., Yamashita, K., Niihara, M., Hosoda, K., & Hiki, N. (2020). Postoperative pancreatic fistula after gastrectomy for gastric cancer. *Annals of Gastroenterological Surgery*, 618–627.
- Zhu Yun-ping, Z. F. (2015). A Novel Remote Center-of Motion Parallel manipulator for Minimally Invasive Celiac Surgery. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 15-19.



Se recogen a continuación los códigos desarrollados para la parte de simulación de los modelos realizados de RCM, tanto de tipo circular como el mecanismo basado en paralelogramos. También son añadidos los códigos programados durante el desarrollo del modelo propuesto de robot da Vinci.

## Anexo 1

### MODELADO DE UN RCM CIRCULAR

Se recoge en este anexo el programa de Matlab (versión R2022a) creado para realizar la simulación de un centro de rotación remoto circular. Se utiliza la librería *Robotics Toolbox* (versión 4.0) para crear el modelo con 3 articulaciones a partir de sus parámetros DH. Después, se presenta una simulación de un ejemplo de trayectoria y se recogen en una gráfica los posibles puntos accesibles por el TCP de la herramienta.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELADO DE UN RCM CIRCULAR
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear;
close all;
clc;

%% MODELADO DEL RCM

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parámetros DH
% Articulación 1: rotación
% Articulación 2: rotación
% Articulación 3: prismática
%=====
%      theta / d / a / alfa
%=====
% 1 / Q1+pi/2 / 0 / 0 / pi/2
%-----
% 2 / Q2+pi/2 / 0 / 0 / pi/2
%-----
% 3 / 0 / Q3+H / 0 / 0
%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Metros
H=30/100;

% Se crean los enlaces del robot con los parámetros correspondientes,
offset y se crea el objeto

L(1)= Link('revolute','d', 0, 'a', 0, 'alpha', pi/2);
L(2)= Link('revolute','d', 0, 'a', 0, 'alpha', pi/2);
L(3)= Link('prismatic','theta',0, 'a', 0, 'alpha',0);
L(1).offset=pi/2;
L(2).offset=pi/2;
RCM = SerialLink(L);
RCM.name='';

% Se configuran dos posiciones y se mueve el robot desde la
configuración 1 hasta la configuración 2

confi=[deg2rad(165),deg2rad(-40),H;
       deg2rad(195),deg2rad(-140),H];
t=0:.04:2;
tra1=jtraj(confi(1,:),confi(2,:),t);

% Se dibuja primero el robot en la configuración 1

figure(1)
view(120,30);
RCM.plot(confi(1,:), 'workspace', [-0.5 0.5 -0.5 0.5 -0.5 0.2]);
pause(2);

% Calculamos el MCD para obtener la MTH, y de esta tomamos las
coordenadas (X, Y, Z) del TCP

CD=RCM.fkine(tra1);
figure(2);
view(65,22);

for i=1:1:length(t)
    axis([-0.5 0.5 -0.5 0.5 -0.5 0.2]);
    hold on;
    RCM.plot(tra1(i,:), 'workspace', [-0.5 0.5 -0.5 0.5 -0.5 0.2]);
end

%% REPRESENTACIÓN DE TRAYECTORIAS
% Con un bucle, se definen 20 trayectorias distintas. Para cada una de
ellas, los valores de las coordenadas (X, Y, Z) del TCP se van a
guardar en matrices para posteriormente representarlos

t=0:.04:2;
matrizposx = [];
matrizposy = [];
matrizposz = [];

```

```

for j=1:36
    ang=10*j;
    confi2=[deg2rad(ang),deg2rad(-50),H;
            deg2rad(ang),deg2rad(-130),H];
    tra2=jtraj(confi2(1,:),confi2(2,:),t);
    CD=RCM.fkine(tra2);
    for i=1:length(t)
        TCP_x = CD(1,4,i);
        matrizposx(j,i)=TCP_x;
        TCP_y = CD(2,4,i);
        matrizposy(j,i)=TCP_y;
        TCP_z = CD(3,4,i);
        matrizposz(j,i)=TCP_z;
    end
end

figure(3)
for k=1:36
    plot3(matrizposx(k,:), matrizposy(k,:),
matrizposz(k,:), '*', 'linewidth',3)
    hold on
end

axis([-1 1 -1 1 -0.5 0])
xlabel('X')
ylabel('Y')
zlabel('Z')
hold off

%% MATRICES DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEAS

% Los parámetros DH representan la transformación:
% T= trotx(theta)*transl([0,0,d])* transl([a,0,0])*trotx(alpha);

syms q1 q2 q3 H;

umbral=0.000001;

A01 = simplify(trotx(pi/2+q1)*trotx(pi/2));
A01sub = subs(A01, {sin(q1) cos(q1)}, {1 1});
A01(abs(A01sub)<umbral)=0;

A12 = simplify(trotx(pi/2+q2)*trotx(pi/2));
A12sub = subs(A12, {sin(q2) cos(q2)}, {1 1});
A12(abs(A12sub)<umbral)=0;

A23 = simplify(transl(0,0,q3-H));
A23sub = subs(A23, {q3 H}, {1 0.8});
A23(abs(A23sub)<umbral)=0;

```

```
% Matrices de transformación homogéneas
fprintf('Matrices de transformación homogéneas \n');
A01
A12
A23

% T03 Posición del TCP respecto SR0
fprintf('Posición del TCP respecto a SR0 \n');
T = simplify(A01*A12*A23)
Tsub = subs(T, {q1 q2 q3}, {0 0 0})
```

## Anexo 2

### MODELADO DE UN RCM BASADO EN PARALELOGRAMOS

Se recoge en este anexo el programa de Matlab (versión R2022a) creado para realizar la simulación de un centro de rotación remoto basado en paralelogramos. Se utiliza la librería *Robotics Toolbox* (versión 4.0) para crear el modelo con 4 articulaciones de rotación a partir de sus parámetros DH. Después, se presenta una simulación de un ejemplo de trayectoria y se recogen en una gráfica los posibles puntos accesibles por el TCP de la herramienta en dos casos diferentes.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELADO DE UN RCM BASADO EN PARALELOGRAMOS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear;
close all;
clc;

%% MODELADO DEL RCM

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parámetros DH
% Todas las articulaciones son de rotación
%=====
%      theta / d / a / alfa
%=====
% 1 / q1 / L1 / 0 / -pi/2
%-----
% 2 / q2 / 0 / L2 / 0
%-----
% 3 / q3-pi/2 / 0 / L3 / 0
%-----
% 4 / q4-pi/2 / 0 / L4 / 0
%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Metros
L1=80/100;
L2=70/100;
L3=50/100;
L4=140/100;

% Se crean los enlaces del robot con los parámetros correspondientes,
offset y se crea el objeto

L(1) = Link([0,L1,0,-pi/2,0], 'standard');
L(1).offset=0;
```

```

% Como L(1) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(2) = Link([0,0,L2,0,0], 'standard');
L(2).offset=0;
% Como L(2) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(3) = Link([0,0,L3,0,0], 'standard');
L(3).offset=-pi/2;
% Como L(3) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(4) = Link([0,0,L4,0,0], 'standard');
L(4).offset=-pi/2;
% Como L(4) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
RCM_pa = SerialLink(L);
RCM_pa.name='';

% Se configuran dos posiciones

configuracion=[0,0,0,0;
               deg2rad(-25),deg2rad(-30),0,0];

% Dibujamos el robot en la configuración(1)

figure(1)
view(120,30);
RCM_pa.plot(configuracion(1,:), 'workspace', [-2 2 -2 2 -2 2]);
pause(2);

%% CONSERVACIÓN DEL RCM
% Se mueve el robot desde configuracion(1) hasta configuración(2)

t=0:.04:2;
tra1=jtraj(configuracion(1,:),configuracion(2,:),t);

% Calculamos el MCD para obtener la MTH, y de esta tomamos las
% coordenadas (X, Y, Z) del TCP

CD=RCM_pa.fkine(tra1);
figure(2);
view(65,22);

% Modificamos tra1 de acuerdo con las restricciones

tra1modi=tra1;
tra1modi(:,3)=tra1(:,3)-tra1(:,2);
tra1modi(:,4)=tra1(:,4)+tra1(:,2);

for i=1:length(t)
    axis([-2 2 -2 2 -2 2]);
    hold on;
    RCM_pa.plot(tra1modi(i,:), 'workspace', [-2 2 -2 2 -2 3]);
end

```

## %% REPRESENTACIÓN DE TRAYECTORIAS 1

```
t=0:.04:2;
matrizposx = [];
matrizposy = [];
matrizposz = [];
angulos = linspace(-30,30,20);

for j=1:length(angulos)
    ang=angulos(j);
    confi2=[deg2rad(ang),deg2rad(20),0,0;
            deg2rad(ang),deg2rad(-20),0,0];
    tra2=jtraj(confi2(1,:),confi2(2,:),t);
    tra2modi=tra2;
    tra2modi(:,3)=tra2(:,3)-tra2(:,2);
    tra2modi(:,4)=tra2(:,4)+tra2(:,2);
    CD=RCM_pa.fkine(tra2modi);
    for i=1:length(t)
        TCP_x = CD(1,4,i);
        matrizposx(j,i)=TCP_x;
        TCP_y = CD(2,4,i);
        matrizposy(j,i)=TCP_y;
        TCP_z = CD(3,4,i);
        matrizposz(j,i)=TCP_z;
    end
end

figure(3)
for k=1:20
    plot3(matrizposz(k,:), matrizposy(k,:),
matrizposx(k,:), '*', 'linewidth', 3)
    hold on
end

xlabel('X')
ylabel('Y')
zlabel('Z')
hold off
```

## %% REPRESENTACIÓN DE TRAYECTORIAS 2

```
t=0:.04:2;
matrizposx = [];
matrizposy = [];
matrizposz = [];
angulos = linspace(-30,30,20);

for j=1:length(angulos)
    ang=angulos(j);
    confi2=[deg2rad(20),deg2rad(ang),0,0;
            deg2rad(-20),deg2rad(ang),0,0];
    tra2=jtraj(confi2(1,:),confi2(2,:),t);
    tra2modi=tra2;
```

```

tra2modi(:,3)=tra2(:,3)-tra2(:,2);
tra2modi(:,4)=tra2(:,4)+tra2(:,2);
CD=RCM_pa.fkine(tra2modi);
for i=1:1:length(t)
    TCP_x = CD(1,4,i);
    matrizposx(j,i)=TCP_x;
    TCP_y = CD(2,4,i);
    matrizposy(j,i)=TCP_y;
    TCP_z = CD(3,4,i);
    matrizposz(j,i)=TCP_z;
end
end

figure(4)

for k=1:20
    plot3(matrizposz(k,:), matrizposy(k,:),
matrizposx(k,:), '*', 'linewidth',3)
    hold on
end

xlabel('X')
ylabel('Y')
zlabel('Z')
hold off

% MATRICES DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEAS

% Los parámetros DH representan la transformación:
% T= trotx(theta)*transl([0,0,d])* transl([a,0,0])*trotx(alpha);

syms q1 q2 q3 q4 L1 L2 L3 L4;

umbral=0.000001;

A01 = simplify(trotx(q1)*transl([0,0,L1])*trotx(-pi/2));
A01sub = subs(A01, {sin(q1) cos(q1) L1}, {1 1 0.8});
A01(abs(A01sub)<umbral)=0;

A12 = simplify(trotx(q2)* transl([L2,0,0]));
A12sub = subs(A12, {sin(q2) cos(q2) L2}, {1 1 0.7});
A12(abs(A12sub)<umbral)=0;

A23 = simplify(trotx(q3-pi/2)* transl([L3,0,0]));
A23sub = subs(A23, {sin(q3) cos(q3) L3}, {1 1 0.5});
A23(abs(A23sub)<umbral)=0;

A34 = simplify(trotx(q4-pi/2)* transl([L4,0,0]));
A34sub = subs(A34, {sin(q4) cos(q4) L4}, {1 1 1.4});
A34(abs(A34sub)<umbral)=0;

```

```
% Matrices de transformación homogéneas
fprintf('Matrices de transformación homogéneas \n');
A01
A12
A23
A34

% T04 Posición del TCP respecto SR0
fprintf('Posición del TCP respecto a SR0 \n');
T=simplify(A01*A12*A23*A34)
fprintf('T en caso particular \n');
Tsub = subs(T, {q1 q2 q3 q4}, {0 0 0 0})
```

## Anexo 3

### MODELADO DE LA PARTE PASIVA DEL BRAZO DEL SISTEMA DA VINCI

Se recoge en este anexo el programa de Matlab (versión R2022a) desarrollado para realizar la simulación de la parte pasiva de uno de los brazos del sistema robótico da Vinci. Se utiliza la librería *Robotics Toolbox* (versión 4.0) para crear el modelo con 4 articulaciones (1 prismática y 3 de rotación) a partir de sus parámetros DH. Después, se presenta una simulación de un ejemplo de trayectoria para esta parte del sistema.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELADO DE LA PARTE PASIVA DA VINCI
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear;
close all;
clc;

%% MODELADO DEL BRAZO

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parámetros DH
% La articulación 1 es prismática, el resto son de
% rotación
%=====
%      theta / d / a / alfa
%=====
% 1 / pi/2 / d1 / 0 / 0
%-----
% 2 / q2 / H2+H3 / B1 / 0
%-----
% 3 / q3 / H4 / B2 / 0
%-----
% 4 / q4 / -H4-H5 / 0 / pi
%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Metros
B1=412/1000;
B2=362/1000;
H2=85.5/1000;
H3=163/1000;
H4=57.75/1000;
H5=87/1000;

% Se crean los enlaces del robot con los parámetros correspondientes,
% offset y se crea el objeto

L(1) = Link([pi/2,0,0,0,1], 'standard');
L(1).offset=0;
```

```

% Como L(1) es prismática, ponemos "1" al final del corchete
L(2) = Link([0,H2+H3,B1,0,0], 'standard');
L(2).offset=0;
% Como L(2) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(3) = Link([0,H4,B2,0,0], 'standard');
L(3).offset=0;
% Como L(3) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(4) = Link([0,-H4-H5,0,pi,0], 'standard');
L(4).offset=0;
% Como L(4) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete

RCM_dvpa = SerialLink(L);
RCM_dvpa.name='';

% Se configuran dos posiciones
configuracion=[0,0,0,0;
               0,deg2rad(30),deg2rad(-50),0];

% Dibujamos el robot en la configuración(1)
figure(1)
view(120,30);
RCM_dvpa.plot(configuracion(2,:), 'workspace', [-1 1 -0.5 1.5 0 1.5]);
pause(2);

%% TRAYECTORIA
% Se mueve el robot desde configuración(1) hasta
% configuración(2)
t=0:.04:2;
tra1=jtraj(configuracion(1,:),configuracion(2,:),t);

% Calculamos el MCD para obtener la MTH, y de esta tomamos las
% coordenadas (X, Y, Z) del TCP
CD=RCM_dvpa.fkine(tra1);
figure(2);
view(65,22);

for i=1:length(t)
    axis([-1 1 -0.5 1.5 0 1.5]);
    hold on;
    RCM_dvpa.plot(tra1(i,:), 'workspace', [-1 1 -0.5 1.5 0 1.5]);
end

%% MATRICES DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEAS

% Los parámetros DH representan la transformación:
% T= trotx(theta)*transl([0,0,d])* transl([a,0,0])*trotx(alpha);

syms d1 q2 q3 q4 B1 B2 H2 H3 H4 H5;

umbral=0.000001;

A01 = simplify(trotx(pi/2)*transl([0,0,d1]));
A01sub = subs(A01, {d1}, {1});

```

```

A01(abs(A01sub)<umbral)=0;
A12 = simplify(trotz(q2)*transl([0,0,H2+H3])*transl([B1,0,0]));
A12sub = subs(A12, {sin(q2) cos(q2) B1 H2 H3}, {1 1 4.12 0.855 1.63});
A12(abs(A12sub)<umbral)=0;

A23 = simplify(trotz(q3)*transl([0,0,H4])*transl([B2,0,0]));
A23sub = subs(A23, {sin(q3) cos(q3) B2 H4}, {1 1 3.62 0.5775});
A23(abs(A23sub)<umbral)=0;

A34 = simplify(trotz(q4)*transl([0,0,-H4-H5])*trotx(pi));
A34sub = subs(A34, {sin(q4) cos(q4) H4 H5}, {1 1 0.5775 0.87});
A34(abs(A34sub)<umbral)=0;

% Matrices de transformación homogéneas
fprintf('Matrices de transformación homogéneas \n');
A01
A12
A23
A34

% T04 Posición del TCP respecto SR0
fprintf('Posición del TCP respecto a SR0 \n');
T=simplify(A01*A12*A23*A34)
fprintf('T en caso particular \n');
Tsub = subs(T, {q1 q2 q3 q4}, {0 0 -pi/2 -pi/2})

```

## Anexo 4

### MODELADO DEL BRAZO COMPLETO (PARTE PASIVA Y ACTIVA) DEL SISTEMA DA VINCI

En este último anexo se incluye el programa de Matlab (versión R2022a) desarrollado para realizar la simulación completa (parte pasiva y parte activa) de uno de los brazos del sistema robótico da Vinci. Se utiliza la librería *Robotics Toolbox* (versión 4.0) para crear el modelo con 9 articulaciones (1 prismática y 3 de rotación, pertenecientes a la parte pasiva; otras 4 articulaciones de rotación, que se corresponden con la parte activa; y una articulación prismática perteneciente al mecanismo de control de la herramienta quirúrgica utilizada) a partir de sus parámetros DH. Después, se presenta una simulación de un ejemplo de trayectoria que podría seguir el sistema y se recogen en una gráfica los valores que van tomando las distintas articulaciones.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELADO DEL BRAZO COMPLETO DEL DA VINCI
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear;
close all;
clc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parámetros DH
% Primera y última articulación: prismáticas
% El resto de las articulaciones son de rotación
%=====
%          theta / d / a / alfa
%=====
% 1 / pi/2 / q1 / 0 / 0
%-----
% 2 / q2 / H1 / B1 / 0
%-----
% 3 / q3 / H2 / B2 / 0
%-----
% 4 / q4+pi/2 / -H2-H3 / 0 / pi/2
%-----
% 5 / q5+pi/2 / B3 / 0 / -pi/2
%-----
% 6 / q6 / 0 / H4 / 0
%-----
% 7 / q7-pi/2 / 0 / B4 / 0
%-----
% 8 / q8 / 0 / 0 / pi/2
%-----
% 9 / 0 / q9+H5 / 0 / 0
%-----
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

% Metros
B1=485/1000;
B2=535/1000;
B3=460/1000;
B4=320/1000;
H1=460/1000;
H2=145/1000;
H3=470/1000;
H4=250/1000;
H5=310/1000;

% Se crean los enlaces del robot con los parámetros correspondientes,
offset
% y se crea el objeto
L(1) = Link([pi/2,0,0,0,1], 'standard'); % unión prismática
L(1).offset=0;
% Como L(1) es prismática, ponemos "1" al final del corchete
L(2) = Link([0,H1,B1,0,0], 'standard');
L(2).offset=0;
% Como L(2) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(3) = Link([0,H2,B2,0,0], 'standard');
L(3).offset=0;
% Como L(3) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(4) = Link([0,-H2-H3,0,pi/2,0], 'standard');
L(4).offset=pi/2;
% Como L(4) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(5) = Link([0,B3,0,-pi/2,0], 'standard');
L(5).offset=pi/2;
% Como L(5) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(6) = Link([0,0,H4,0,0], 'standard');
L(6).offset=0;
% Como L(6) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(7) = Link([0,0,B4,0,0], 'standard');
L(7).offset=-pi/2;
% Como L(7) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(8) = Link([0,0,0,pi/2,0], 'standard');
L(8).offset=0;
% Como L(8) es rotacional, ponemos "0" al final del corchete
L(9) = Link([0,0,0,0,1], 'standard'); % unión prismática
L(9).offset=0;
% Como L(9) es prismática, ponemos "1" al final del corchete

DV = SerialLink(L);
DV.name='';

configuracion=[1.2,0,0,0,0,0,0,0,H5];

% Dibujamos el robot en la configuración(1)
figure(1)
% view(120,30);
view(65,22);
DV.plot(configuracion(1,:), 'workspace', [-1.5 1.5 -0.5 2.5 0 2])
pause(2);

```

```
%% CREACIÓN DE TRAYECTORIA
```

```
% Se configura una trayectoria en la que primero se mueva la parte pasiva y, una vez ajustada, el RCM haga varios movimientos. Después, todas las articulaciones vuelven a su posición inicial.
```

```
configuraciones=[1.2,0,0,0,0,0,0,0,H5;  
    1,deg2rad(35),deg2rad(-45),deg2rad(-25),0,0,0,0,H5;  
    1,deg2rad(35),deg2rad(-45),  
        deg2rad(-25),0,0,0,0,H5+0.3;  
    1,deg2rad(35),deg2rad(-45),deg2rad(-25),  
        deg2rad(-20),deg2rad(20),0,0,H5+0.3;  
    1,deg2rad(35),deg2rad(-45),  
        deg2rad(-25),deg2rad(0),  
        deg2rad(-25),0,0,H5+0.3];
```

```
% Representaciones para el informe
```

```
figure(2)  
view(65,22);  
DV.plot(configuraciones(1,:), 'workspace', [-1.5 1.5 -0.5 2.5 0 2])  
figure(3)  
view(65,22);  
DV.plot(configuraciones(2,:), 'workspace', [-1.5 1.5 -0.5 2.5 0 2])  
figure(4)  
view(65,22);  
DV.plot(configuraciones(3,:), 'workspace', [-1.5 1.5 -0.5 2.5 0 2])  
figure(5)  
view(65,22);  
DV.plot(configuraciones(4,:), 'workspace', [-1.5 1.5 -0.5 2.5 0 2])  
figure(6)  
view(65,22);  
DV.plot(configuraciones(5,:), 'workspace', [-1.5 1.5 -0.5 2.5 0 2])
```

```
t=0:.04:2;
```

```
% Movimiento 1: se coloca el brazo pasivo
```

```
tra1=jtraj(configuraciones(1,:),configuraciones(2,:),t);
```

```
% Movimiento 2: se introduce la herramienta
```

```
tra2=jtraj(configuraciones(2,:),configuraciones(3,:),t);
```

```
% Movimiento 3: se mueve el paralelogramo
```

```
tra3=jtraj(configuraciones(3,:),configuraciones(4,:),t);
```

```
% Modificaciones necesarias en tra3
```

```
tra3modi=tra3;
```

```
tra3modi(:,7)=tra3(:,7)-tra3(:,6);
```

```
tra3modi(:,8)=tra3(:,8)+tra3(:,6);
```

```

% Movimiento 4: otro movimiento del paralelogramo
tra4=jtraj(configuraciones(4,:),configuraciones(5,:),t);
% Modificaciones necesarias en tra4
tra4modi=tra4;
tra4modi(:,7)=tra4(:,7)-tra4(:,6);
tra4modi(:,8)=tra4(:,8)+tra4(:,6);

% Movimiento 5: se devuelve el paralelogramo a posición base
tra5=jtraj(configuraciones(5,:),configuraciones(3,:),t);
% Modificaciones necesarias en tra5
tra5modi=tra5;
tra5modi(:,7)=tra5(:,7)-tra5(:,6);
tra5modi(:,8)=tra5(:,8)+tra5(:,6);

% Movimiento 6: se saca la herramienta
tra6=jtraj(configuraciones(3,:),configuraciones(2,:),t);

% Movimiento 7: la parte pasiva vuelve a la posición base
tra7=jtraj(configuraciones(2,:),configuraciones(1,:),t);

% Se concatenan las trayectorias en vertical
tratotal = [tra1; tra2; tra3modi; tra4modi; tra5modi; tra6; tra7];

%% SIMULACIÓN DE TRAYECTORIA

CD=DV.fkine(tratotal);
figure(7);
view(65,22);

for i=1:1:(length(t)*7)
    axis([-1.5 1.5 -0.5 2.5 0 2]);
    hold on;
    DV.plot(tratotal(i,:), 'workspace', [-1.5 1.5 -0.5 2.5 0 2]);
end

%% GRÁFICAS TRAYECTORIA

% Evolución temporal de las variables articulares
{q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7,q8,q9}
t1=0:.04:2;
t2=2:.04:4;
t3=4:.04:6;
t4=6:.04:8;
t5=8:.04:10;
t6=10:.04:12;
t7=12:.04:14;
tiempo=[t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7];

```

```

figure(8)
subplot(4,1,1)
plot(tiempo,rad2deg(tratotal(:,1)))
title('Articulación q1')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel({'Posición'; '(metros)'})
subplot(4,1,2)
plot(tiempo,rad2deg(tratotal(:,2)))
title('Articulación q2')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel({'Posición'; '(grados)'})
subplot(4,1,3)
plot(tiempo,rad2deg(tratotal(:,3)))
title('Articulación q3')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel({'Posición'; '(grados)'})
subplot(4,1,4)
plot(tiempo,rad2deg(tratotal(:,4)))
title('Articulación q4')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel({'Posición'; '(grados)'})
sgtitle('Evolución temporal de las coordenadas articulares')

```

```

figure(9)
subplot(4,1,1)
plot(tiempo,rad2deg(tratotal(:,5)))
title('Articulación q5')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel({'Posición'; '(grados)'})
subplot(4,1,2)
plot(tiempo,rad2deg(tratotal(:,6)))
title('Articulación q6')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel({'Posición'; '(grados)'})
subplot(4,1,3)
plot(tiempo,rad2deg(tratotal(:,7)))
title('Articulación q7')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel({'Posición'; '(grados)'})
subplot(4,1,4)
plot(tiempo,rad2deg(tratotal(:,8)))
title('Articulación q8')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel({'Posición'; '(grados)'})

```

```

figure(10)
subplot(4,1,1)
plot(tiempo,rad2deg(tratotal(:,9)))
title('Articulación q9')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel({'Posición'; '(metros)'})

```

```
% MATRICES DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEAS
```

```
% Los parámetros DH representan la transformación:
```

```
% T= trotx(theta)*transl([0,0,d])* transl([a,0,0])*trotx(alpha);
```

```
syms q1 q2 q3 q4 q5 q6 q7 q8 q9 H1 H2 H3 H4 H5 B1 B2 B3 B4;
```

```
umbral=0.000001;
```

```
A01 = simplify(trotx(pi/2)*transl([0,0,q1]));
```

```
A01sub = subs(A01, {q1}, {1});
```

```
A01(abs(A01sub)<umbral)=0;
```

```
A12 = simplify(trotx(q2)*transl([0,0,H1])*transl([B1,0,0]));
```

```
A12sub = subs(A12, {sin(q2) cos(q2) B1 H1}, {1 1 4.12 1.63});
```

```
A12(abs(A12sub)<umbral)=0;
```

```
A23 = simplify(trotx(q3)*transl([0,0,H2])*transl([B2,0,0]));
```

```
A23sub = subs(A23, {sin(q3) cos(q3) B2 H2}, {1 1 0.5 0.5});
```

```
A23(abs(A23sub)<umbral)=0;
```

```
A34 = simplify(trotx(q4+pi/2)*transl([0,0,-H2-H3])*trotx(pi/2));
```

```
A34sub = subs(A34, {sin(q4) cos(q4) H2 H3}, {1 1 0.5 0.5});
```

```
A34(abs(A34sub)<umbral)=0;
```

```
A45 = simplify(trotx(q5+pi/2)*transl([0,0,B3])*trotx(-pi/2));
```

```
A45sub = subs(A45, {sin(q5) cos(q5) B3}, {1 1 0.5});
```

```
A45(abs(A45sub)<umbral)=0;
```

```
A56 = simplify(trotx(q6)*transl([H4,0,0]));
```

```
A56sub = subs(A56, {sin(q6) cos(q6) H4}, {1 1 0.5});
```

```
A56(abs(A56sub)<umbral)=0;
```

```
A67 = simplify(trotx(q7-pi/2)*transl([B4,0,0]));
```

```
A67sub = subs(A67, {sin(q7) cos(q7) B4}, {1 1 0.5});
```

```
A67(abs(A67sub)<umbral)=0;
```

```
A78 = simplify(trotx(q8)*trotx(pi/2));
```

```
A78sub = subs(A78, {sin(q8) cos(q8)}, {1 1});
```

```
A78(abs(A78sub)<umbral)=0;
```

```
A89 = simplify(transl([0,0,H5+q9]));
```

```
A89sub = subs(A89, {q9 H5}, {0.5 0.5});
```

```
A89(abs(A89sub)<umbral)=0;
```

```
% Matrices de transformación homogéneas
```

```
fprintf('Matrices de transformación homogéneas \n');
```

```
A01
```

```
A12
```

```
A23
```

```
A34
```

```
A45
```

```
A56
```

```
A67
```

A78  
A89

```
% T04 Posición del TCP respecto SR0  
fprintf('Posición del TCP respecto a SR0 \n');  
T=simplify(A01*A12*A23*A34*A45*A56*A67*A78*A89)  
fprintf('T en caso particular \n');  
Tsub = subs(T, {q1 q2 q3 q4 q5 q6 q7 q8 q9}, {0 0 0 0 0 0 0 0 0})
```

