



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA

Máster Interuniversitario en Ingeniería Biomédica

Simulación mediante un sistema LEGO del movimiento de un tumor con el ciclo respiratorio en el tratamiento de cáncer de pulmón

Alumna:

Elena Simarro Mondejar

Directores:

David Moratal Pérez

Centro de Biomateriales e Ingeniería tisular, Universitat Politècnica de València

Víctor González Pérez

Servicio de Radiofísica, Fundación Instituto Valenciano de Oncología

Darío Rubén Quiñones Colomer

Centro de Biomateriales e Ingeniería tisular, Universitat Politècnica de València

Valencia, Septiembre 2015

Quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado en la realización de este trabajo, compartiendo sus ideas conmigo y apoyándome cuando era necesario.

Contenido

Resumen.....	1
Objetivos	3
1. Introducción	5
1.1. Sistema respiratorio	5
1.1.1. Pulmón	6
1.1.2. Ciclo respiratorio.....	6
1.1.2.1. Ciclo histéresis.....	8
1.2. Cáncer de pulmón.....	9
1.2.1. Tipos.....	11
1.2.1.1. Clasificación por estadio.	11
a. Células no pequeñas.....	11
b. Células pequeñas o microcítico.....	12
1.2.2. Diagnóstico.....	12
1.2.2.1. Biopsia	13
1.2.2.2. Tomografía Axial Computarizada (TAC) y Resonancia Magnética Nuclear (RMN).....	13
1.2.2.3. Gammagrafía ósea	13
1.2.2.4. Tomografía por emisión de positrones (PET).....	14
1.2.3. Tratamientos.....	14
1.2.3.1. Cirugía.....	14
1.2.3.2. Radioterapia.....	15
1.2.3.3. Quimioterapia.....	16
2. Material y métodos	17
2.1. Material	17
2.1.1. LEGO MINDSTORMS EV3	17
2.1.2. Sensor MPU 9150	20
2.1. Métodos	21
2.1.1. Montaje prototipo	23
2.1.1.1. Movimiento eje vertical.....	23
2.1.1.2. Movimiento eje horizontal.....	28
2.1.2. Control prototipo	29
2.1.2.1. Control con software LEGO MINDSTORMS EV3 Home Edition	29
2.1.2.2. Control con Simulink	31

a.	Caracterización motores.....	32
b.	Bloques de control.....	35
3.	Resultados y discusión	39
3.1.	Movimiento real.....	39
3.2.	Movimiento reconstruido	40
3.3.	Análisis de la batería.....	45
4.	Conclusiones	47
5.	Líneas futuras	49
6.	Bibliografía.....	51

Resumen

Hoy en día, el cáncer es una de las principales causas de muerte por detrás de las enfermedades cardiovasculares. En concreto, el cáncer de pulmón es una de las principales causas de muerte de hombres y mujeres en España.

Para el tratamiento del cáncer de pulmón existen diferentes técnicas, destacando la radioterapia ya que es la menos invasiva para el paciente y con efectos secundarios mínimos. Antes de realizar una sesión de radioterapia se debe llevar a cabo una planificación de la misma, teniendo en cuenta la zona sobre la que se quiere radiar y minimizando la dosis de radiación en tejidos que no son de interés. En este punto se ha de tener en cuenta la respiración del paciente, ya que, debida a esta se producen movimientos en las estructuras a radiar.

Para recrear la respiración se ha propuesto un maniquí que simula el movimiento de un tumor con la respiración en el tratamiento del cáncer de pulmón haciendo uso del sistema LEGO MINDSTORMS EV3. El movimiento debe ser elíptico para simular el movimiento de un punto genérico del pulmón (realiza un ciclo de histéresis). LEGO MINDSTORMS EV3 permite el montaje con piezas de LEGO para crear estructuras y ofrece la posibilidad de añadirles movimiento utilizando motores.

Para el control del movimiento se ha utilizado Simulink, herramienta que nos permite realizar la corrección del movimiento haciendo uso de controladores PID. De esta manera, se puede definir la trayectoria deseada ya que permite controlar la posición entre los motores que participan en el movimiento y la velocidad de los mismos.

Objetivos

El cáncer de pulmón es una de las principales causas de muerte en hombres y mujeres en España. Es por ello que es muy interesante desde un punto de vista médico poder mejorar los tratamientos que reciben estos enfermos para poder prolongar su vida. Centrándonos en el tratamiento por radioterapia, este debe ser lo más preciso posible. Debido a la respiración se producen variaciones de posición en el tumor por lo que se debe de tener en cuenta a la hora de planificar el tratamiento.

El objetivo principal de este trabajo es simular, haciendo uso de la herramienta LEGO MINDSTORMS EV3, el movimiento de un tumor con el ciclo respiratorio para el tratamiento del cáncer de pulmón.

Aunque el sistema LEGO MINDSTORMS EV3 dispone de su propio software que permite la programación del dispositivo, otro objetivo de este trabajo es poder controlar y programar la herramienta haciendo uso de Simulink, ya que este ofrece mayor versatilidad.

1. Introducción

1.1. Sistema respiratorio

El sistema respiratorio es uno de los sistemas más importantes del cuerpo humano. Gracias a él, se realiza el intercambio gaseoso que permite la llegada de oxígeno a las células del cuerpo.

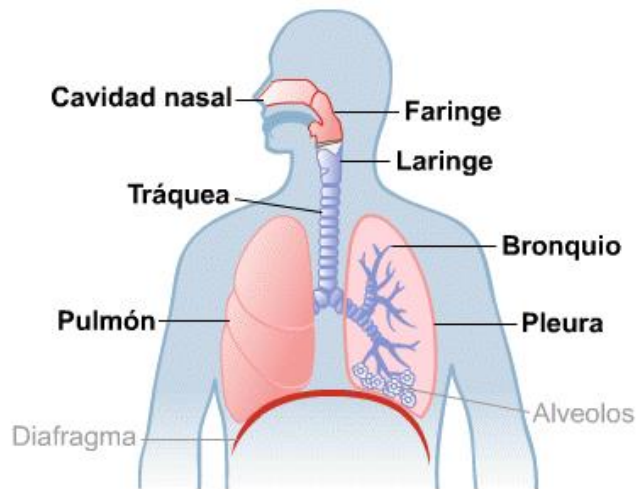


Figura 1. Sistema respiratorio [1]

El aire entra por las fosas nasales y, atravesando la faringe, llega a la laringe. Tras ella está la tráquea. La tráquea se divide en los bronquios principales que están formados por anillos cartilagosos. Estos bronquios principales entran en el pulmón y se dividen en su interior de manera sucesiva. Una primera división es en bronquios lobares (3 para el pulmón derecho y 2 para el izquierdo). Después se dividen en bronquios segmentarios o segmentos bronquiales, como se ve en la figura 2. Finalmente se ramifican en múltiples bronquiolos cuyo extremo final son los alveolos, lugar donde se realiza el intercambio gaseoso, es decir, captan oxígeno del exterior para incorporarlo a la sangre y eliminan el anhídrido carbónico.

La pleura es una membrana serosa, fina y lisa que recubre a los pulmones y el interior de la cavidad torácica. La que envuelve al pulmón es la pleura visceral y la que recubre la cavidad torácica pleura parietal. Existe un espacio entre ambas que desaparece en la inspiración.

El mediastino es el espacio medio situado entre los dos pulmones. Contiene al corazón, los grandes vasos sanguíneos, la tráquea, el esófago y ganglios linfáticos.

Por último, por debajo de los pulmones se encuentra el diafragma. El diafragma es un músculo que tiene un papel muy importante en la respiración ya

que disminuye el volumen de la cavidad torácica al inspirar y lo aumenta durante la espiración.

A continuación, se explicarán con más detalle los pulmones ya que es el punto importante de este trabajo.

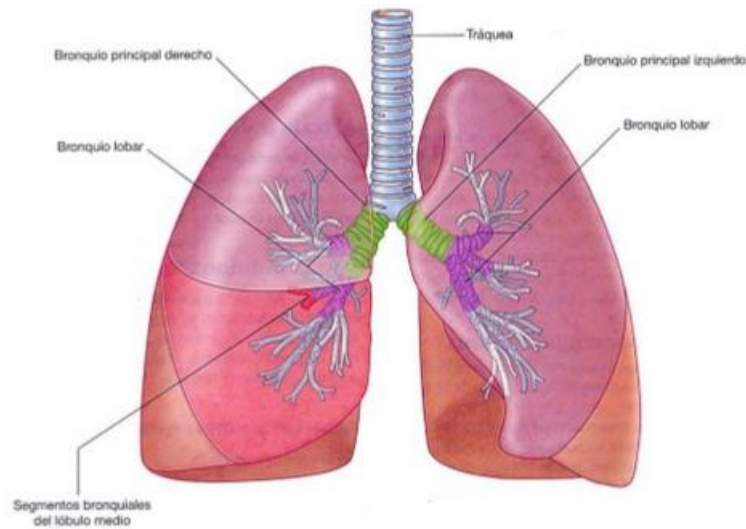


Figura 2. División bronquios [2]

1.1.1. Pulmón

Los pulmones son los órganos esenciales del aparato respiratorio. Son órganos de consistencia blanda, formados prácticamente por aire. Están separados por el mediastino. Las dimensiones medias del pulmón es de 25 cm de altura, diámetro antero posterior de 16 cm y el diámetro transversal de la base es de 10 cm para el derecho y 7 cm para el izquierdo [3]. El volumen del pulmón derecho siempre es mayor que el del izquierdo y variará según el peso y sexo.

El pulmón está formado por lóbulos, 3 en el caso del pulmón derecho y 2 para el izquierdo.

La mayoría de las células que forman el pulmón son células epiteliales. Estas recubren las vías respiratorias y son las encargadas de producir el moco que lubrica y protege las vías respiratorias. También tiene neuronas, células productoras de hormonas, células sanguíneas y células estructurales [3].

1.1.2. Ciclo respiratorio

Un ser humano adulto realiza 12-20 respiraciones por minuto, mientras que los niños tienen un ritmo respiratorio mayor [4]. El proceso respiratorio se divide en dos fases: inspiración y espiración. En la inspiración, el aire cargado de oxígeno entra por las fosas nasales y llega hasta los alveolos de los pulmones. En este

punto se realiza el intercambio gaseoso mencionado anteriormente. Durante la inspiración se consigue el mayor tamaño de los pulmones. En la espiración, el aire cargado de anhídrido carbónico es expulsado al exterior. En este caso los pulmones reducen su tamaño.

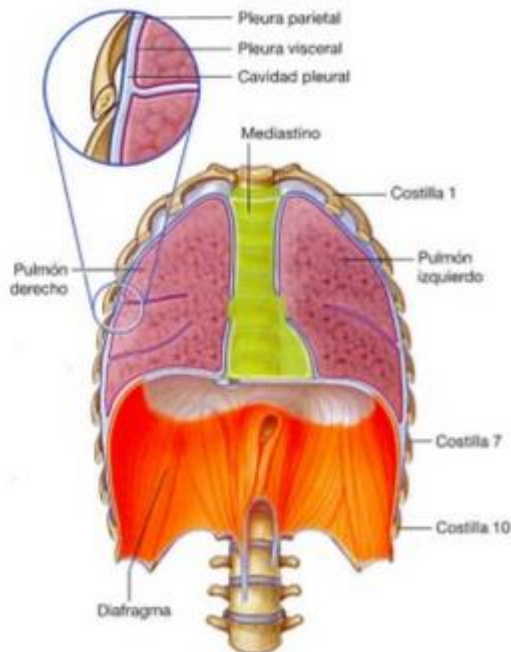


Figura 3. Vista cavidad torácica [2]

La contracción y expansión de los pulmones se puede realizar de dos maneras [5]:

- Mediante movimiento del diafragma (arriba y abajo)
- Mediante elevación y descenso de las costillas.

En la respiración tranquila normal prácticamente solo se realizan movimientos del diafragma. En la inspiración, la contracción del diafragma tira hacia abajo de los pulmones y durante la espiración, el músculo se relaja y el retroceso elástico de los pulmones, de la pared torácica y de las estructuras abdominales comprime los pulmones y expulsa el aire [5].

Durante la respiración forzada participan también los músculos abdominales, que empujan el contenido abdominal hacia arriba contra la parte inferior del diafragma, comprimiendo los pulmones.

En la figura 4 se detallan las posibilidades de movimiento de contracción y expansión pulmonar.

A lo largo del ciclo respiratorio, se puede apreciar que existe un movimiento en las estructuras que participan en él y las circundantes, lo cual puede ser muy importante en posibles tratamientos en los que se vea afectada la pared torácica.

1.1.2.1. Ciclo histéresis

La distensibilidad pulmonar es el volumen que se expanden los pulmones por cada aumento unitario de presión transpulmonar. En la figura 5 se muestra un diagrama de la distensibilidad de los pulmones que relaciona los cambios del volumen pulmonar con los cambios de la presión transpulmonar [5]. Se puede observar que la relación es diferente en la inspiración y la espiración. Dando lugar a un ciclo de histéresis (el camino a la ida es diferente que a la vuelta).

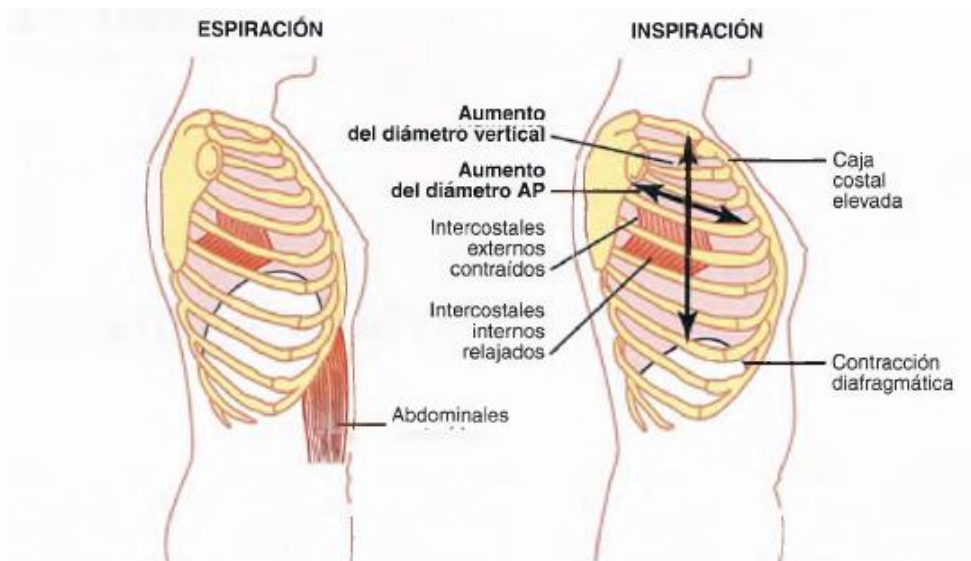


Figura 4. Movimientos en la respiración [5]

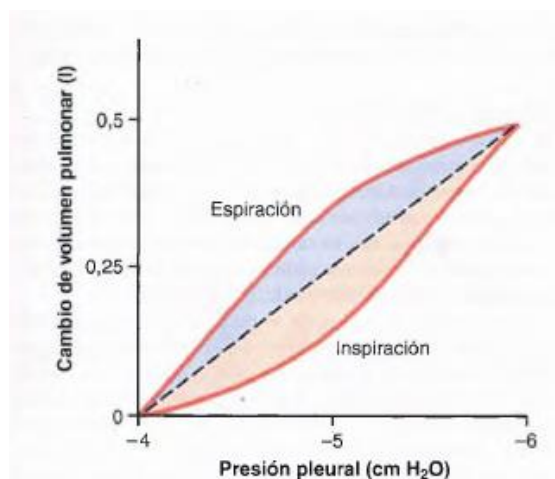


Figura 5. Diagrama de distensibilidad pulmonar [5]

Esta curva característica de la respiración pulmonar no solo se da en la variación de volumen. Como se ha comentado anteriormente, el pulmón se mueve a lo largo del ciclo respiratorio, por lo que las diferentes partes del pulmón se

mueven también. Si existen tumores pulmonares, los cuales se explicarán con más detalle en el punto siguiente, también se moverán y realizarán diferentes trayectorias en función del punto en el que se encuentre [6]. En la figura 6 puede verse la proyección ortogonal en los planos coronal y sagital de los movimientos de diferentes tumores ubicados en diferentes puntos del pulmón. El movimiento de un nódulo pulmonar realiza un ciclo de histéresis, asemejándose a una elipse [7]. Este es un punto muy importante en el desarrollo de este trabajo.

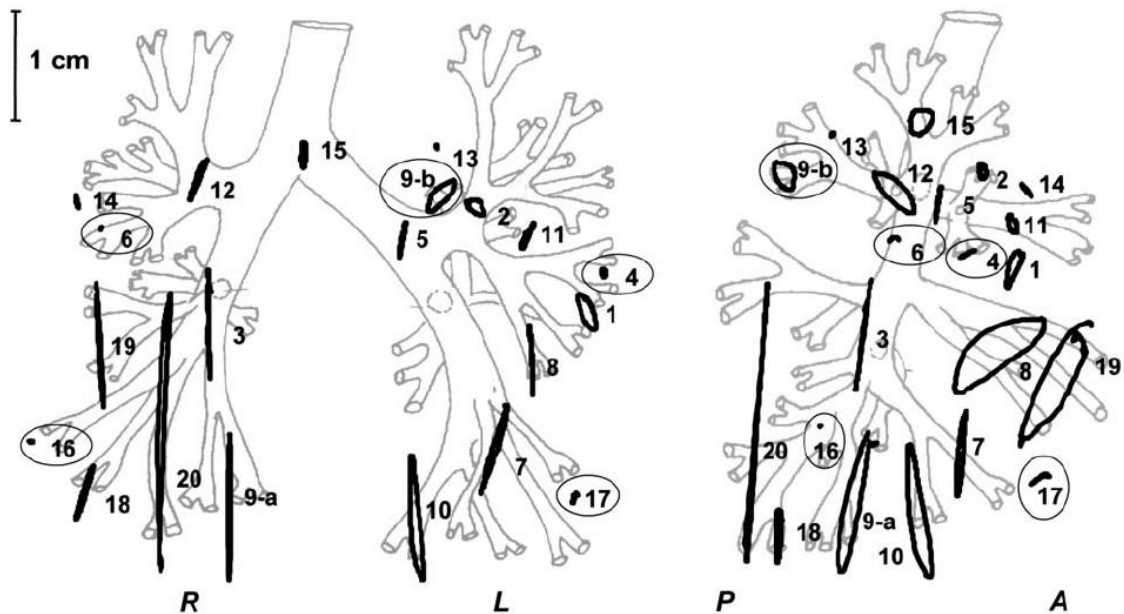


Figura 6. Proyección ortogonal planos coronal y sagital movimiento tumor [6]

1.2. Cáncer de pulmón

Un tumor es un crecimiento anómalo de células debido a mutaciones genéticas. Se dividen en dos tipos: benigno y maligno. En el caso de los tumores benignos, estos se encuentran localizados y no pueden extenderse a otros tejidos. El tratamiento en estos casos el procedimiento general es mediante cirugía y la vida del paciente no suele estar en peligro. Un tumor maligno es a lo que comúnmente denominamos cáncer. El cáncer es capaz de diseminarse a otros tejidos alejados (metástasis) además de destruir e invadir estructuras vecinas.

En la actualidad, el cáncer es una de las principales causas de muerte en el mundo, por detrás de los accidentes cardiovasculares. En 2012, se le atribuyen 8,2 millones de defunciones ocurridas en todo el mundo debido al cáncer [8].

En España, la incidencia de cáncer en 2012 era de 215534 casos y se estimaba que para 2015 este número aumentara. En la tabla 1 puede verse la incidencia de los 5 cánceres más frecuentes en España.

El número de muertes por cáncer en España en 2012 fue de 102764 casos de las cuales 21118 son atribuidas al cáncer de pulmón, siendo este la primera causa de muerte por cáncer en hombres (27,4%) y la cuarta en mujeres (9,4%) [3].

	Hombre	Mujer	Ambos Sexos
1º	Próstata	Mama	Colorrectal
2º	Pulmón	Colorrectal	Próstata
3º	Colorrectal	Cuerpo de Útero	Pulmón
4º	Vejiga	Pulmón	Mama
5º	Estomago	Ovario	Vejiga

Tabla 1. Datos incidencia cáncer más frecuente en España. Datos obtenidos de [3]

En el caso del cáncer del pulmón, la célula normal que se transforma en una célula tumoral se encuentra en el epitelio que cubre todo el árbol respiratorio, desde la tráquea hasta el último bronquiolo y las células de los alveolos pulmonares. [3]

Los factores de riesgo para desarrollar cáncer son:

- Tabaco: es el factor de riesgo más importante. El tabaco está compuesto por muchos elementos cancerígenos. El humo del tabaco afecta a las células de los pulmones, produciéndole crecimiento anormal.
- Asbesto: Son cristales que se crean en muchos tipos de roca y que a menudo se utilizan como aislante o material de construcción a prueba de incendios.
- Radón: Gas invisible e inodoro presente de forma natural en ciertos suelos y rocas. La exposición al radón se ha asociado con un aumento del riesgo de ciertos cánceres, incluido el cáncer de pulmón [8] [9].

En cuanto a los síntomas, suelen confundirse con una afección respiratoria común, es por ello que muchas veces su detección se produzca en una fase avanzada de la enfermedad. Entre estos síntomas destacan:

- Cansancio.
- Pérdida de apetito.
- Tos seca o con flema.
- Tos con sangre en el esputo (hemoptisis).
- Dificultad para respirar (disnea).
- Dolor.

La Fundación Instituto Valenciano de oncología (IVO) forma parte del proyecto internacional denominado IELCAP [10] el cual consiste en un cribado de cáncer de pulmón asintomático. Consiste en ver la existencia de nódulos muy pequeños antes de que presenten síntomas y poder abordarlo con tratamientos que aumenten las probabilidades de curación. El procedimiento consiste en la realización de un TAC de baja dosis de radiación de inicio y de seguimiento anual.

Este cribado está enfocado para personas a partir de 50 años, fumadoras o ex fumadoras durante al menos 15 años y que no padezcan ningún otro tipo de cáncer. Aunque el proyecto no está cerrado, se han obtenido resultados muy alentadores, ya que además de una alta participación, la curabilidad del cáncer de pulmón en estadio I es del 80 % y con el seguimiento anual se ha conseguido que el 80 % de los cánceres detectados estén en esta primera fase [11].

1.2.1. Tipos

En cuanto a los tipos de cáncer de pulmón, existen dos tipos principales: de células no pequeñas y de células pequeñas o microcítico [12].

1.2.1.1. Clasificación por estadio.

La determinación del estadio en cada uno de estos tipos es diferente [3]. La localización, el tamaño y si ha invadido otros órganos indicará el estadio del cáncer de pulmón.

a. Células no pequeñas

Este tipo de cáncer de pulmón es el más frecuente, alrededor del 80% de los casos. Se subdivide, a su vez, en tres tipos:

- Carcinoma escamoso o epidermoide: Es el más frecuente (el 40% de los carcinomas de células no pequeñas). Se localiza normalmente en la parte central de los pulmones, necrosándose en su interior con frecuencia, asemejándose a un absceso. Crece relativamente lento.
- Adenocarcinoma: Entre los carcinomas de células no pequeñas, aparece en el 30% de los casos. Aunque es más frecuente en personas fumadoras, es el menos relacionado con este hábito. Este tipo se localiza en las zonas circundantes de los pulmones, como son la pleura y la pared torácica, con mayor incidencia entre las mujeres. Cabe destacar que este tipo se ha vuelto muy interesante ya que, en ciertos casos, existe una mutación del receptor EGFR (factor de crecimiento de la célula normal) lo cual permite un tratamiento con fármacos con diana terapéutica con muy buenos resultados [13].

- Carcinoma de células grandes: En este caso las células son mayores, de ahí el nombre. Es el carcinoma menos frecuente, siendo solo el 10% de los casos totales de cáncer de pulmón.

La clasificación de este tipo por estadio es la siguiente [3]:

- Estadio I: Tienen un tamaño pequeño y están muy localizados, permitiendo así la extirpación quirúrgica. En este estadio no se ha producido aun diseminación a ningún ganglio u órgano.
- Estadio II: En este estadio, tiene las mismas características que en estadio I, pero sí que puede haber invadido los ganglios linfáticos, sin embargo, estos suelen formar parte de la zona circundante al pulmón y en la misma cirugía pueden ser eliminados sin problemas.
- Estadio III: En este caso puede ser difícil o imposible la extirpación quirúrgica. El cáncer puede haber invadido los ganglios linfáticos del tórax, fuera del pulmón. También puede haber invadido estructuras cercanas, como vasos, corazón, etc.
- Estadio IV: en este caso, se ha diseminado por el pulmón o lugares más alejados a través del torrente sanguíneo (con frecuencia al cerebro, huesos, hígado y glándulas suprarrenales).

b. Células pequeñas o microcítico

En este caso, las células cancerosas que lo componen son muy pequeñas. Este tipo, al igual que carcinoma epidermoide se localiza en la zona central de los pulmones pudiendo llegar a comprimir vasos y órganos cercanos. Son muy agresivos y crecen muy rápido. Representan el 20 % restante de los casos.

Cuando se detecta un cáncer de pulmón de células pequeñas, en la mayoría de los casos ya se ha diseminado a otras estructuras, por lo que a muy pocos se les realiza cirugía y quimioterapia. En función de cual sea el estadio se puede utilizar radioterapia.

- Estadio limitado: Este caso permite tratamiento radiológico, ya que el cáncer suele estar localizado en un lado del tórax, afectando a una única zona del pulmón y sus ganglios cercanos. El 40% de los casos estaría en esta fase.
- Estadio extendido: en este caso no se puede utilizar radioterapia, ya que está muy diseminado. El 60% de los pacientes se encuentra en este estadio y solo se pueden tratar con quimioterapia.

1.2.2. Diagnóstico

El diagnóstico del cáncer de pulmón se realiza mediante la utilización de diversas pruebas diagnósticas. Lo primero de todo es realizar un análisis físico del

paciente, realizando una analítica general y una radiografía de tórax. Si en dicha radiografía destaca algo, a continuación se realizan otro tipo de pruebas más específicas.

1.2.2.1. Biopsia

Este tipo de prueba permite obtener una pequeña parte del tejido para que un patólogo lo analice al microscopio para determinar si hay células cancerosas y el tipo de cáncer ante el que estamos (células pequeñas o no pequeñas). Para obtener esa muestra puede realizarse de manera menos invasiva, como simplemente con una muestra de esputo, o de maneras más invasivas, como una broncoscopia, punción torácica, y en los casos que sea necesario, realizando una cirugía.

1.2.2.2. Tomografía Axial Computarizada (TAC) y Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

Solo la biopsia puede diagnosticar el cáncer de pulmón, pero las pruebas radiológicas son muy importantes para poder determinar su ubicación y a que puntos se ha extendido. Mediante el uso de técnicas de imagen medica como el TAC y la resonancia magnética, se puede determinar el tamaño del tumor y obtener su localización exacta o su diseminación a otros tejidos.



Figura 7. Corte transversal de una imagen de TAC de un carcinoma pulmonar del lóbulo superior derecho [14]

1.2.2.3. Gammagrafía ósea

En este tipo de prueba se utiliza un marcador radiactivo que se concentra en el hueso, por lo que es muy útil para determinar si existe metástasis ósea.

1.2.2.4. Tomografía por emisión de positrones (PET)

En este caso, se inyectan moléculas de glucosa radiactiva en el cuerpo. Dicha glucosa es absorbida con mayor rapidez por las células cancerosas y se puede ver la localización de las mismas a través de una imagen PET. Aunque esta prueba es muy fiable, no siempre que haya una zona que capte absorción de glucosa significara que existe algo maligno.

1.2.3. Tratamientos

Como se ha visto anteriormente, en función del estadio y del tipo de cáncer de pulmón ante el que estemos, se realizará un tratamiento u otro. En líneas generales, destacan 3 tratamientos principales: cirugía, radioterapia y quimioterapia [12].

1.2.3.1. Cirugía

En el tratamiento del cáncer de pulmón, la opción principalmente curativa es la cirugía. Esta debe ser llevada a cabo por un cirujano torácico y se basa en la extirpación del cáncer en los casos en los que sea posible. Existen tres tipos de intervención:

- Segmentectomía: solo se extrae el tumor y las partes circundantes del pulmón. Se realiza en casos en los que el paciente tiene afectada su capacidad respiratoria y no se puede realizar una cirugía mayor, o si el tamaño del tumor es pequeño.
- Lobectomía: en este caso se extirpa todo el lóbulo donde está el tumor.
- Neumonectomía: se extirpa el pulmón completo.

Estos tipos de cirugía se puede complementar, en los casos en que sea necesario, con una linfadenectomía mediastínica, es decir, una intervención quirúrgica en la que se extirpan los ganglios linfáticos situados entre los pulmones (en el mediastino).

Aunque este tipo de intervención facilita mucho la curación de la enfermedad, tiene unos efectos secundarios:

- Posibilidad de pérdida de capacidad respiratoria.
- Dolor y debilidad tanto en el tórax como en el brazo.
- Postoperatorio lento: dificultad para moverse y respirar en los primeros días, y recuperación de fuerzas y energía en varias semanas o meses.

1.2.3.2. Radioterapia

La radioterapia se basa en el empleo de radiaciones ionizantes de alta energía para eliminar las células cancerosas y detener su crecimiento en el lugar donde se aplica. Suele emplearse como terapia local, es decir, en la zona donde se encuentra localizado el tumor, pero puede también emplearse como terapia locorregional, cuando también se radian los ganglios cercanos al tumor.

Puede ser complementario a la cirugía o como tratamiento principal en el caso de que no se pudiera realizar.

Normalmente se aplica radioterapia externa, se irradia desde el exterior mediante equipos generadores de radiación, llamado acelerador lineal (Fig. 8), sin tocar en ningún momento al paciente.

Este tipo de tratamiento es realizado por especialistas en oncología radioterápica y, aunque la duración de la sesión puede cambiar de un paciente a otro, suele ser de unos 15 minutos aproximadamente.

Un punto muy importante en este tipo de tratamiento es la planificación del mismo. En ella se calcula la dosis de radiación que recibirá la zona del tumor, aumentando la eficacia del mismo y disminuyendo la radiación en las zonas circundantes. También en este punto se tendrá en cuenta la respiración del paciente, para corregir en la medida que sea posible, el movimiento que tendrá dicho tumor. Este trabajo se centra en este aspecto.

También para la planificación serán necesarias imágenes obtenidas mediante TAC con la posición del paciente durante la radiación. El paciente deberá estar en la misma posición en todas las sesiones, por ello se pueden utilizar marcas en la piel o diferentes sujeciones, que permitan al personal sanitario situar al paciente ubicado de la misma manera durante todo el tratamiento.



Figura 8. Acelerador lineal del IVO [11]

La dosis debe ser mínima para evitar efectos secundarios graves, por lo que las sesiones se realizan diariamente, durante 5 días a la semana, y con una duración total de 3 a 6 semanas.

En cuanto a los efectos secundarios, destacan:

- Astenia.
- Reacciones en la piel (es poco frecuente con las técnicas actuales, pero la zona irradiada puede irritarse).
- Dificultad para tragar (la radiación puede alterar la mucosa del esófago).
- Dificultad respiratoria.

1.2.3.3. Quimioterapia

El objetivo de este tratamiento es destruir las células tumorales para reducir la enfermedad, mediante el uso de una amplia variedad de fármacos. Estos tipos de fármacos se denominan antineoplásicos o quimioterápicos.

La quimioterapia se puede utilizar con dos finalidades: curativa y paliativa. En el caso de la finalidad curativa, el objetivo es, como su propio nombre indica, curar la enfermedad. La finalidad paliativa, por el contrario, solo pretende controlar los síntomas producidos, es decir, mejorar la calidad de vida del paciente y aumentar la supervivencia si es posible.

Si se administra como único tratamiento, o antes de cualquier otro (radioterapia o cirugía), se denomina quimioterapia de inducción o neoadyuvante, con el objetivo de reducir el tamaño del tumor. Si se administra junto a la radioterapia, se denomina quimioterapia concomitante, y mejora la eficacia de la primera. Si se realiza de manera complementaria a la cirugía, se llama quimioterapia adyuvante, previniendo la recaída.

El tratamiento se realiza normalmente por vía intravenosa, alternando periodos de tratamiento con periodos de descanso. Los periodos de tratamiento pueden durar varios días, con unas 3 semanas de descanso entre ellos.

Como es bastante conocido, la quimioterapia tiene efectos secundarios mientras dura el tratamiento:

- Alteraciones digestivas: náuseas, vómitos, diarrea, alteración sabor alimentos, llagas, etc.
- Alteraciones medula ósea: descenso glóbulos rojos (anemia), descenso leucocitos, descenso plaquetas.
- Alopecia.
- Neurotoxicidad.

2. Material y métodos

2.1. Material

2.1.1. LEGO MINDSTORMS EV3

En los últimos años, han aparecido muchas opciones en el mercado para poder construir pequeños robots en casa y programarlos fácilmente. Algunos ejemplos son: Raspberry PI, Arduino, LEGO MINDSTORMS, etc.

Este tipo de productos se pueden aplicar también en el campo de la medicina simulando determinados movimientos fisiológicos gracias a su facilidad de uso y su bajo precio. En este trabajo se ha hecho uso de la herramienta LEGO MINDSTORMS EV3 para la construcción de un maniquí que simule el movimiento de un tumor pulmonar con la respiración.

LEGO MINDSTORMS es una línea de productos de la empresa de juguetes LEGO® enfocada en la construcción de robots mediante la unión de piezas y la programación.

El proyecto empieza en 1986 como una colaboración entre LEGO Educational y el MIT, pero hasta 1998 no sale a la venta el primer kit. Este primer kit era la versión RCX. A partir de este punto se crearon las primeras LEGO *League*, que promueven la ciencia y la tecnología a los jóvenes. La segunda generación de LEGO MINDSTORMS es la versión NXT, que salió a la luz en 2006 con nuevas características. Finalmente, en 2013 apareció la tercera generación, denominada LEGO MINDSTORMS EV3, con un bloque de control más inteligente y nuevos sensores entre otras mejoras [15]. En la Tabla 2 aparece una comparativa de las diferentes versiones.

A continuación, se va a ver con más detalle las características de la versión EV3.

Existen dos versiones: *home* y *educational*. La diferencia entre ellas es el número de piezas y sensores que vienen en el kit. En este trabajo se ha utilizado la versión *home*.

El bloque EV3 es el encargado del control. Dispone de 4 puertos de entrada (etiquetados con números del 1 al 4) para los sensores y otros 4 puertos de salida (etiquetados con letras de la A a la D) para conectar los motores. Se conectan haciendo uso de cables con conectores RJ-12. También dispone de un conector miniusb para la conexión al ordenador (etiquetado como PC), una ranura para SD y un conector usb. En cuanto a la conectividad, permite conexión por cable mediante cable usb, y conexión inalámbrica mediante bluetooth y WiFi. Para utilizar la conexión WiFi es necesario un adaptador externo (no incluido en el kit). En este trabajo, se ha utilizado el adaptador WiFi Netgear N150 W1100. En cuanto a la alimentación en el bloque indica 6 pilas AA de 1.5V, es decir, 9V. Está disponible

una batería de litio de venta separada al kit. Durante este proyecto, se han utilizado 6 pilas recargables Duracel AA de NiMH de 1300mAh de 1.2V. Más adelante se volverá a retomar este tema de la batería. Mediante la pantalla y los botones de la parte frontal, se puede navegar por los menús del bloque y elegir el programa a ejecutar.

	RCX	NXT	EV3
Procesador	Hitachi H6/3292 10 – 16 MHz, 16 KB-ROM, 32 KB-RAM	Atmel 32-Bit - ARM7 48 MHz, 256KB flash, 64 KB RAM.	ARM 9 300 MHz, 16 MB – flash, 64 MB RAM
Sistema operativo	Propietario	Propietario	Abierto (basado en Linux)
Puertos	3 puertos para motores 3 puertos para sensores	3 puertos para motores 4 puertos para sensores	4 puertos para motores 4 puertos para sensores
Comunicación	Puerto IR en el frente del brick utilizado para comunicación con el equipo de cómputo y con otro RCX	USB 12 Mbps Bluetooth	Bluetooth v2.1 Wi-Fi mediante el puerto USB
Almacenamiento extra	N/A	N/A	Ranura Micro SD
Comunicación con dispositivos móviles inteligentes	N/A	Android	Android / iOS
Pantalla	LCD	LCD monocromática, 100 x 64 pixeles	LCD monocromática, 178 x 128 pixeles
Otras características.	-	Co-procesador Atmel 8-Bit AVR 8MHz, 4KB flash, 512 Byte RAM.	Auto-detección de dispositivos conectados al robot EV3. Control remoto (IR). Hilos de procesos. Compatible con los motores y sensores del robot NXT 2.0

Tabla 2. Comparativa versiones LEGO MINDSTORMS [16]



Figura 9: Bloque EV3 [17]

El kit también incluye dos motores grandes y un motor mediano. Ambos motores producen un movimiento circular. El motor grande produce el movimiento haciendo girar la parte roja (ver fig. 11) y el motor mediano también produce el

movimiento de rotación en el punto central rojo que se ve en la figura 11. El movimiento se puede obtener colocando una barra en este punto que nos sirva de eje de rotación. Ambos disponen de un sensor de rotación (*encoder*). El Motor grande funciona a 160–170 rpm, con un par de rotación de 20 N·cm y un par de rotor bloqueado de 40 N·cm. El Motor mediano funciona a 240–250 rpm, con un par de rotación de 8 N·cm y un par de rotor bloqueado de 12 N·cm. El grande es más lento que el mediano pero más potente. [17].



Figura 10: Adaptador WiFi Netgear [18]



Figura 11. Motor grande (izquierda) y motor mediano (derecha) [17]

El kit también incluye una serie de sensores:

- Sensor de color.
- Sensor táctil.
- Sensor de infrarrojos.

Para finalizar el kit, se incluyen diferentes piezas de LEGO Technic. En la figura 12 puede verse el kit completo.

Hasta aquí se ha visto la parte hardware del sistema. La herramienta también dispone de una herramienta software. Existen dos versiones de la herramienta, una para la versión *home* y otra para la *educational* (de pago). Se ha utilizado la versión gratuita (*home*). Este software es muy intuitivo y permite una programación sencilla por bloques secuenciales [19]. La primera pantalla que aparece cuando se inicia el programa (figura 13) proporciona la opción de construir entre 5 robots predefinidos y realizar la programación del mismo. Por otro lado, también se puede abrir un proyecto nuevo y que sea el propio usuario el que elija los bloques a utilizar (figura 14).

Además de permitir la programación con el software de LEGO, existen librerías que permiten la programación y conexión del kit LEGO MINDSTORMS

EV3 a otras herramientas. El sistema también puede conectarse y programarse con Matlab y su herramienta Simulink [20]. Este es uno de los objetivos del trabajo: controlar el movimiento haciendo uso de Simulink.



Figura 12. Kit LEGO MINDSTORMS EV3 [17]

2.1.2. Sensor MPU 9150

Para intentar obtener más información del movimiento final, se ha utilizado el sensor MPU 9150 de InvenSense® [21]. Es un sensor de movimiento compuesto por acelerómetro, giroscopio y magnetómetro con 9 grados de libertad. Sus características más importantes aparecen en la tabla 3.

Toda la implementación del sensor (independiente al montaje con LEGO) ha sido realizada en un Trabajo Final de Grado externo a este [22].

Rango Escala Gyro (m/s)	Ruido Gyro	Rango escala Acce/ (G)	Voltaje lógico	Voltaje funcionamiento
± 250	0.005	± 2	1.8 V ± 5% o VDD	2.4 V a 3.46V
± 500		± 4		
± 1000		± 8		
± 2000		± 16		

Tabla 3. Características Sensor MPU 9150

2.1. Métodos

El punto de partida de este proyecto es continuar el trabajo realizado en el Servicio de Radiología de la Fundación Instituto Valenciano de Oncología de Valencia. Dicho trabajo consistía en la construcción de un primer prototipo (ver fig.15) utilizando el sistema LEGO MINDSTORMS EV3 cuya programación se basaba únicamente en la proporcionada por el software oficial de LEGO.

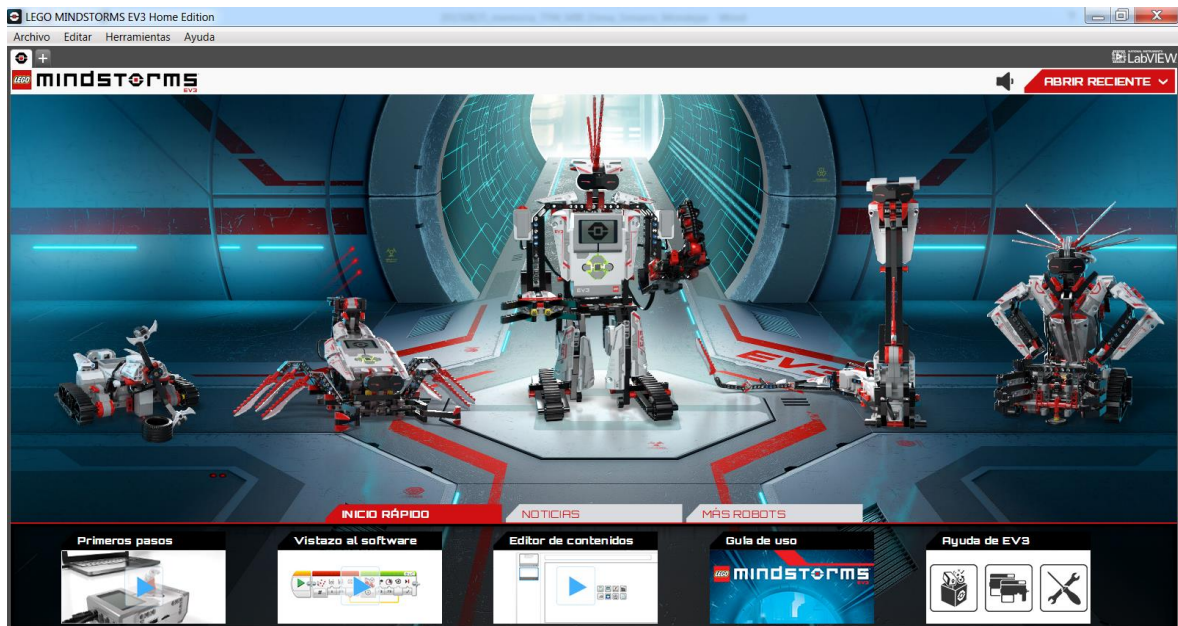


Figura 13. Primera pantalla software LEGO MINDSTORMS EV3 Home Edition

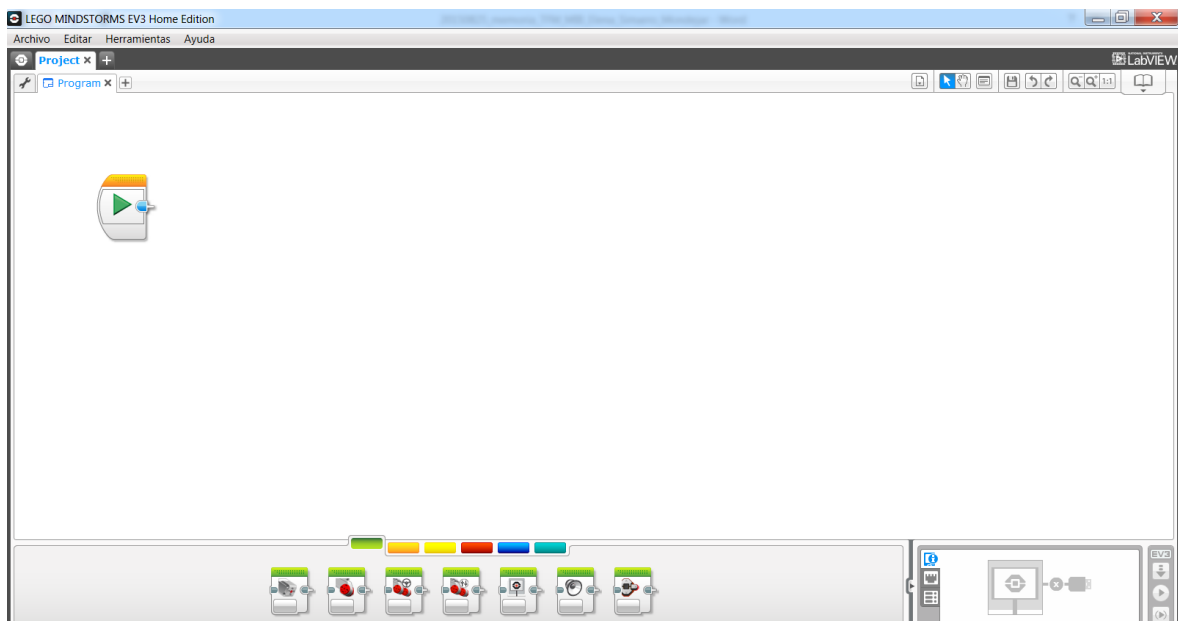


Figura 14. Pantalla software LEGO MINDSTORMS EV3 Home Edition para programación libre

Este primer prototipo recreaba el movimiento de un tumor con el ciclo respiratorio, realizando un movimiento elíptico (para simular el ciclo de histéresis comentado anteriormente). Las limitaciones aparecían en el movimiento permitido a los motores que intervienen en el mismo: el motor superior realiza el movimiento horizontal realizando giros completos y el motor inferior se encarga del movimiento vertical pero solo tiene la posibilidad de girar un cuarto de vuelta (cambiando de sentido al llegar al final del recorrido).

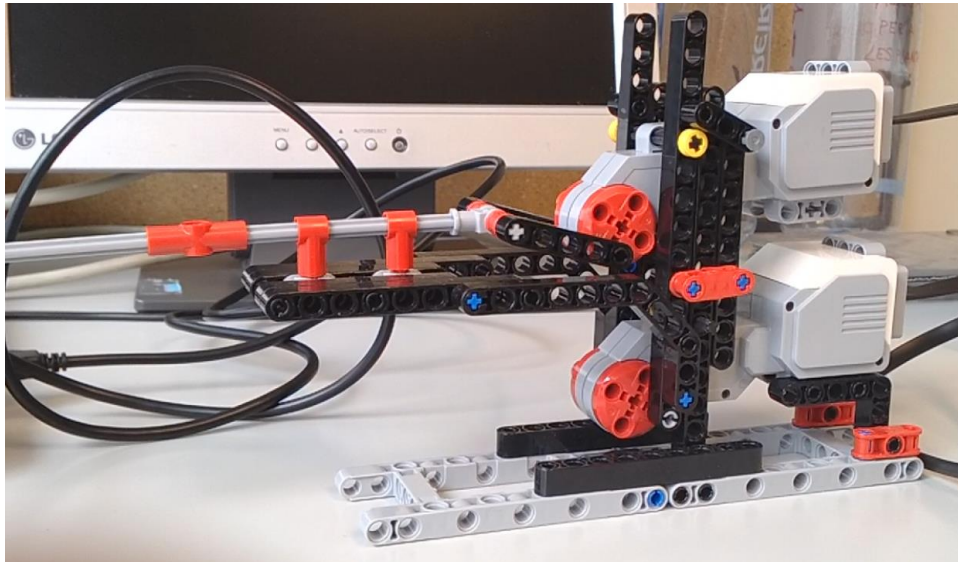


Figura 15. Prototipo creado en el IVO

Esto podría ser problemático en función de la posición donde se detuviese en la ejecución anterior, ya que podría empezar en una posición que no le permitiera dicho movimiento debido a las uniones de los dos motores mediante las piezas verticales (ver fig. 16). Además, sobre este prototipo no se realizaba ningún tipo de control realimentado por lo que no se podía corregir el movimiento en el caso que fuera necesario.



Figura 16. Detalle fijación entre motores prototipo IVO.

2.1.1. Montaje prototipo

Para la construcción del nuevo prototipo se ha querido evitar la limitación en los ángulos de giro de los motores, para dar la mayor libertad de movimiento al motor y no tener esa dependencia con la posición de parada.

Para recrear el movimiento del tumor con una trayectoria elíptica (teniendo en cuenta el ciclo de histéresis del movimiento del tumor con la respiración) necesitamos tener movimiento en dos direcciones. Consultando diferentes opciones de montaje de mecanismos con piezas de LEGO [23] se ha diseñado el prototipo mostrado en la figura 17. Está compuesto por dos motores: el motor grande se utiliza para realizar el movimiento en la componente vertical y el motor mediano para realizar el movimiento horizontal. El motor mediano se ubica encima del motor grande, ya que el primero tiene menor peso.

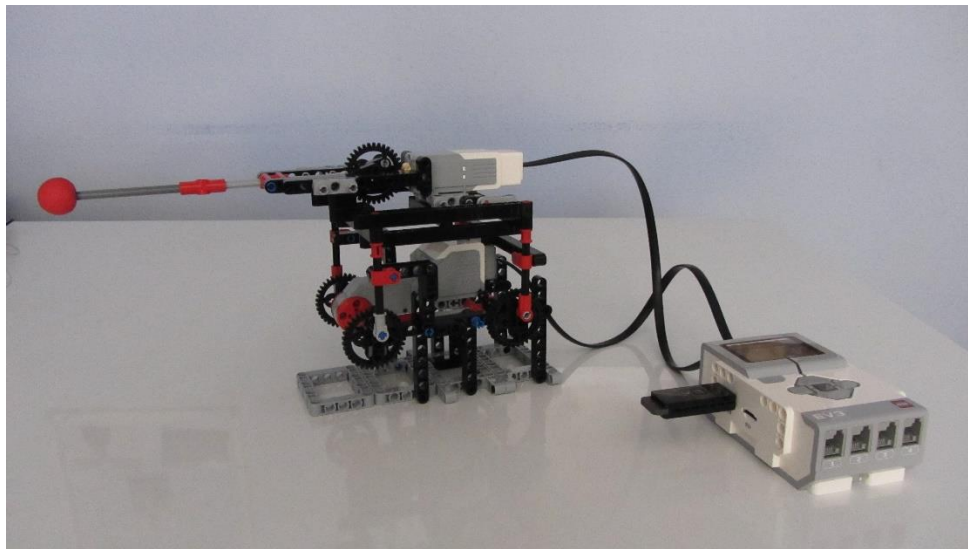


Figura 17. Prototipo diseñado

El maniquí mide 13 cm de ancho, de largo varía entre 27,4 y 29 cm y de alto mide entre 15,4 y 17 cm. Puede apreciarse que tenemos una variación de movimiento en el plano vertical y en plano horizontal de 1,6 cm, la cual podría ser la variación de posición con la respiración de un tumor en un punto genérico del pulmón. La esfera de plastilina que simula el tumor mide aproximadamente 2 cm de diámetro. El montaje pesa aproximadamente 625 gramos (incluyendo el bloque EV3 con las pilas puestas). El movimiento obtenido se sitúa en el extremo del montaje, donde está la pequeña bola roja de plastilina que simula el tumor. Se pueden ver diferentes fotos del montaje en las figuras 17 a 21.

2.1.1.1. Movimiento eje vertical

Como se ha comentado anteriormente, el motor grande, al ser el motor más pesado y con mayor potencia, se ha situado en la parte inferior. Al estar en la parte de abajo del montaje debe ser el encargado de realizar el movimiento en el eje

vertical. Se debe transformar el movimiento circular que producen los motores, a un movimiento vertical lineal que suba y baje al motor superior, en este caso eleva una plataforma sobre la que descansa el motor mediano.

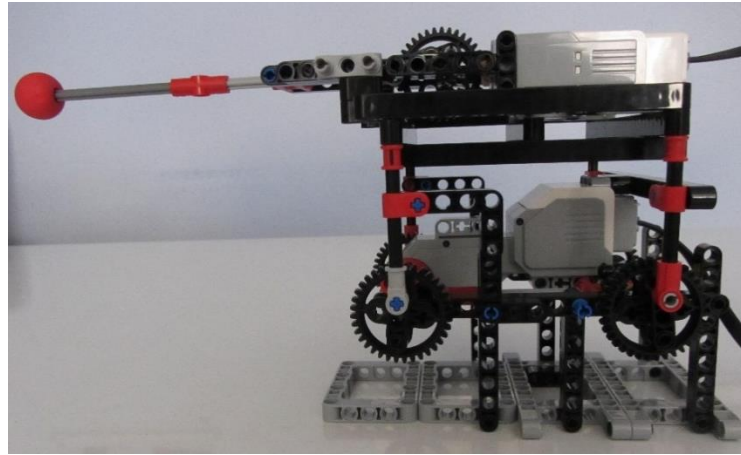


Figura 18. Vista de perfil del montaje.

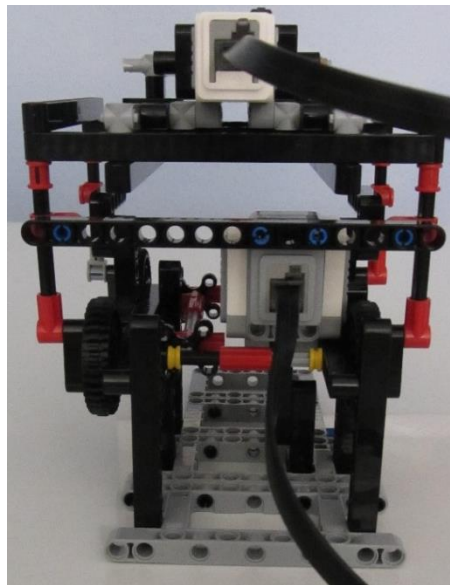


Figura 19. Vista alzado posterior del montaje.

Para la transmisión de este movimiento se han utilizado diferentes piezas de LEGO:

- 4 ruedas dentadas de 36 dientes con 1,8 cm de radio y 4 puntos de agarre (figura 22 (a)).
- 4 engranajes de bolas deslizantes (figura 22 (c)).
- Varias barras en cruz para transmisión de movimientos varios (figura 22 (f)).

- Diversos elementos de unión entre piezas (figura 22 (e)).
- 4 barras con 3 huecos (figura 22 (d)).

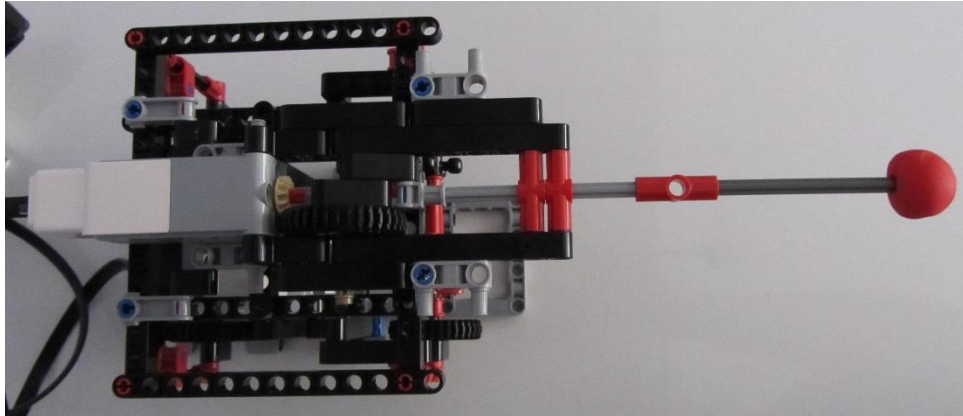


Figura 20. Vista de la planta del montaje.

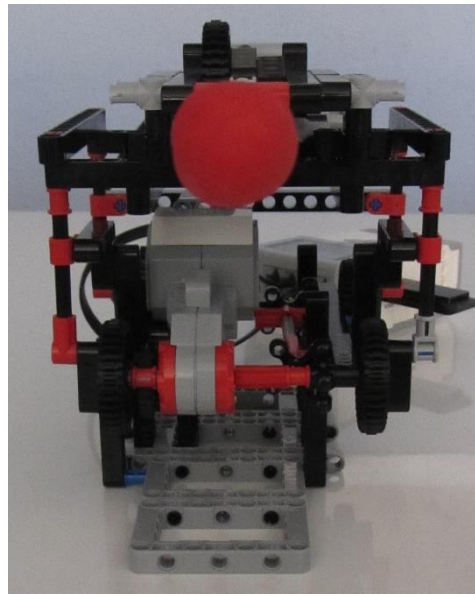


Figura 21. Vista de alzado frontal del montaje.



Figura 22. Ejemplos piezas LEGO: rueda dentada (a), engranaje 12 dientes (b), engranaje de bola (c), barra 3 huecos (d), pieza unión (e), barra en cruz (f).

El eje de rotación del motor se encuentra unido solidariamente a dos de las ruedas dentadas (ver figura 23) que, a través de bielas, transmiten el movimiento en el plano vertical (ver figura 24). Con esto se consiguen dos puntos de apoyo para la plataforma superior.

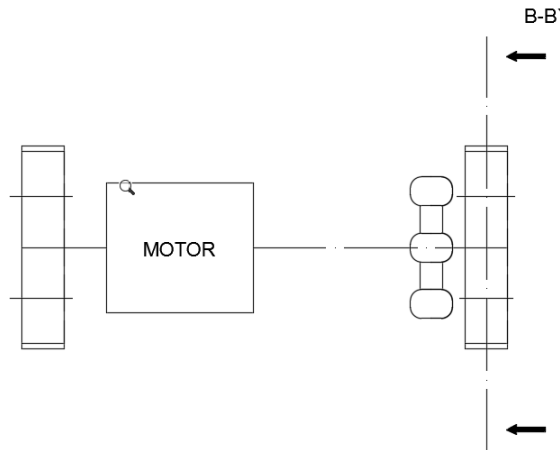


Figura 23. Esquema transmisión motor-rueda dentada. La vista B-B' corresponde con la figura 24.

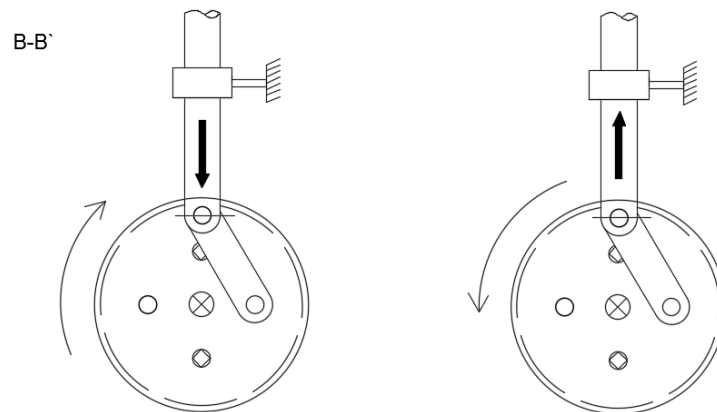


Figura 24. Esquema funcionamiento bielas

Para reforzar la estructura, se trasmite el movimiento de la parte delantera a la trasera. Para ello, a través de un mecanismo compuesto por engranajes de bolas basado en el esquema de la figura 25, el movimiento de rotación llega a la parte posterior y hace girar otra de las ruedas dentadas en sentido contrario. Para conseguir el cuarto punto de apoyo y darle mayor estabilidad al montaje, desde esta última rueda se transmite el movimiento a otra por la parte posterior (ver fig. 26). Para lograr el movimiento en el eje vertical en la parte posterior se han utilizado bielas de nuevo. Sobre estos cuatro puntos de apoyo que se han formado, se construye la base para el motor superior, que introducirá la componente horizontal del movimiento.

El punto de partida del movimiento en este plano se encuentra con la biela en su posición más inferior (ver figura 27), es decir, con la plataforma abajo. Se debe situar en esta posición de manera manual antes de empezar una simulación.

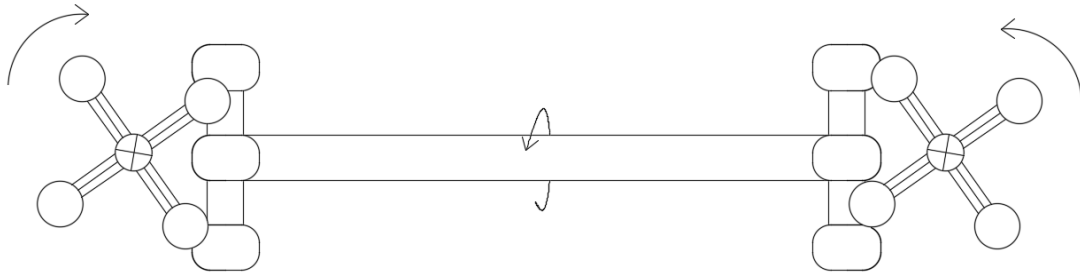


Figura 25. Funcionamiento mecanismo engranaje de bolas.

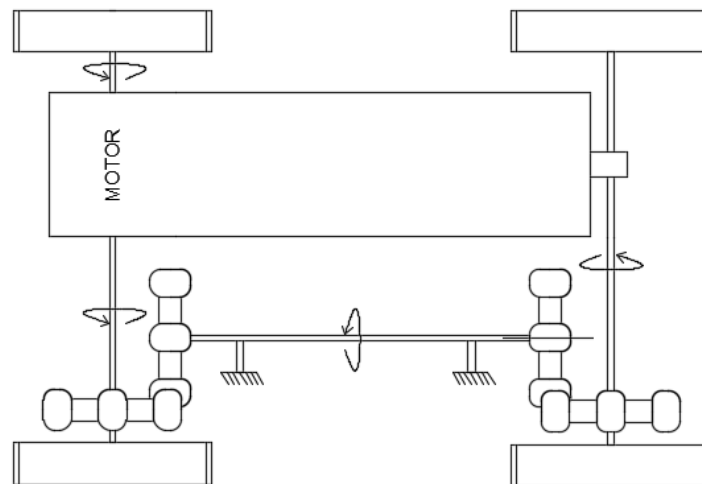


Figura 26. Vista planta transmisión movimiento en el motor inferior.

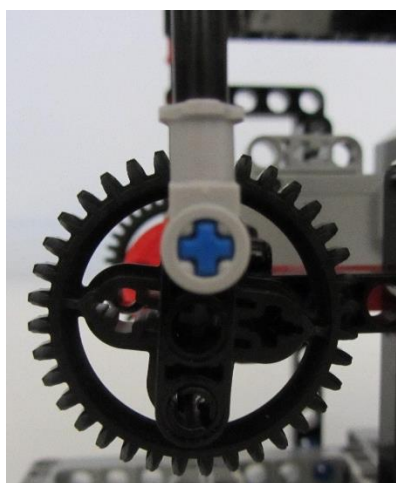


Figura 27. Detalle posición inicial biela en el montaje.

2.1.1.2. Movimiento eje horizontal

En este caso, el mecanismo de transmisión del movimiento es más sencillo que el caso anterior.

Para la transmisión de este movimiento se han utilizado diferentes piezas de LEGO:

- 1 rueda dentada de 36 dientes con 1,8 cm de radio y 4 puntos de agarre (figura 22 (a)).
- 1 engranaje de 12 dientes (figura 22 (b)).
- Varias barras en cruz para transmisión de movimientos (figura 22 (f)).
- Diversos elementos de unión entre piezas (figura 22 (e)).
- Varias barras con diferentes número de huecos (algunas trabajan como parte de la estructura y otras como biela) (figura 22 (d)).

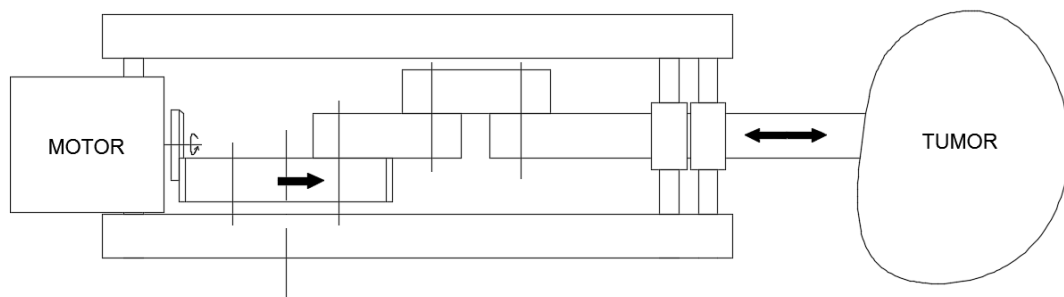


Figura 28. Esquema transmisión movimiento horizontal con vista planta transmisión movimiento horizontal.

Como se utiliza el motor mediano se obtiene el movimiento circular a través del punto central del motor por lo que será necesario usar una barra para tener un eje de rotación. Sobre esa barra se ha situado un engranaje de 12 dientes que, a través de un sistema de engranajes, transmite el movimiento a una rueda dentada de 36 dientes, dividiendo la velocidad del motor por 3. Una vez tenemos el movimiento de rotación en este punto, al igual que pasaba para el movimiento en el eje vertical, se transmite el movimiento en el eje horizontal (hacia delante y hacia atrás) haciendo uso de una biela como puede verse en la figura 28.

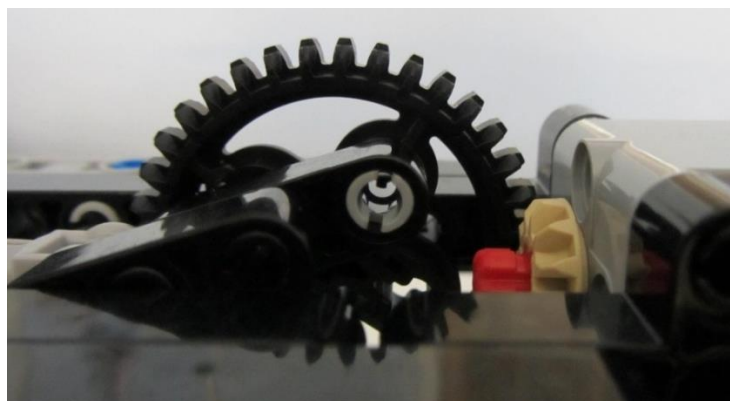


Figura 29. Detalle punto de partida en el movimiento horizontal. Rueda dentada adelantada 45° aprox.

El punto de partida del movimiento en este plano se sitúa en el extremo más alejado de la punta pero añadiendo un giro de 45° a la rueda dentada ya que, tras varias pruebas empíricas, se ha llegado a la conclusión que para conseguir el movimiento elíptico es necesario añadir ese ángulo (ver figura 29).

2.1.2. Control prototipo

La parte más complicada del diseño del prototipo es la sincronización de los motores para que el movimiento resultante sea el que buscamos. En un primer momento se intentó controlar el movimiento haciendo uso de la herramienta propia de LEGO MINDSTORMS. Finalmente se optó por utilizar Simulink para implementar toda la parte de control.

2.1.2.1. Control con software LEGO MINDSTORMS EV3 Home Edition

Como ya se ha comentado anteriormente, la herramienta LEGO MINDSTORMS EV3 tiene su propio software que permite su programación. Esta programación se basa en la unión de bloques de manera secuencial.

Existen diferentes tipos de bloques agrupados por colores como se puede ver en la parte inferior de la figura 14.

Para el control de los motores, la herramienta nos ofrece bloques diferentes para el motor grande y el motor mediano. En ambos casos, un parámetro que es fijo es lo que llaman potencia (parámetro sin unidades, no está relacionado con la potencia real del motor). Dicho valor va de -100 a 100. El signo indica el sentido de giro. Otros parámetros que se pueden introducir como entrada son grados a recorrer, vueltas o tiempo, pero siempre indicando un valor de potencia. También se le debe indicar en que puerto está conectado.

El sistema de control que se planteó haciendo uso del software de LEGO fue el control de la velocidad de los motores por tramos. Para conseguir el movimiento elíptico se necesita que el movimiento horizontal y el vertical funcionen simultáneamente y con ciclos de igual duración pero que la velocidad no se mantenga constante (al menos en uno de los ejes de movimiento).

La solución que se planteó fue mantener constante la velocidad del motor superior (teniendo en cuenta la reducción de velocidad con el sistema de engranajes) y variar la velocidad por tramos en el motor inferior. En el motor inferior se decidió que para cada media vuelta del motor, 45° se realizaran a una velocidad lenta, 110° a velocidad rápida y los 25° restantes de nuevo a velocidad lenta. Con esta variación de velocidades en el eje vertical se conseguiría la forma elíptica deseada.

El problema a la hora de coordinar el movimiento de ambos motores es que no se le puede indicar un valor de velocidad. Al utilizar motores diferentes para cada movimiento, el mismo valor de potencia no produce la misma velocidad a la salida de los motores. Para intentar relacionar el valor de potencia con la velocidad de salida del motor se utilizó el sensor de rotación (*encoder*) de los motores para poder calcularla a partir de los grados recorridos en un determinado tiempo (se utilizó Matlab para esta tarea ya que resultaba más sencilla).

Al realizar varias veces estas medidas apareció la primera limitación del sistema: el valor de velocidad asociado a un valor de potencia de entrada varía de una prueba a otra. La diferencia entre unas medidas u otras era la carga de la batería, por lo que el nivel o tipo de batería que se utilice es un aspecto limitante si se quiere obtener la velocidad de esta manera. En la tabla 4 se puede ver una comparación de diferentes velocidades para dos pruebas distintas.

	Motor gr. potencia 20	Motor gr. potencia 40	Motor med. potencia 20	Motor med. potencia 40
Prueba 1	131,4 °/s	297,8 °/s	389 °/s	636,5 °/s
Prueba 2	98,6 °/s	270,4 °/s	332,6 °/s	585 °/s

Tabla 4. Comparación valores velocidad entre diferentes medidas. Las dos primeras columnas representan la velocidad para el motor grande a potencia 20 y 40. Las otras dos columnas restantes indican la velocidad del motor mediano a potencia 20 y 40.

Tras esto, se decidió crear el programa en el software de LEGO y probar, de manera empírica, diferentes valores de potencias hasta dar con el movimiento deseado. En la figura 30 se muestran los bloques programados del movimiento horizontal, girando el motor mediano con una potencia (parámetro del motor, no potencia real) de 29,8. En la figura 31 aparece la programación del movimiento vertical en este caso, para las velocidades lentas se indicó una potencia de 10 y para las rápidas de 23.

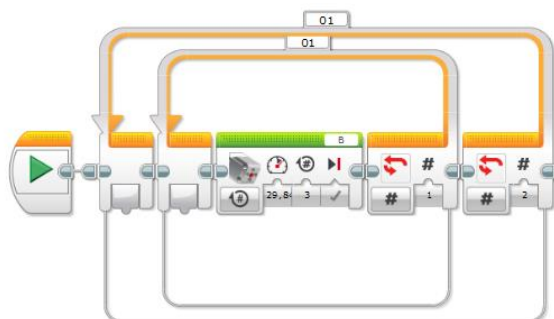


Figura 30. Programación con LEGO movimiento horizontal.

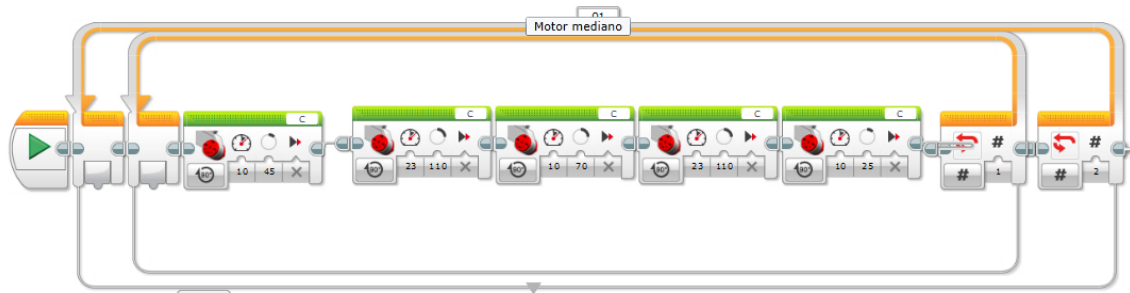


Figura 31. Programación con LEGO movimiento vertical.

Al tratarse de valores estimados de manera empírica el movimiento no se mantiene estable y se descoordina a lo largo del tiempo.

Para poder realizar un buen control de la posición recorrida por los motores y la velocidad de los mismos, se decidió pasar a realizar dicho control en Simulink, el cual ofrece mayor versatilidad para esta tarea.

2.1.2.2. Control con Simulink

El sistema LEGO MINDSTORMS EV3 es muy versátil ya que permite su programación en varias herramientas. En Matlab y Simulink existen librerías (descargables gratuitamente) para poder programar y comunicar el dispositivo.

La mejor manera de conectar Matlab y Simulink al LEGO MINDSTORMS EV3 es mediante WiFi. Para ello se ha de introducir la sentencia:

```
>> myev3 = legoev3('wifi', '192.168.43.231', '001653420ba0')
```

Donde *legoev3* es una función de la librería de LEGO para Matlab, *myev3* es el nombre que le damos al dispositivo, y en cuanto a los parámetros de entrada, el primero indica el tipo de conexión (si solo se va a utilizar Matlab se puede emplear conexión USB), el segundo la dirección IP (en el caso de usar conexión WiFi) y el último es el número de identificación del bloque EV3 (consultable en los ajustes del propio bloque)

A continuación, se procede a la descripción de los bloques presentes en la librería de Simulink. Los bloques para esta herramienta son más sencillos que en el software de LEGO. En la figura 32 pueden verse.

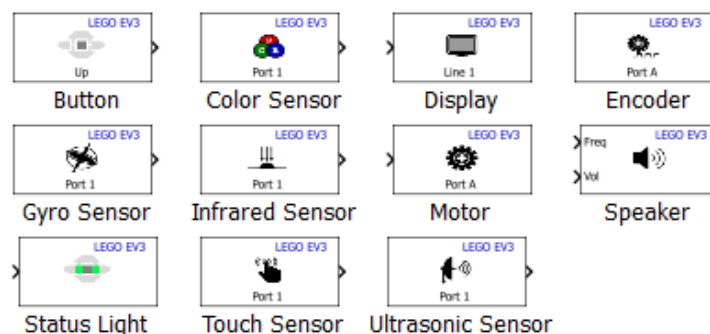


Figura 32. Bloques de LEGO MINDSTORMS EV3 en Simulink

Para el control del dispositivo se han utilizado los bloques de motor y el *encoder* (sensor de rotación). Para los motores hay un único bloque, sin distinguir entre motor grande o mediano. Como entrada se indica el valor de potencia (entre -100 y 100, al igual que ocurría en el software de LEGO) y en los ajustes del bloque debe determinarse el puerto en el que está conectado. El *encoder* nos permite leer el ángulo recorrido en grados.

Como no se conoce la velocidad para una determinada potencia, se decidió implementar controladores PID que nos permitieran controlar la posición recorrida por ambos motores y a la vez controlar la velocidad del sistema. Para ello el primer paso es la identificación de los motores.

a. Caracterización motores

El control de la posición entre los motores se realiza sobre el motor mediano (el encargado del movimiento horizontal). Un control de posición es un sistema de 1º orden más integrador [24].

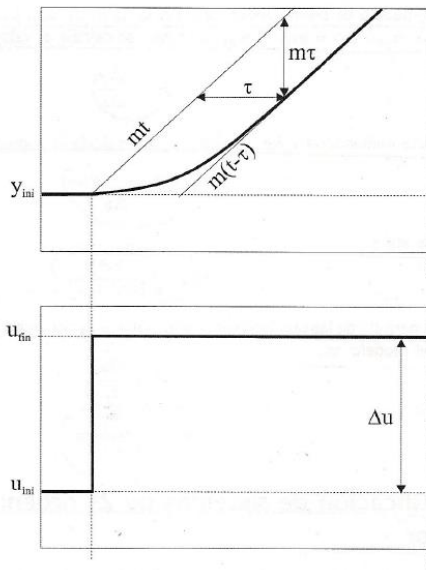


Figura 33. Abajo escalón de entrada al sistema. Arriba señal posición a la salida [24].

El procedimiento para identificar los parámetros del motor consiste en introducir un escalón de entrada Δu , en nuestro caso un salto de potencia de entrada, y evaluar los parámetros a la salida según la figura 33 [24]. En la ecuación 1 se muestra forma genérica de función de transferencia del motor.

$$G(s) = \frac{k}{s(1+\tau s)} \quad (1)$$

$$k = \frac{m}{\Delta u} \quad (2)$$

Se ha simulado un salto de potencia Δu de 20 obteniendo el valor de grados recorridos que muestra la figura 34 a lo largo de la duración del experimento.

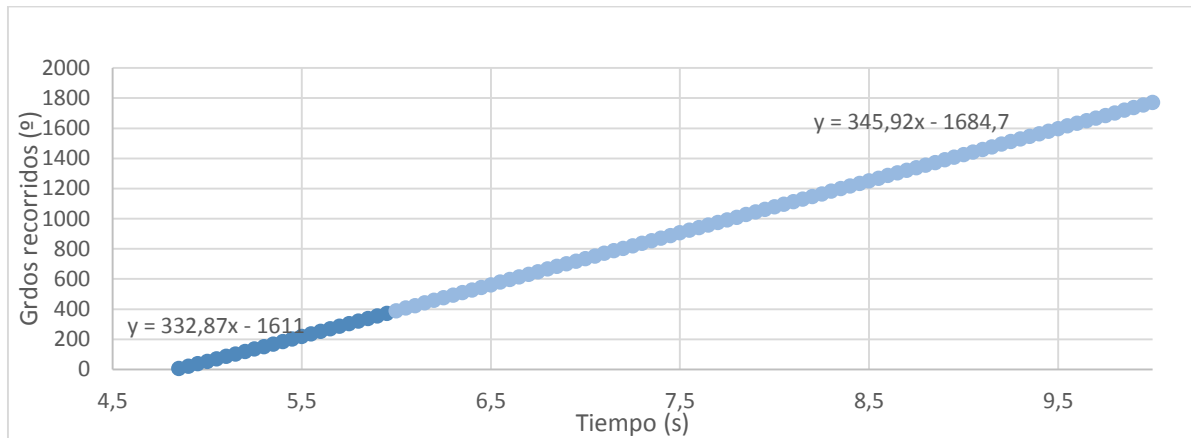


Figura 34. Gráfica grados recorridos vs tiempo del motor mediano tras escalón para control de posición.

Evaluando la pendiente en la parte estable, se tiene un valor de $m=345,92$ por lo que según (2), $k=17,296$.

En las medidas, se tiene que para $t=4,8s$ grados recorridos es igual a 0. Buscando el corte de la recta de la línea de tendencia con el eje, se obtiene el corte en 0 para $t=4,8808s$, por lo que se obtiene una τ de 0,0808 (en la practica la hemos aproximado a 0,1).

Finalmente la respuesta del motor mediano vendría indicada por la ecuación 3.

$$G(s) = \frac{17.296}{s(1+0.1s)} = \frac{172.96}{s(s+10)} \quad (3)$$

Una vez se ha caracterizado el motor, sabiendo que la propia función de transferencia incluye al integrador, debemos diseñar el controlador de posición. Para ello se propone un controlador de tipo proporcional (P) según la ecuación 4 y que tenga un tiempo de establecimiento menor a 4 segundos y una sobreoscilación inferior al 4,3%.

$$G_R(s) = K_p \quad (4)$$

$$K_p = k * K_t \quad (5)$$

Para caracterizar el proceso y obtener el valor de la constante de proporcionalidad K_p se ha utilizado el método del lugar de las raíces y se ha aplicado el criterio del argumento y del módulo posteriormente [24]. Después de esto se obtiene $K_t = 9$, por lo tanto como $k=172,96$, $K_p=0,052$.

El control de velocidad se realiza sobre el motor grande, el responsable de la componente vertical del movimiento. Un control de velocidad es un sistema de 1º orden.

El procedimiento para identificar los parámetros de este motor consiste en introducir un escalón de entrada Δu , en nuestro caso un salto de potencia de

entrada, y evaluar los parámetros a la salida según la figura 35 [24]. En la ecuación 6 se muestra forma genérica de función de transferencia del motor.

$$G(s) = \frac{k}{(1+\tau s)} \quad (6)$$

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{\Delta v}{\Delta p} \quad (7)$$

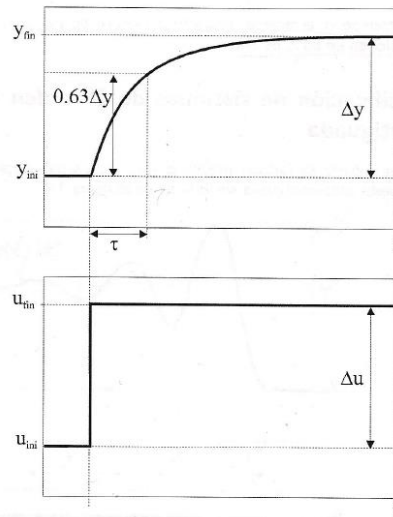


Figura 35. Abajo escalón de entrada al sistema. Arriba señal velocidad a la salida [24].

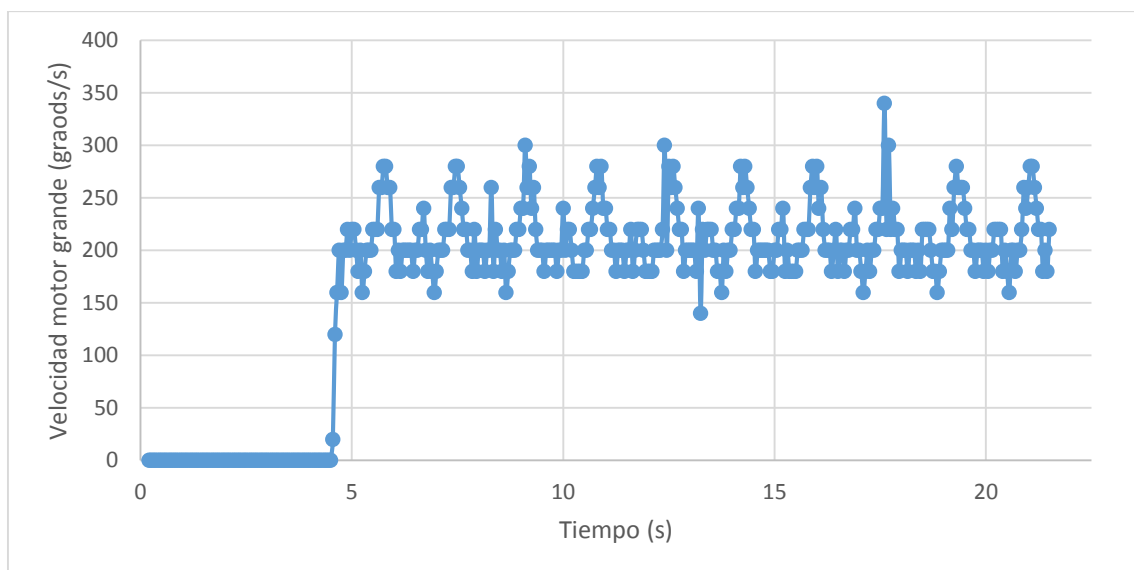


Figura 36. Gráfica Velocidad vs tiempo del motor grande tras escalón en control de velocidad.

Tras aplicar un salto de potencia Δu de 30, se obtiene el comportamiento que se ve en la figura 36. Puede verse que en este caso la velocidad no se mantiene constante a un nivel máximo pero oscila en torno a una media de 210,08 grados/s, por lo que según la ecuación 7, $k=7,002$.

Por otro lado se debe obtener el valor de τ cuando la velocidad es de 132,35 grados/s (63% de 210). Aproximando (fig. 37) se obtiene un valor de $\tau = 0,115$ s.

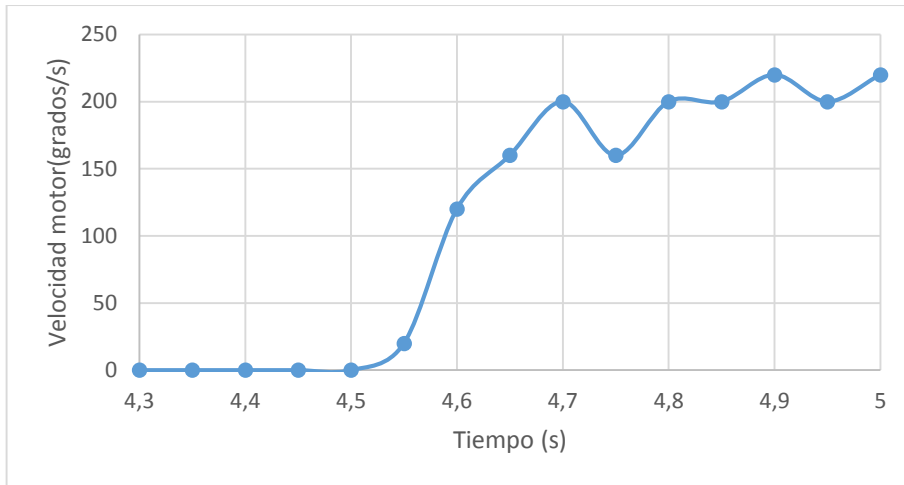


Figura 37. Evolución de la velocidad del motor tras el escalón.

El comportamiento del motor grande queda aproximado según la ecuación 8.

$$G(s) = \frac{7}{(1+0.115s)} = \frac{60.8695}{(s+8.6956)} \quad (8)$$

Una vez se tiene caracterizado el motor se debe diseñar el controlador. Para ello se propondrá un controlador de tipo proporcional integral (PI) cuya ecuación característica se muestra en la ecuación 9 y que tenga un tiempo de establecimiento menor a 4 segundos y una sobreoscilación inferior al 4,3%.

$$G_R(s) = \frac{K_p(s-\frac{1}{T_i})}{s} \quad (9)$$

Utilizando de nuevo el método del lugar de las raíces y aplicando la cancelación del polo de la función de transferencia del motor, se obtiene que el cero debe estar en 8,69 por lo que $\frac{1}{T_i} = -8,6956$. Después de comprobar que las especificaciones dinámicas se cumplen se obtiene un valor de K_i igual a 2, por lo que según la ecuación 5, el valor de K_p es 0,0328.

La ecuación del controlador de velocidad queda según la ecuación 10.

$$G_R(s) = 0.0328 + \frac{0.0328 \cdot 8.69}{s} = 0.0328 + \frac{0.285}{s} \quad (10)$$

b. Bloques de control

Simulink tiene implementados bloques PID en cuyos ajustes se pueden indicar las constantes de proporcionalidad, integrabilidad o derivabilidad.

Haciendo uso de los bloques proporcionados por Simulink y los de las librerías de LEGO, se ha desarrollado el circuito de control mostrado en la figura 38. En él se puede observar cómo se han utilizado los datos proporcionados por el *encoder* de los motores para utilizarlos como señales a controlar.

Comenzando por el **control de posición**, este se ha hecho sobre el motor mediano (conectado en el puerto B). A la entrada del controlador se tiene la diferencia que queremos minimizar entre el ángulo recorrido por el motor inferior (motor grande) y un tercio del ángulo recorrido por el motor que estamos controlando (debido al sistema de engranajes).

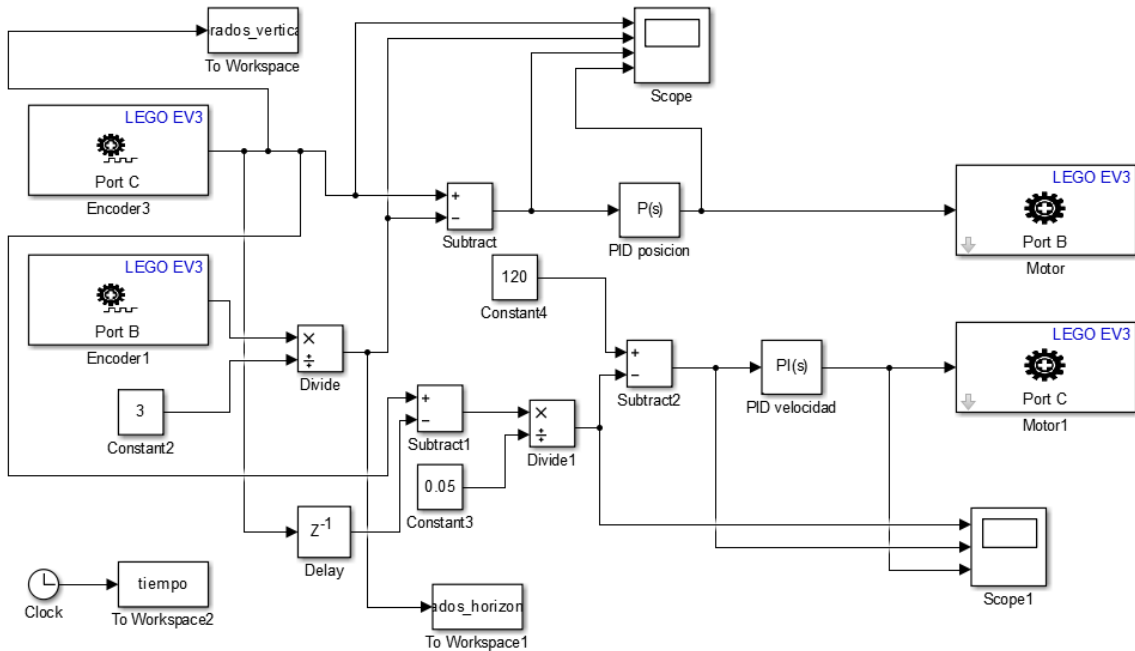


Figura 38. Circuito de control con PIDs del movimiento del sistema LEGO MINDSTORMS EV3

El **control de velocidad** se ha efectuado sobre el motor grande, conectado en el puerto C. A la entrada del controlador se tiene la diferencia que se quiere minimizar entre un valor constante que el usuario elige y el que está proporcionando el motor. La velocidad introducida como constante en la figura 38 es de 120 grados/s, que equivaldría a un ciclo respiratorio de unas 20 respiraciones por minuto. Para el cálculo de la velocidad del motor en cada instante, se divide la diferencia entre un valor y el anterior obtenido del *encoder* entre el tiempo entre muestras, siendo este de 0,05 s.

A la hora de llevar los valores teóricos del diseño de los PID a la práctica, se ha observado que debido al comportamiento poco estable de estos motores, el valor de las constantes ha tenido que ser ajustado de manera empírica para minimizar el error en el control. En la tabla 5 se muestran los valores teóricos y los escogidos finalmente.

	PID Posición		PID Velocidad
	P	P	I
Valor Teórico	0,052	0,0328	0,285
Valor Práctico	3	0,2	0,285

Tabla 5. Valores teóricos y prácticos de las constantes de los PID

3. Resultados y discusión

3.1. Movimiento real

Con el modelo de control diseñado en el apartado anterior se consigue realizar el movimiento deseado en dos dimensiones. Para comprobar que el movimiento obtenido sigue la trayectoria deseada, se ha ubicado en el extremo de salida del movimiento un rotulador que nos permite plasmar el movimiento en papel. En la figura 39 se muestra una imagen de como se ha realizado.

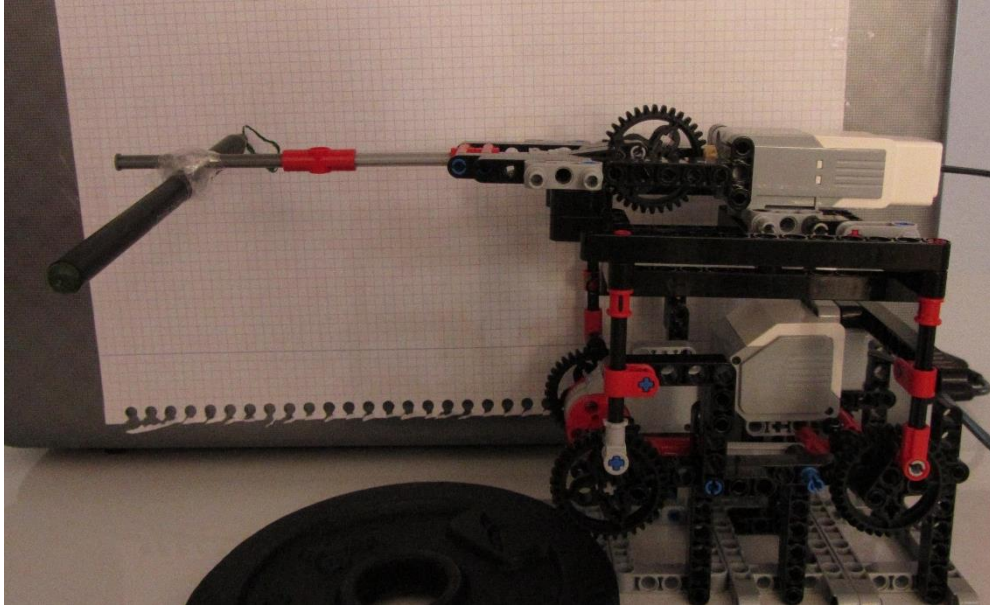


Figura 39. Sistema empleado para obtener el movimiento real del dispositivo

En la figura 40 puede verse con detalle el movimiento que realiza. Se puede apreciar gran similitud con alguna de las trayectorias de la figura 6. El sistema recrea un movimiento “elíptico” en sentido horario, empezando el movimiento en el extremo inferior derecho de la elipse. La parte inferior de la elipse sería la fase de inspiración y la parte superior la de espiración. No se consigue una elipse perfecta ya que, por una parte, los motores no son capaces de absorber las perturbaciones producidas en el dispositivo debidas al peso del mismo. Esto se puede ver en la parte superior derecha de la elipse de la fig. 40, donde se ve una zona prácticamente vertical debida al aumento de velocidad en la bajada (por el peso) y por otro lado las tolerancias de las piezas de LEGO son demasiado elevadas para conseguir un movimiento fino, de ahí las pequeñas variaciones que se aprecian en la parte inferior de la elipse.

Para obtener de otra manera el movimiento producido se ha ubicado un diodo led en el extremo. Se ha hecho funcionar el dispositivo en una sala a oscuras y se ha realizado una fotografía con un tiempo de exposición elevado. Dicha fotografía aparece en la figura 41. En esta figura puede apreciarse que el contorno

de la imagen que se obtiene tiene gran similitud con la forma obtenida en la figura 40.

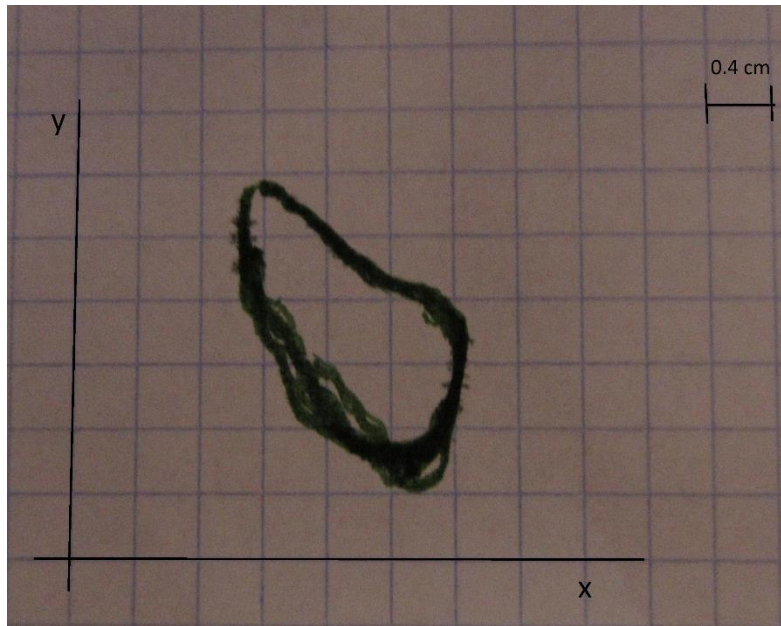


Figura 40. Movimiento real producido por el maniquí LEGO MINDSTORMS EV3



Figura 41. Imagen obtenida fotografiando con alto tiempo de exposición el sistema en funcionamiento.

3.2. Movimiento reconstruido

Una manera indirecta de conseguir el movimiento que realiza el sistema es leer la información que proporcionan los *encoder* de los motores. Con esos valores de ángulos recorridos y el tiempo de la ejecución se puede obtener información del movimiento realizado. En la figura 42 puede verse una reconstrucción del movimiento realizado en dos dimensiones. Para ello se ha hecho la transformación de ángulos recorridos a coordenadas cartesianas. En este caso se ve que la elipse que se reconstruye no se ve afectada por la parte física del montaje.

En las figura 43 se ve el movimiento realizado añadiéndole la componente del tiempo. Se puede apreciar que el movimiento sigue siendo en sentido horario. Se ha dividido por colores cada ciclo que realiza, es decir, cada “respiración”.

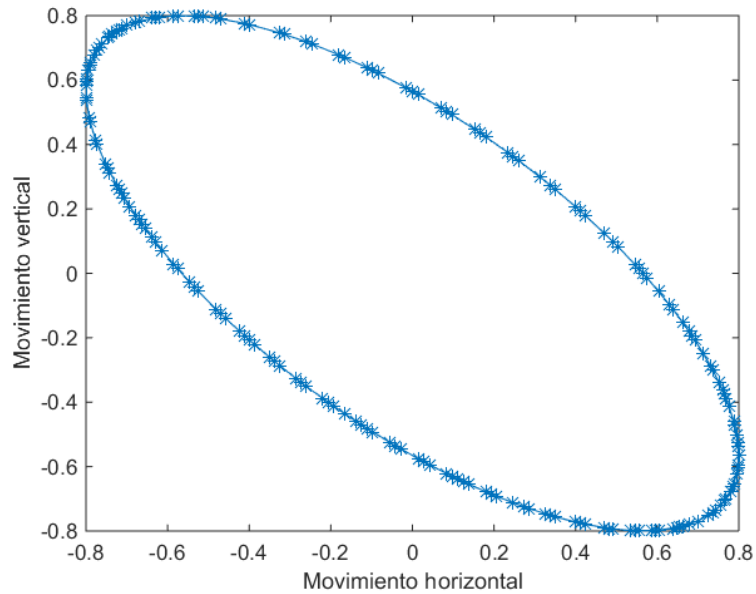


Figura 42. Reconstrucción movimiento en 2D

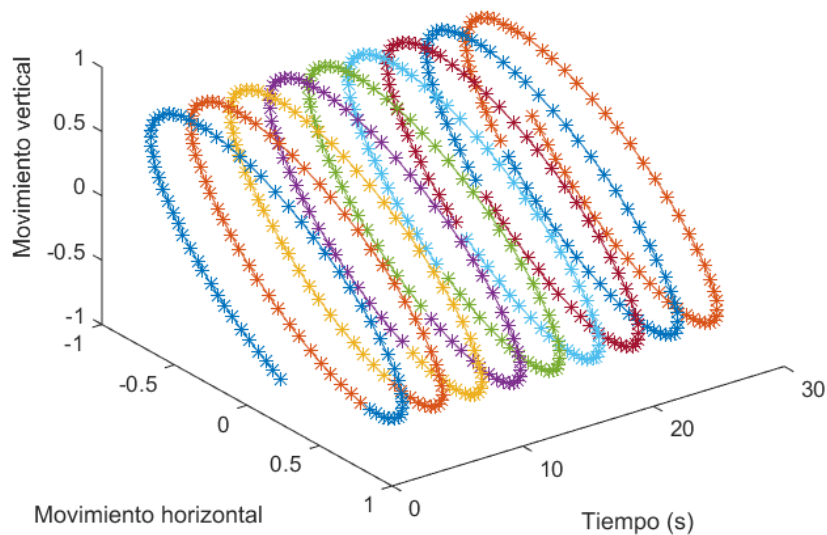


Figura 43. Movimiento reconstruido con Matlab a lo largo del tiempo.

En la figura 42 puede verse que los puntos representados no están todos situados con la misma separación, estando más juntos en los extremos. De ahí se puede extrapolar que la velocidad en los extremos será menor. Para comprobarlo se ha obtenido la velocidad en cada punto.

En la figura 44 puede verse en la parte superior la variación de la velocidad a lo largo del tiempo. Destaca que en los puntos donde la velocidad aumenta, coincide con la parte de bajada del movimiento y los mínimos con los extremos.

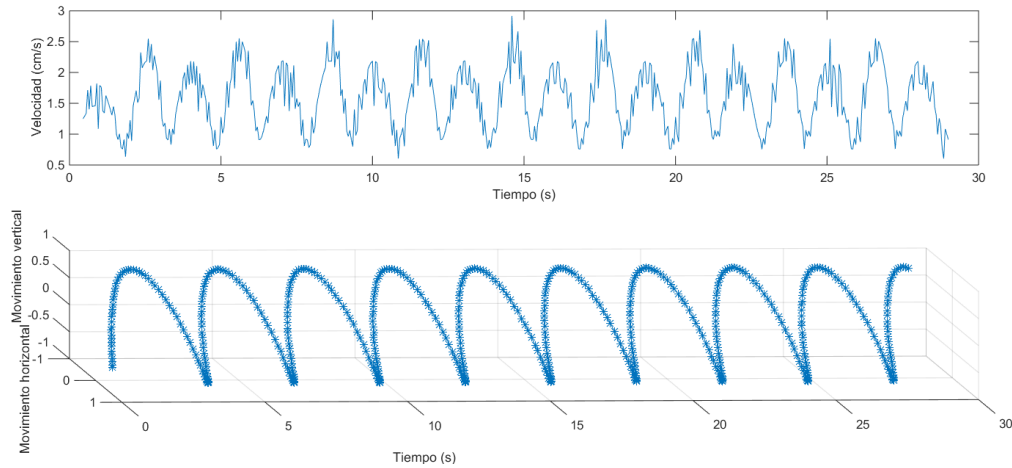


Figura 44. Arriba velocidad vs tiempo. Abajo movimiento en los dos ejes a lo largo del tiempo.

Para poder obtener de una manera numérica y más visual la velocidad en cada punto se ha realizado la gráfica de la figura 45. En ella está representado el movimiento de uno de los ciclos, y se ha colocado la velocidad en cm/s en puntos alternos. Se ve como la velocidad en los extremos es menor y la velocidad es mayor en el ascenso y descenso, destacando el descenso con las velocidades más altas (debidas al peso del sistema). El punto de velocidad más alto se ubica, como era de esperar, en el punto crítico de la bajada.

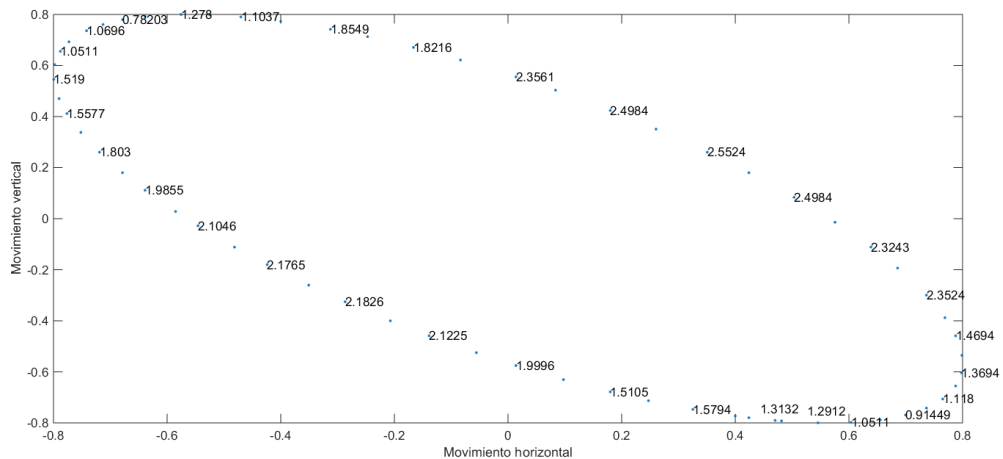


Figura 45. Movimiento reconstruido de un ciclo, con datos de velocidad en cm/s en algunos puntos.

En la figura 46 aparece otra reconstrucción del movimiento en función de la velocidad apreciándose que se crea una elipse ligeramente plegada. En la figura 47 es la misma representación pero de un único ciclo.

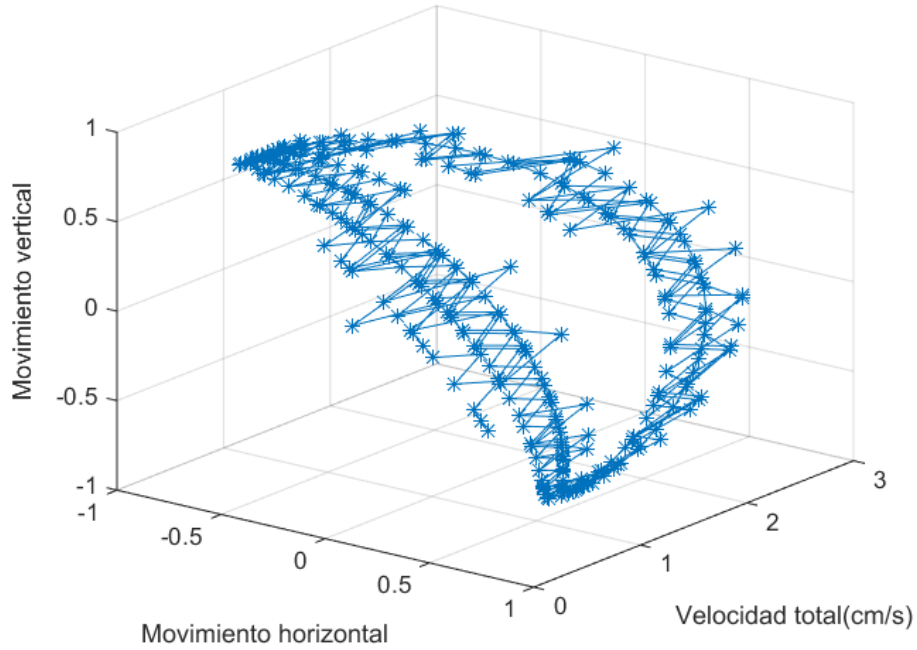


Figura 46. Reconstrucción movimiento con la velocidad.

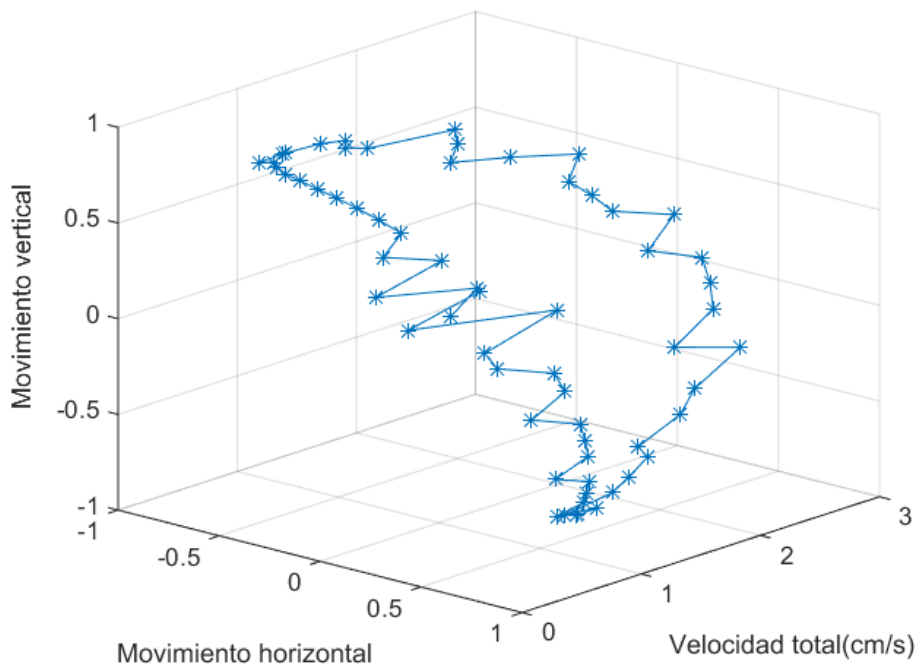


Figura 47. Reconstrucción del movimiento en un ciclo con la velocidad.

Como se ha podido obtener la velocidad, también se pueden extraer valores de aceleración a lo largo del movimiento. En la figura 48 se muestra la reconstrucción de un ciclo y sus correspondientes valores de aceleración (medidos en m/s^2) de puntos alternos. Dichos valores están representados en módulo. El valor más alto ($0,51049 \text{ cm/s}^2$) se obtiene, al igual que ocurría con la velocidad, en el punto crítico de la bajada.

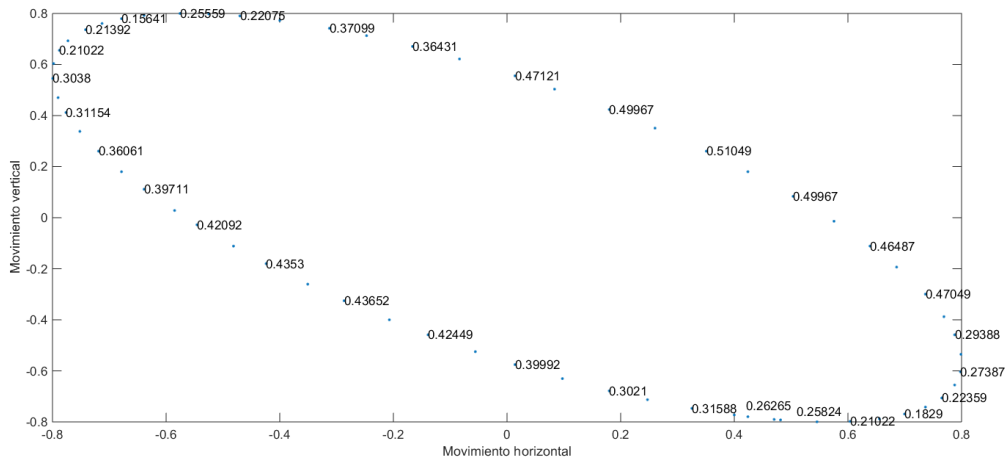


Figura 48. Movimiento reconstruido de un ciclo, con datos de aceleración en cm/s^2 en algunos puntos.

Para obtener más datos sobre el movimiento que se realiza, se ha ubicado en el extremo el sensor MPU 9150 de InvenSense®. Haciendo uso del montaje realizado en [22] se han obtenido valores referentes a las variaciones de aceleración en diferentes direcciones (X, Y y Z).

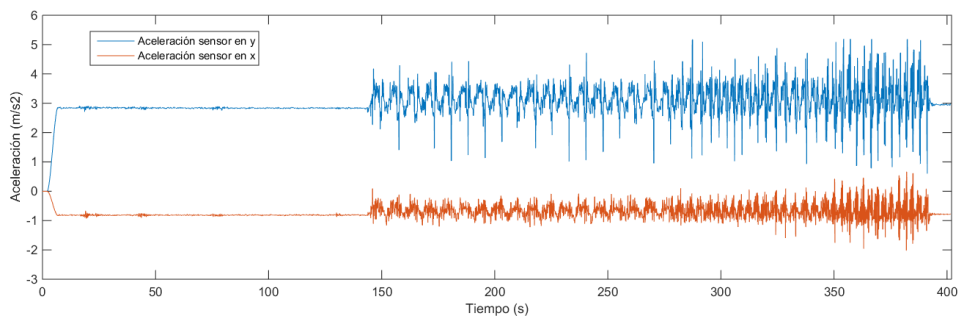


Figura 49. Señales obtenidas del sensor MPU 9150.

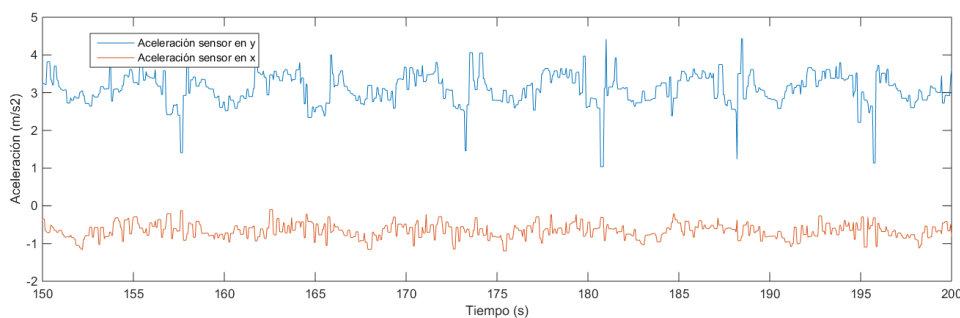


Figura 50. Señales medida del sensor en un intervalo de tiempo.

En el sensor de la dirección Z no se detectaba variación pero para los otros dos ejes sí. En la figura 49 se muestran los valores obtenidos directamente del sensor. Destaca que el sensor en Y detecta mayor variación que en X.

En la figura 50 se muestra una zona más concreta de la señal obtenida del sensor. Puede verse que la señal tiene bastante ruido, le afecta mucho al sensor los pequeños movimiento que tiene el sistema LEGO. Para mejorar la señal se ha filtrado y el resultado se muestra en la figura 51. Para poder comparar las señales entre ellas y comparar los valores obtenidos con el sensor con los obtenidos con Matlab, se ha eliminado el offset de las dos señales y obtenido la figura 52.

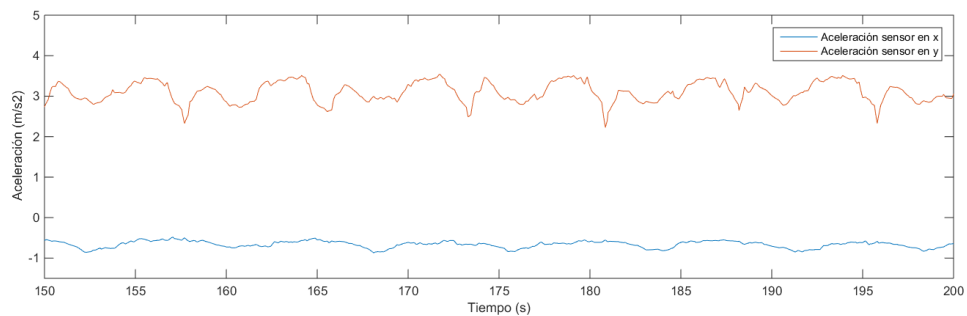


Figura 51. Señales filtrada en un intervalo de tiempo.

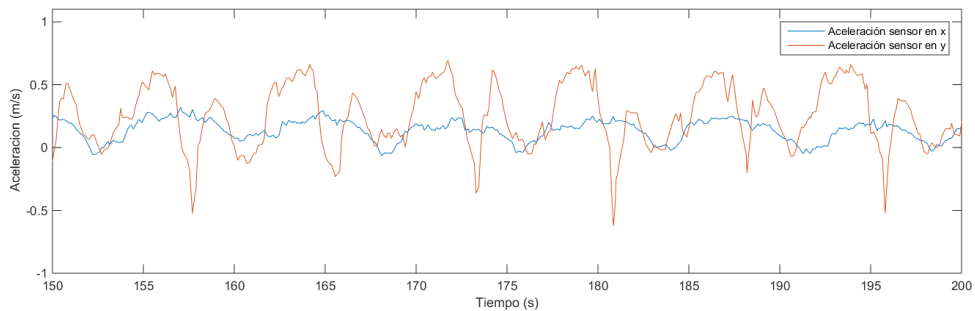


Figura 52. Señales centradas en cero.

El sensor nos devuelve valores de aceleración teniendo en cuenta el signo. De las dos señales que nos muestran variación, la referente al sensor en X no nos proporciona demasiada información, ya que varía poco con el ciclo. La señal del sensor en Y nos proporciona mucha más información. Si nos quedáramos con el módulo de los valores, en la figura 52 se puede ver que para la línea roja los valores más altos de aceleración están en torno a $0,5 \text{ m/s}^2$, al igual que pasaba con la reconstrucción en Matlab.

3.3. Análisis de la batería

Un aspecto limitante en la utilización del sistema LEGO es el uso de pilas recargables como fuente de alimentación. Dichas pilas alimentan al dispositivo a 7.2V cuando el dispositivo está preparado para 9V (esto ya afecta a la velocidad que se obtiene) Además el nivel de batería afecta a la hora de intentar calcular la

velocidad para cada potencia de entrada que permite el dispositivo, por lo que, a mayor nivel de batería, mayores velocidades se consiguen. Esto se podría resolver de cara a un futuro trabajo de continuación instalando una fuente de alimentación constante, sin utilizar pilas recargables.

Por otro lado, se realizó un estudio del nivel de batería en función del tiempo. Para ello puso el prototipo en funcionamiento y se fue midiendo el nivel de batería a lo largo del experimento.

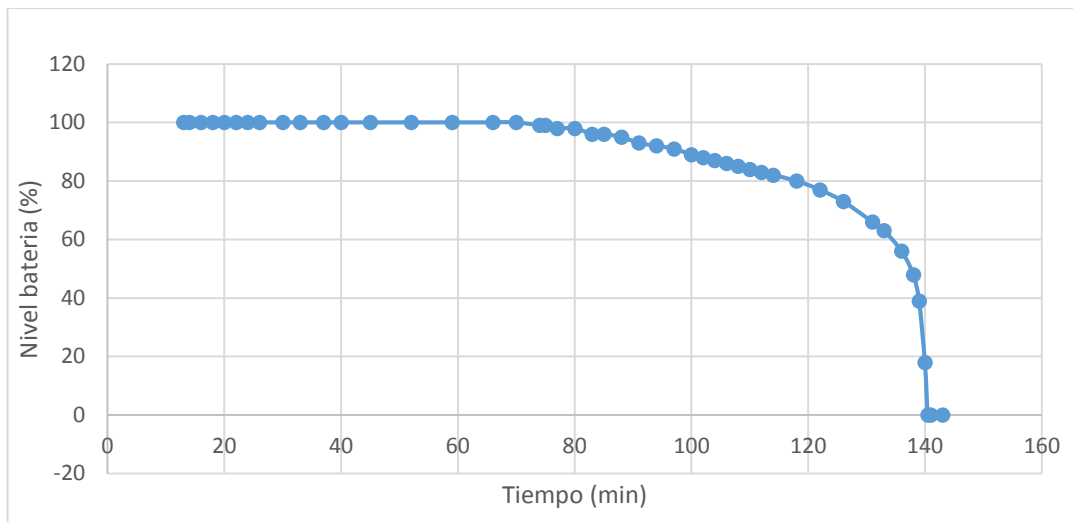


Figura 53. Nivel de batería a lo largo del tiempo.

En la figura 53 se muestra la variación de la batería con el tiempo. Llama la atención que durante bastante tiempo (durante este test fueron aproximadamente 70 min pero estos tiempos son aproximados) el nivel se mantiene constante en el 100% y una vez empieza a disminuir el nivel de batería, lo hace de manera muy rápida (a partir del 50% sobretodo).

Visto esto se puede concluir que el tiempo al que se mantiene constante es más que suficiente para la realización de las pruebas y, si se desea emplear pilas recargables, lo ideal es hacer funcionar el dispositivo siempre con las pilas recién cargadas.

4. Conclusiones

En este Trabajo Final de Máster se ha propuesto un sistema basado en LEGO MINDSTORMS EV3 que simula el movimiento de un tumor en dos direcciones del espacio con el ciclo respiratorio para ayudar a mejorar los sistemas de planificación en radioterapia. Dicho movimiento es elíptico, similar al movimiento con ciclo de histéresis que realiza un punto genérico del pulmón al respirar.

Para el control del movimiento se ha cumplido con el segundo objetivo de este trabajo ya que se ha utilizado la herramienta Simulink. Simulink tiene disponibles las librerías para el control del sistema LEGO y ofrece mayor facilidad a la hora de diseñar PIDs para programar el movimiento que el software propio de LEGO MINDSTORMS EV3.

Se ha podido comprobar que el movimiento que realiza es una elipse de dos maneras: obteniendo el movimiento real haciendo uso de un marcador o haciendo una fotografía con alto tiempo de exposición y mediante la reconstrucción posterior del movimiento realizado a partir de los grados recorridos por los motores.

El movimiento real es prácticamente una elipse pero se ve afectada en la parte correspondiente al descenso del montaje debido al peso del mismo. Los motores no son capaces de absorber la aceleración producida por el peso, por lo tanto, la velocidad en el descenso de la elipse es más elevada que en el ascenso de la misma. Este movimiento real también presenta algunas perturbaciones por las altas tolerancias entre las piezas LEGO.

Los valores de aceleración obtenidos con la reconstrucción con Matlab y los obtenidos con el sensor MPU 9150 son muy similares.

En cuanto a la batería del sistema se ha comprobado que el nivel de la misma afecta a la velocidad de salida del sistema. Además la curva de descarga de la misma no es lineal: se mantiene constante durante un periodo de tiempo y después disminuye drásticamente. En el caso de emplear pilas recargables deben estar con el nivel máximo de batería para garantizar el funcionamiento óptimo. Para evitar la dependencia de la velocidad con la batería, se podría alimentar el dispositivo con una fuente externa.

El movimiento obtenido se ajusta muy bien a la proyección en un plano del movimiento real de un tumor en el pulmón. Si en la aplicación que se diseñe se pueden permitir pequeñas variaciones en el movimiento, la implementación con el sistema LEGO MINDSTORMS EV3 es una muy buena opción debido a su accesibilidad y facilidad en el montaje. Por el contrario, si se desean mayores precisiones en la simulación del movimiento sería necesario utilizar otro sistema más robusto.

5. Líneas futuras

Las posibles líneas futuras a este trabajo serían:

- Cambiar la alimentación del sistema. Utilizar una fuente de alimentación externa para evitar la dependencia del mismo con el nivel de batería.
- Cambiar el montaje para que el peso no afecte al movimiento. Situar todos los motores en la parte inferior para evitar que alguno de ellos tenga que soportar el peso de otro.
- Posibilidad de añadir un sensor de respiración conectado a Matlab para poder personalizar el movimiento y la velocidad para cada paciente.
- Añadir un tercer eje de movimiento, para poder simular el movimiento en las 3 dimensiones del espacio.

6. Bibliografía

- [1] MedlinePlus. Último acceso: 24/08/2015.
<https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/lungsandbreathing.html>
- [2] Drake RL, Vogl W, Mitchell AWM. Gray: Anatomía para estudiantes. 1ª ed. Elsevier, 2005.
- [3] Sociedad Española de Oncología Médica (SEOM) Último acceso: 22/08/2015. <http://www.seom.org/>
- [4] Lindh WQ, Pooler MS, Tamparo CD, Dahl BM. Delmar's Comprehensive Medical Assisting: Administrative and Clinical Competencies. 4ª Ed. Delmar Cengage Learning, 2010.
- [5] Guyton AC, Hall JE. Tratado de fisiología médica. 12ª Ed. Elsevier, 2011.
- [6] Seppenwoolde Y, Shirato H, Kitamura K, Shimizu S, Van Herk M, Lebesque JV, et al. Precise and real-time measurement of 3D tumor motion in lung due to breathing and heartbeat, measured during radiotherapy. Elsevier. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 53, No. 4, pp. 822–834, 2002.
- [7] Mageras GS, Pevsner A, Yorke ED, Rosenzweig KE, Ford EC, Hertanto A, et al. Measurement of lung tumor motion using respiration-correlated CT. Elsevier. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 60, No. 3, pp. 933–941, 2004.
- [8] Organización mundial de la salud. Último acceso: 24/08/2015.
<http://www.who.int/es/>
- [9] American Cancer Society. Último acceso: 20/08/2015.
<http://www.cancer.org/index>
- [10] Proyecto IELCAP. Último acceso: 28/07/2015. <http://www.ielcap.org/>
- [11] Instituto Valenciano de Oncología (IVO) Último acceso: 24/08/2015.
<http://www.ivo.es/>
- [12] Asociación Española contra el Cáncer. Último acceso: 23/08/2015.
<https://www.aecc.es/Paginas/PaginaPrincipal.aspx>
- [13] Paez JG, Jänne PA, Lee JC, Tracy S, Greulich H, Gabriel S, et al. EGFR Mutations in Lung Cancer: Correlation with Clinical Response to Gefitinib Therapy, Science, Vol. 304 no. 5676 pp. 1497-1500, 2004.
- [14] DocCheck Pictures. Último acceso: 24/08/2015.
<http://pictures.doccheck.com/es/>
- [15] Rollins M. Beginning LEGO MINDSTORMS EV3. 1ª Ed. Apress. 2014.

- [16] Tello-Leal E, Guerrero-Melendez TY, Saldivar-Alonso VP. Revisión de la plataforma robótica LEGO Mindstorms para aplicaciones educativas y de investigación. *Revista S&T*, 11(26), 9-27, 2013.
- [17] LEGO MINDSTORMS EV3. Último acceso: 25/08/2015.
<http://www.lego.com/es-es/Mindstorms/products/31313-mindstorms-ev3>
- [18] Adaptador Netgear. Último acceso: 20/07/2015.
<http://www.netgear.es/home/products/networking/wifi-adapters/WNA1100.aspx>
- [19] Griffin T. *The art of LEGO MINDSTORMS EV3 PROGRAMMING*. 1ª Ed. No Starch Press, 2014.
- [20] Mathworks. Último acceso: 22/04/2015. <http://es.mathworks.com/hardware-support/lego-mindstorms-ev3-matlab.html>
- [21] InvenSense. Último acceso: 25/08/2015.
<http://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/>
- [22] Quiñones Colomer DR. Trabajo final de Grado: “Sensorización de dispositivos tridimensionales mediante bluetooth low energy con conectividad adaptada a Matlab”. Universitat Politècnica de València. 2015.
- [23] Isogawa Y. *The LEGO MINDSTORMS EV3 Idea Book*. 1ª Ed. No Starch Press, 2015.
- [24] Departamento Ingeniería de Sistemas y Automática. Apuntes asignatura Sistemas Automáticos, Universitat Politècnica de València, 2013.