

CAPÍTULO SIETE:

SENSORES

Ya que se ha construido el prototipo y se han instalado los actuadores que lo moverán, es necesario retroalimentar este movimiento a un sistema de control. En la figura 7.1 se muestra el diagrama de sensores necesarios que permitirán al sistema de control saber el estado de la prótesis, activando diferentes banderas necesarias para su correcto funcionamiento.

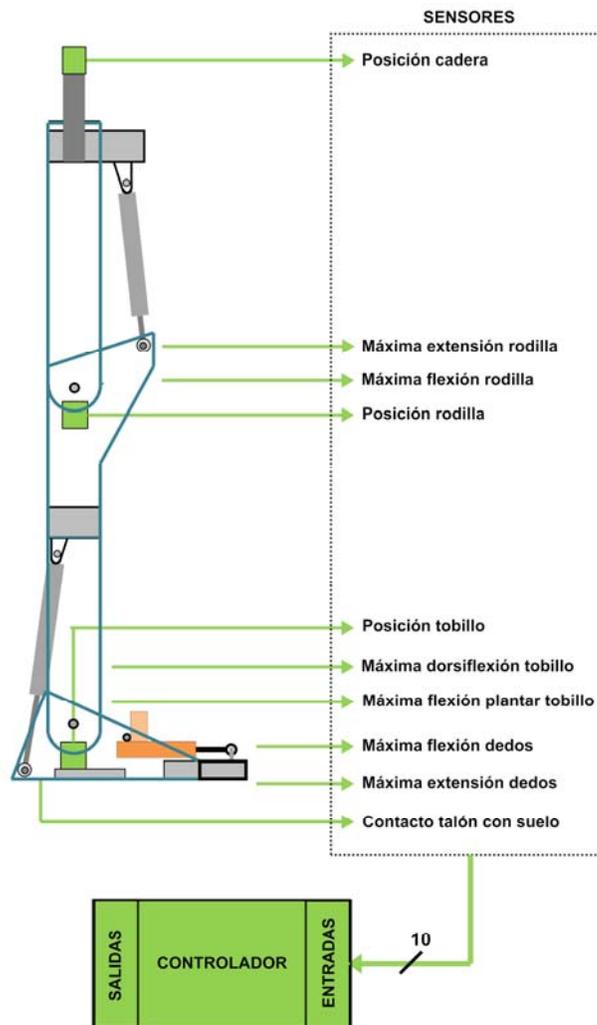


FIGURA 7.1 – Sistema de sensores de retroalimentación

7.1 Diseño e Instalación de Sensores

Para este prototipo son necesarios diez sensores divididos en tres diferentes tipos (encoders, sensores infrarrojos y sensores de presión) que se explicarán a continuación

7.1.1 Encoders

El movimiento de las articulaciones en el prototipo es uno de los factores más importantes a sensor, ya que si se desea controlar la pierna es necesario saber en que punto se encuentra con respecto al espacio. Para transformar un movimiento angular a una señal procesable se tenían varias opciones, pero finalmente se llegó a la conclusión que utilizar un encoder era la opción más viable.

Un encoder (figura 7.2) es un elemento utilizado para sensor la posición y rotación convirtiendo el desplazamiento en pulsos digitales. Consiste en un disco con un patrón de sectores opacos y transparentes montado en un eje de rotación. De un lado del disco se tiene un LED infrarrojo y del otro un foto-sensor. Cuando el disco gira el rayo infrarrojo es interrumpido secuencialmente por los sectores opacos del disco, generando pulsos a la salida. Para que los pulsos se generen perfectamente cuadrados se tiene un circuito que los filtra y los lleva dentro del rango de voltajes TTL. Al contar los pulsos generados en las señales de salida se puede determinar la posición.

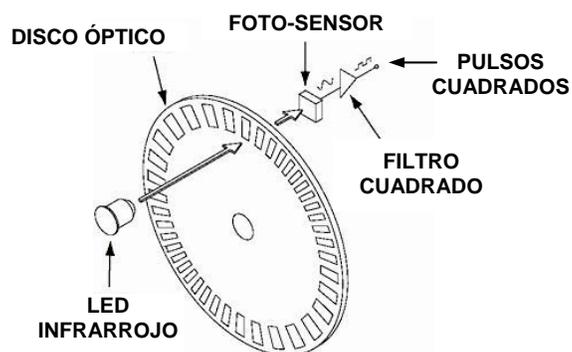


FIGURA 7.2 – Representación de encoder sencillo

Para poder determinar la dirección de giro, el encoder tiene dos pares de LEDs infrarrojos y foto-sensores defasados 90° (figura 7.3). De esta forma cuando gira el disco, el patrón de segmentos opacos se convierte en dos señales de salida de pulsos, normalmente denominados canal A y canal B. Los pulsos de salida del canal A están defasados 90° de los pulsos del canal B. La diferencia de fase entre la señal de salida A y la señal de salida B determinan la dirección de rotación del encoder.

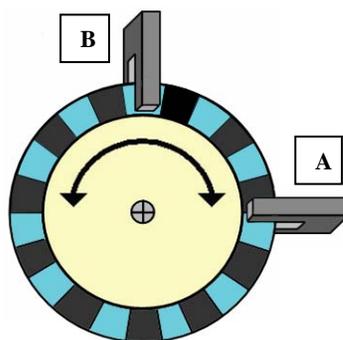


FIGURA 7.3 – Posición de sensores en un encoder para conocer dirección de giro.

Por ejemplo, si los pulsos del canal A suceden antes que los pulsos del canal B, como se muestra en la figura 7.4, la rotación es en sentido contrario de las manecillas del reloj. Por otro lado, si los pulsos del canal B suceden antes que los pulsos del canal A la rotación es en el sentido de las manecillas del reloj.

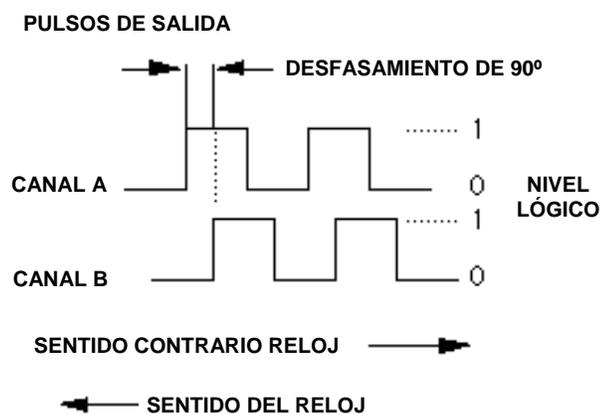


FIGURA 7.4 – Pulsos de salida de un encoder desfasados 90°.

Para la construcción de los encoders se consiguieron opto-interruptores ITR8102. El ITR8102 consiste en un diodo de arsénico emisor de infrarrojo (IR908-7C) y un fototransistor de silicio (PT908-7C) acoplados en una cubierta plástica (figura 7.5). El paquete de plástico está diseñado para optimizar la resolución mecánica, eficiencia de acoplamiento y aislar la luz del ambiente. La ranura permite interrumpir la señal fácilmente con algún material opaco, cambiando la salida de un estado “ENCENDIDO” a uno “APAGADO”.

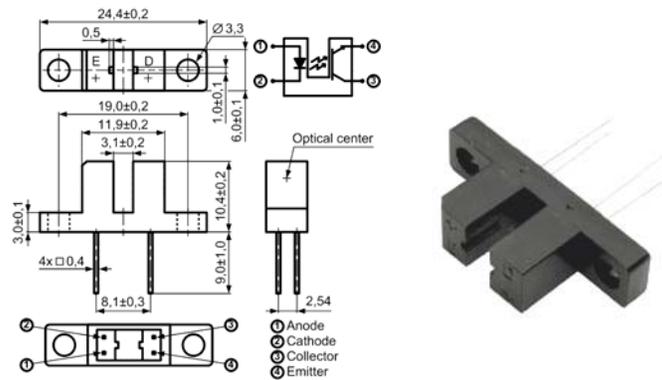


FIGURA 7.5 – Opto-interruptor ITR8102.

El prototipo solo utiliza medio disco para el encoder de cada articulación, esto significa que solo se tienen 180° de rango máximo. En realidad dependiendo de la articulación se utiliza mucho menos que este rango, por lo que se complica colocar los dos opto-interruptores a 90° de separación entre cada uno. Por esto, para poder determinar la dirección de giro, se diseñó el patrón de líneas del disco de tal manera que los sensores se pudieran colocar juntos (figura 7.6) y aún así se generara un pulso de salida antes que el otro.

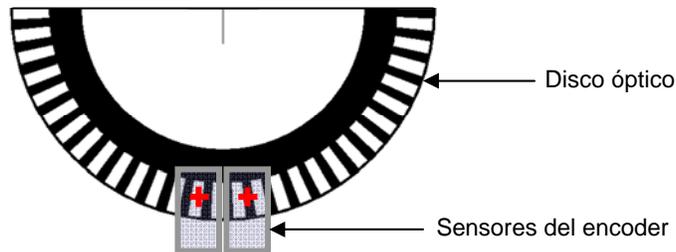


FIGURA 7.6 – Posicionamiento de opto-interruptores en disco de 180°.

En la figura 7.7 se muestra el circuito completo para un encoder de dos canales. Los temporizadores 555 son utilizados como comparadores de voltaje, de esta manera se generan pulsos TTL perfectamente cuadrados a la salida. Estos pulsos pueden ser enviados directamente al FPGA facilitando mucho su uso.

La sensibilidad de los fototransistores se puede ajustar variando la resistencia de $10\text{K}\Omega$ (R2 y R4 en la figura 7.7) o si se prefiere, el brillo de los diodos infrarrojos se puede ajustar variando la resistencia de $1\text{K}\Omega$ (R1 y R1 en la figura 7.7). Una resistencia de 500Ω duplica el brillo del emisor, el cual puede soportar hasta 50mA . Cuando los optointerruptores ITR8102 no están bloqueados se tiene a la salida de los temporizadores 555 (pin 3 “CH_A” y “CH_B” en la figura 7.7) un voltaje en alto de 5V . Con una sola capa de papel entre el ITR8102 se puede interrumpir fácilmente la luz infrarroja y generar un cero a la salida.

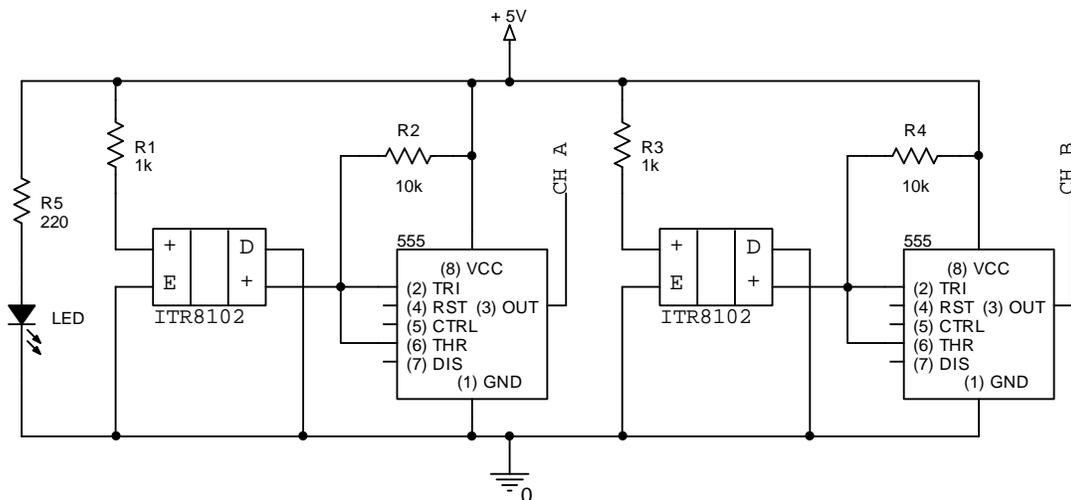


FIGURA 7.7 – Circuito eléctrico completo para un encoder de dos canales.

Se diseñó un circuito impreso de doble cara de tal manera que ocupara un espacio muy reducido y fuera fácil de montar en el prototipo (figura 7.8). Los tres encoders que se diseñaron parten del mismo modelo, la única diferencia es la posición de los optointerruptores en la placa ya que dependiendo de la articulación donde se va a instalar el ángulo de posición es diferente.

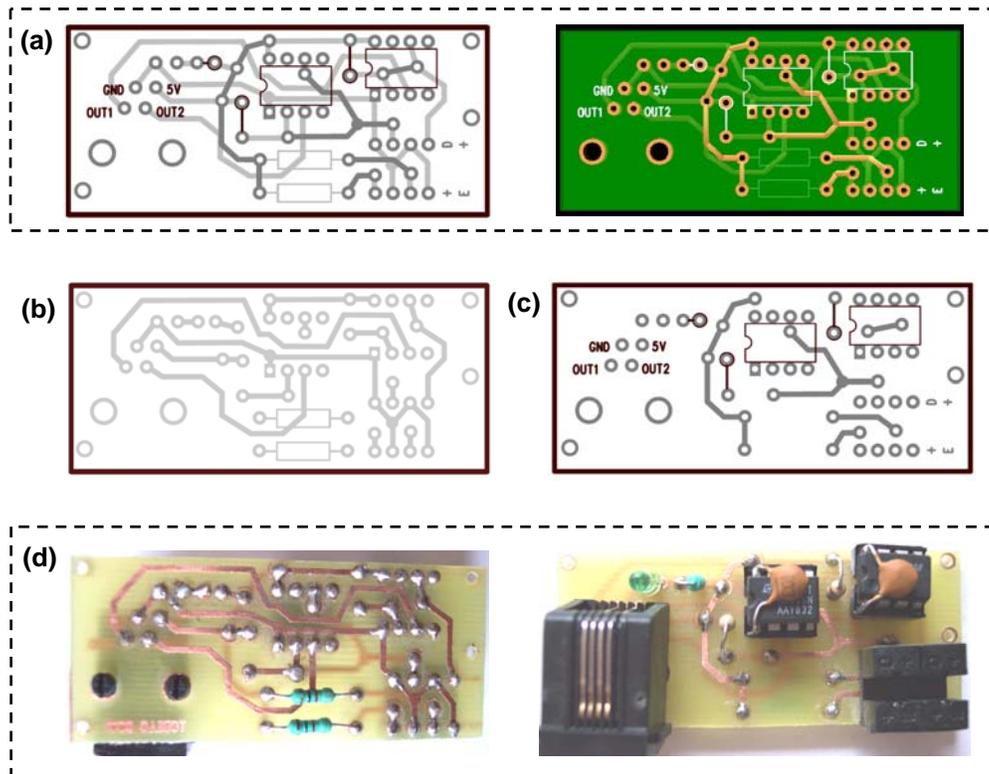


FIGURA 7.8 – Diseño de la placa impresa para el encoder de dos canales. (a) Vistas de doble cara. (b) Vista inferior. (c) Vista superior. (d) Diseño final.

7.1.1.1 Encoder del Tobillo

El encoder está montado en una placa metálica del pie horizontalmente con respecto al borde inferior. Al accionar el pistón, el encoder gira junto con el pie, mientras que el disco óptico se mantiene fijo en el tobillo (figura 7.9). Esto permite conocer la posición del pie con respecto al tobillo.

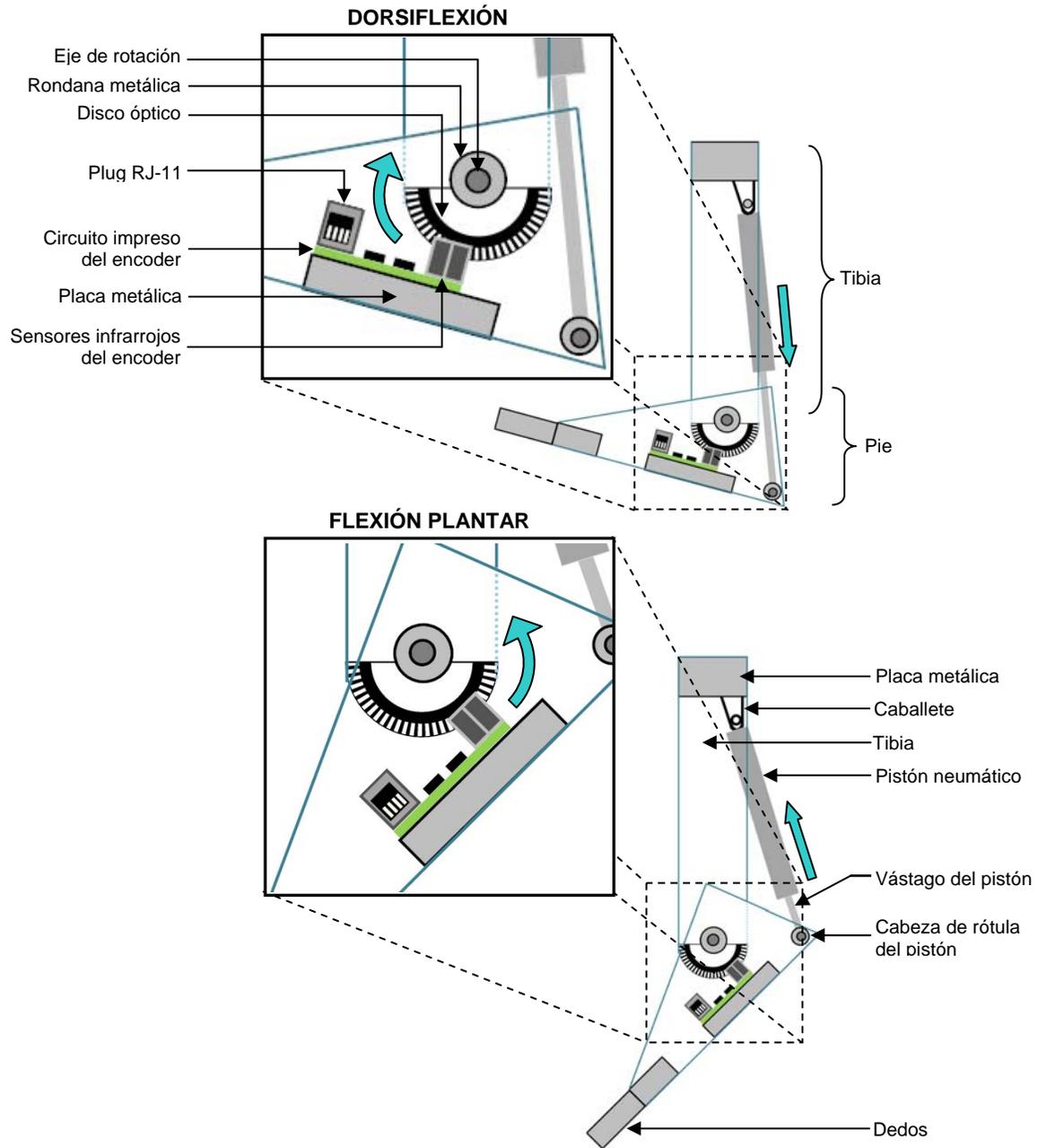


FIGURA 7.9 – Posicionamiento del encoder en la articulación del tobillo.

7.1.1.2 Encoder de la Rodilla

Al igual que en el pie, al accionarse el pistón el encoder montado verticalmente en una de las láminas de acrílico de la rodilla gira con la pierna mientras que el disco óptico se queda fijo en el muslo. La única diferencia con respecto al encoder del pie es la posición de montaje (figura 7.10).

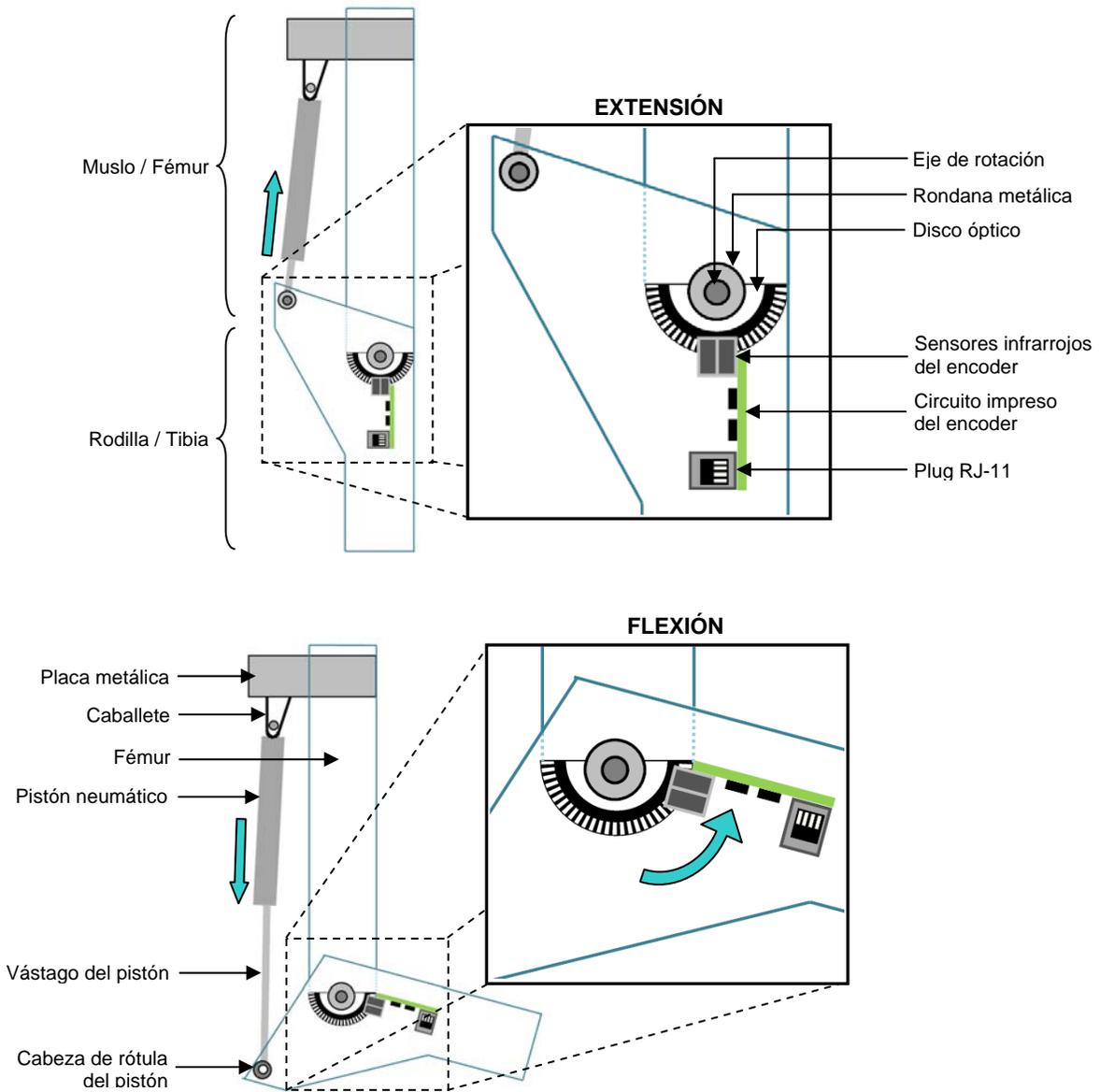


FIGURA 7.10 – Posicionamiento del encoder en la articulación de la rodilla.

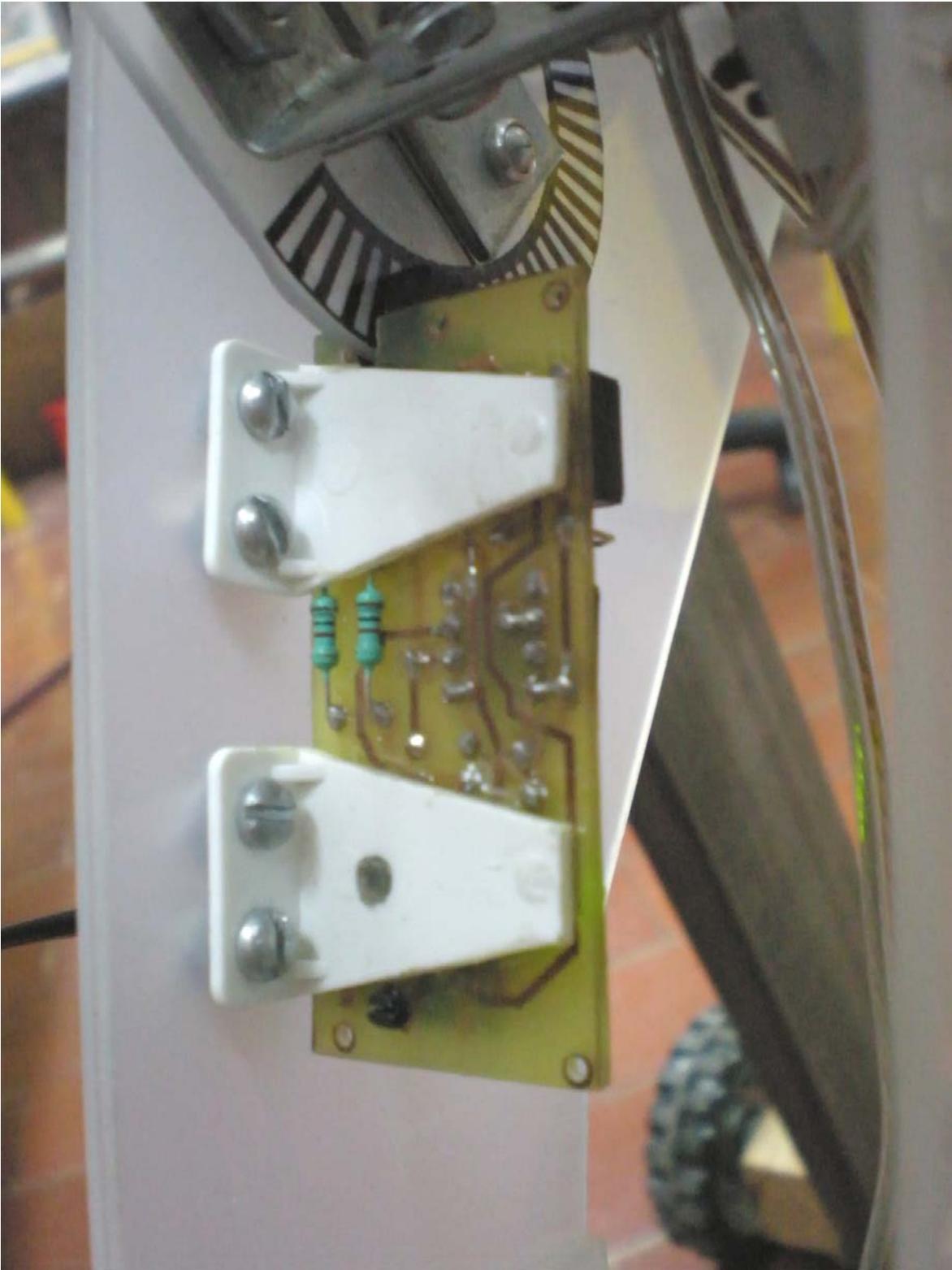


FIGURA 7.10 – Posicionamiento del encoder en la articulación de la rodilla.

7.1.1.3 Encoder de la Cadera

Se diseñó un banco (figura 7.11) donde será colgada la pierna para que simule la altura de la cadera. En este banco se fijará el tercer disco óptico mientras que el encoder será montado en la parte superior del prototipo para detectar el movimiento del muslo al balancearse hacia delante y hacia atrás.

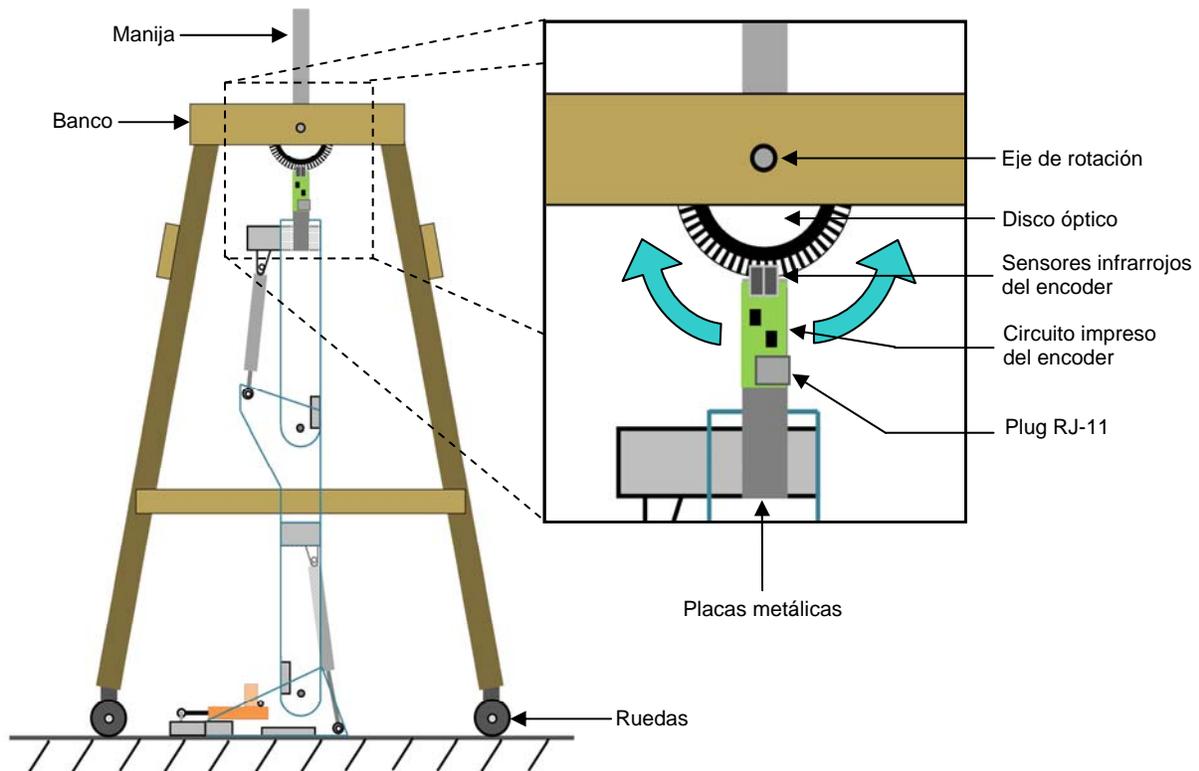


FIGURA 7.11a – Posicionamiento del encoder en la articulación de la cadera.

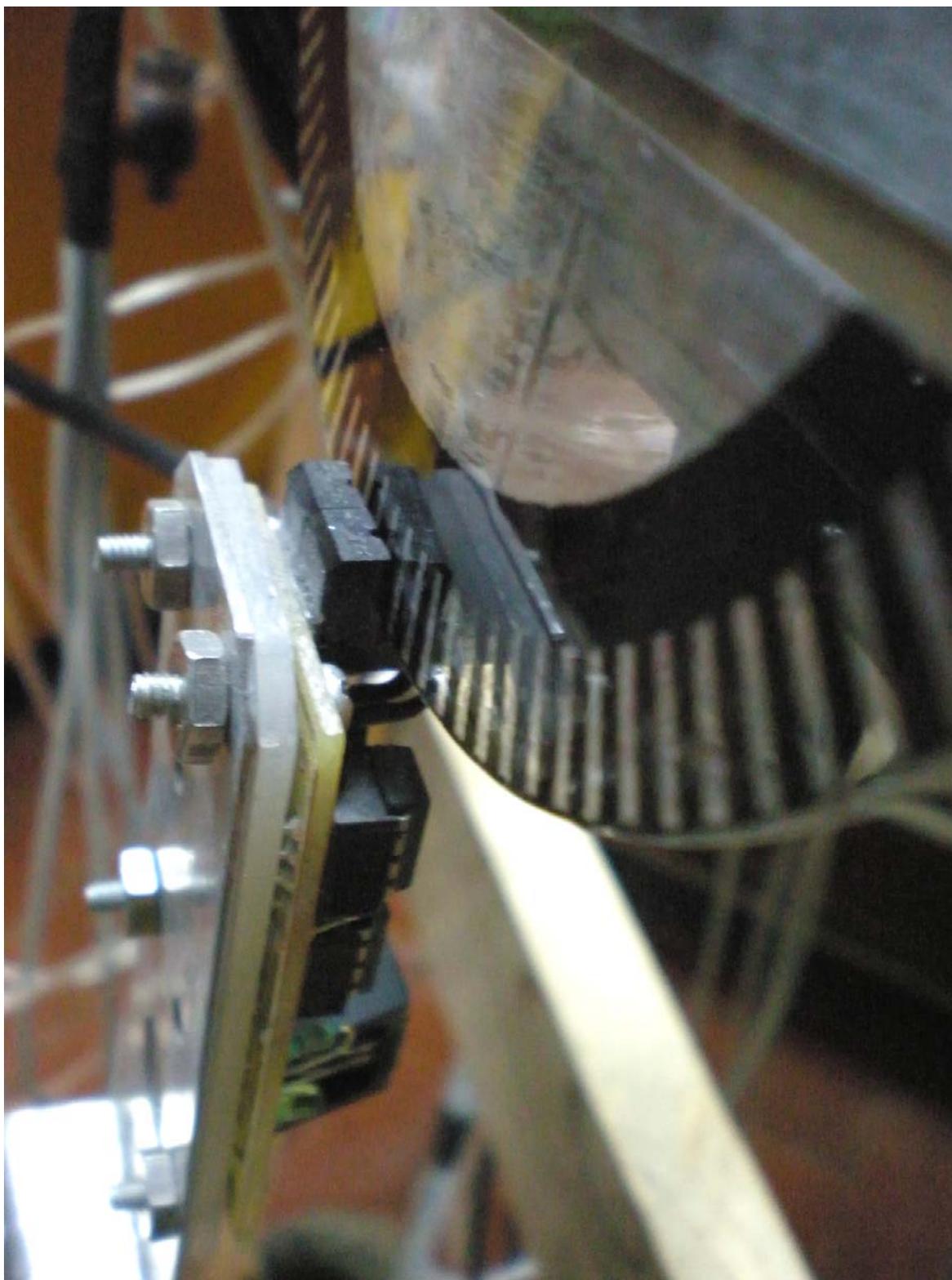


FIGURA 7.11b – Encoder y disco óptico en la articulación de la cadera en prototipo real.

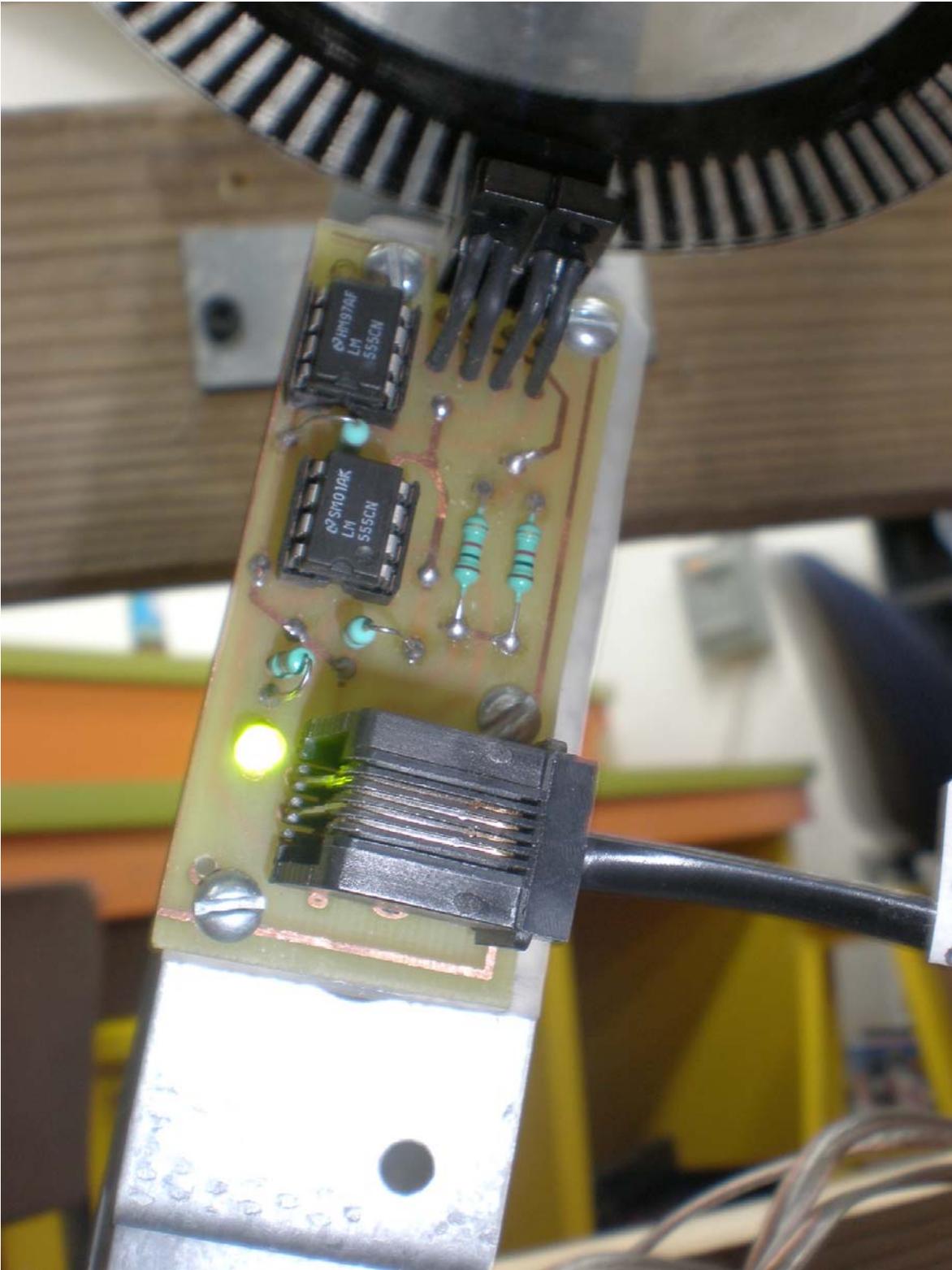


FIGURA 7.11c – Encoder de la cadera en prototipo real.

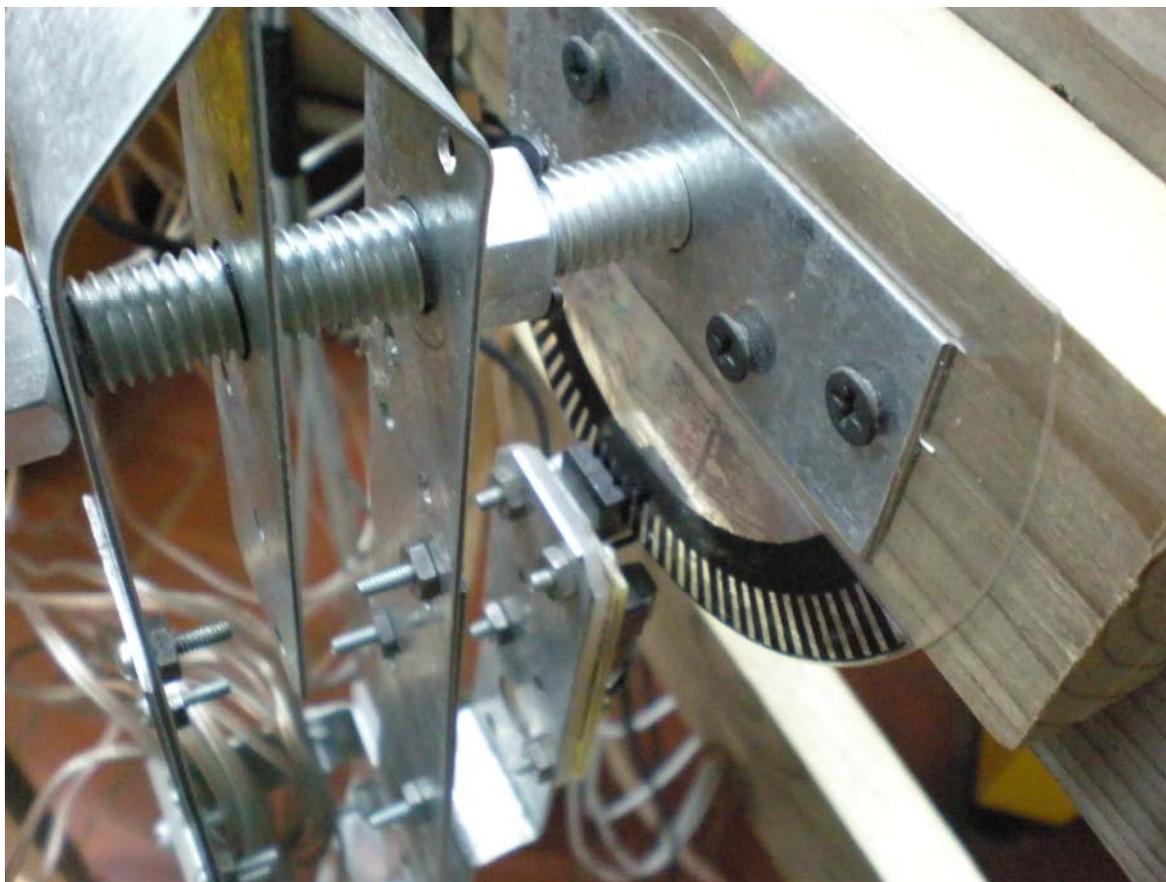


FIGURA 7.11d – Encoder de la cadera en prototipo real

7.1.2 Sensores Infrarrojos IR

Al inicializar el prototipo son necesarios unos sensores que tengan prioridad sobre todos los demás. De esta manera se asegura que al conectar el prototipo siempre comience en la misma posición y resetee los encoders en esa posición conocida, generando siempre una lectura correcta del encoder. Con esto en mente se diseñaron sensores infrarrojos que se encuentran físicamente localizados en las posiciones máxima y mínima de cada articulación. Cada sensor está formado por un LED infrarrojo y un fototransistor (figura 7.12). Cuando la articulación llega a su posición máxima, al alinearse el LED con el fototransistor se manda una señal en alto al FPGA para indicar se ha llegado a la posición final, lo mismo para la posición mínima.

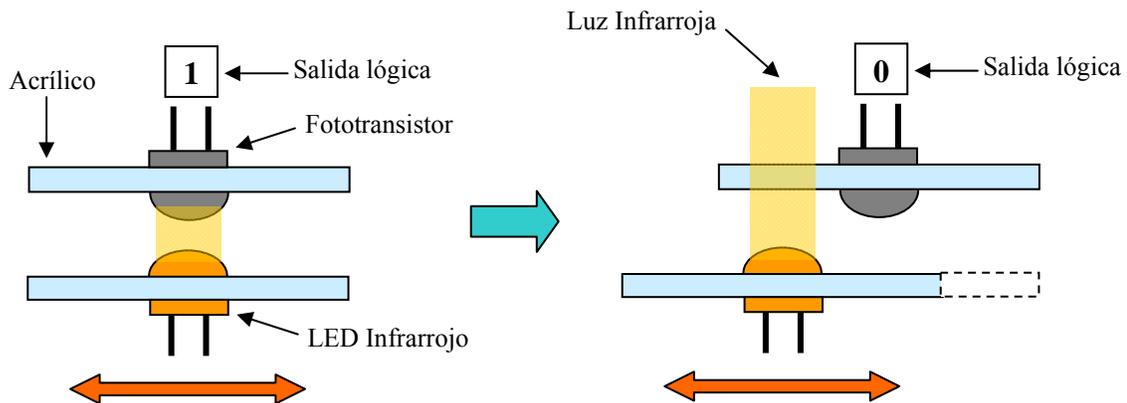


FIGURA 7.12 – Representación de los sensores de tope en las placas de acrílico.

Por otro lado, una vez acabada la inicialización, estos sensores sirven de tope de seguridad para no forzar las articulaciones cuando llegan a su posición máxima. Al alinearse y enviar una señal en alto al FPGA este desactiva la electro-válvula en función para dejar de inyectar aire al pistón y detener el movimiento.

El circuito para este tipo de sensores es muy sencillo (figura 7.13 “a”), básicamente el foto-transistor funciona como un interruptor que activa un transistor NPN 2N2222A generando 5V a la salida, esto es un “1” lógico. Se integró un LED en paralelo con la salida para tener una referencia visual del funcionamiento del sensor cuando se alinea. Por la misma simplicidad del circuito y por el número reducido de componentes, se utilizó una placa de una sola cara para fabricar el circuito impreso (figura 7.13 “b”).

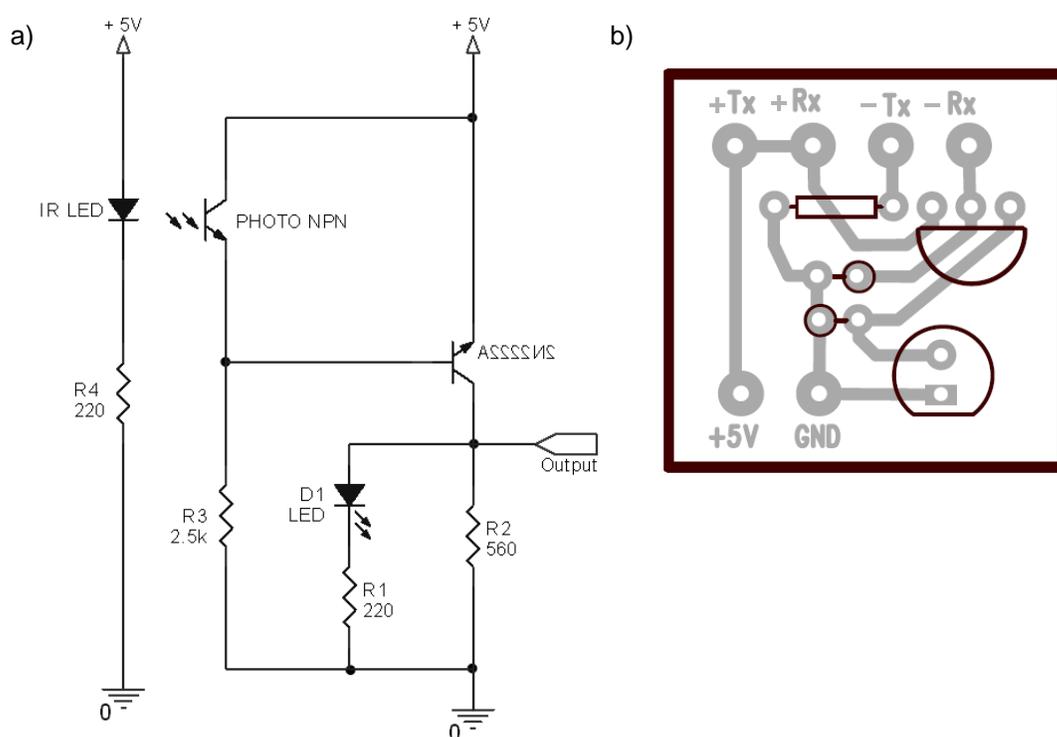


FIGURA 7.13 – (a) Circuito eléctrico para sensor de tope IR (b) Placa impresa.

7.1.2.1 Sensores IR de la Rodilla

Los sensores están montados en el prototipo de tal forma que los dos pares de LED con fototransistor nunca se pueden alinear al mismo tiempo. En esta articulación no existe el caso de forzar el material ya que el ángulo de movimiento ocupa en su totalidad el rango de movimiento del vástago del pistón. Pero igual se utilizan estos sensores para indicarle a la electro-válvula que deje de inyectar aire al pistón en el momento adecuado.

Como se observa en la figura 7.14a, el primer par de sensores solo se alinea cuando la articulación de la rodilla está totalmente extendida, esto significa que el pistón neumático está comprimido al máximo.

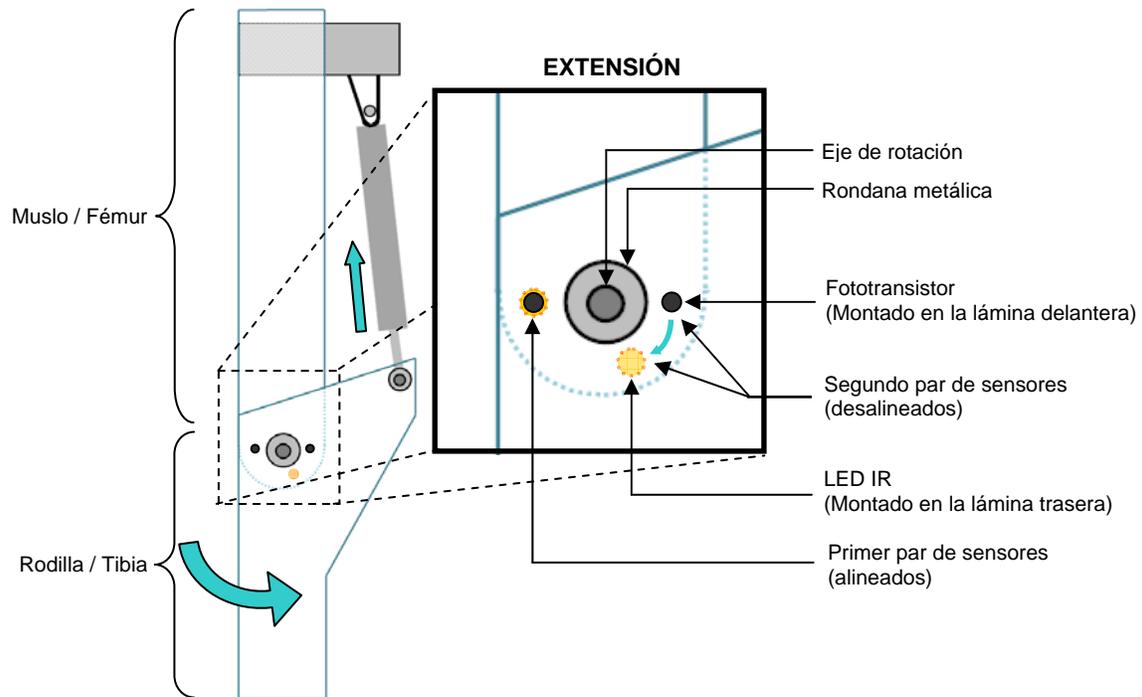


FIGURA 7.14a – Posicionamiento de sensores IR de tope en la articulación de la rodilla.

En la figura 7.14b se observa que el segundo par de sensores solo se alinea cuando la articulación esta completamente flexionada, es decir que el pistón neumático está completamente estirado.

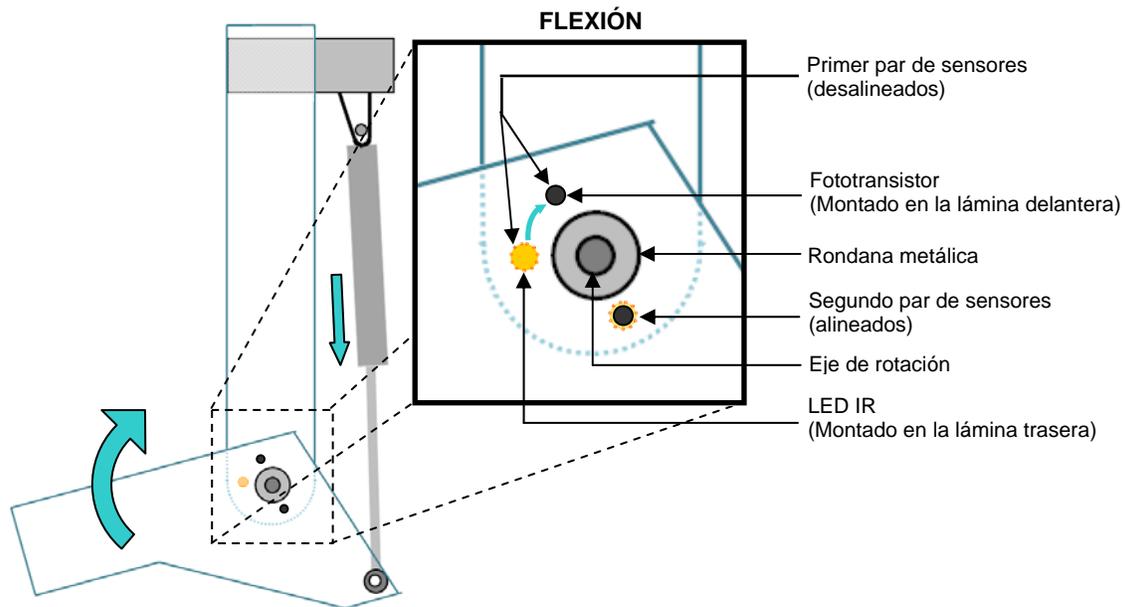


FIGURA 7.14b – Posicionamiento de sensores IR de tope en la articulación de la rodilla.

7.1.2.2 Sensores IR del Tobillo

Del mismo modo que en la rodilla, el tobillo cuenta con dos pares de sensores infrarrojos para las posiciones máximas que puede adoptar el pie. En esta articulación son muy importantes estos sensores ya que no se utiliza la longitud total del vástago. Se debe parar la inyección de aire al pistón antes de que éste se expanda o se contraiga al máximo, de lo contrario, se genera mucha tensión tanto en el pistón como en el material.

Como se observa en la figura 7.15a, el primer par de sensores solo se alinea cuando el pie ha alcanzado su máxima dorsiflexión, esto significa que el pistón neumático se ha estirado lo más que se puede antes de forzar al material.

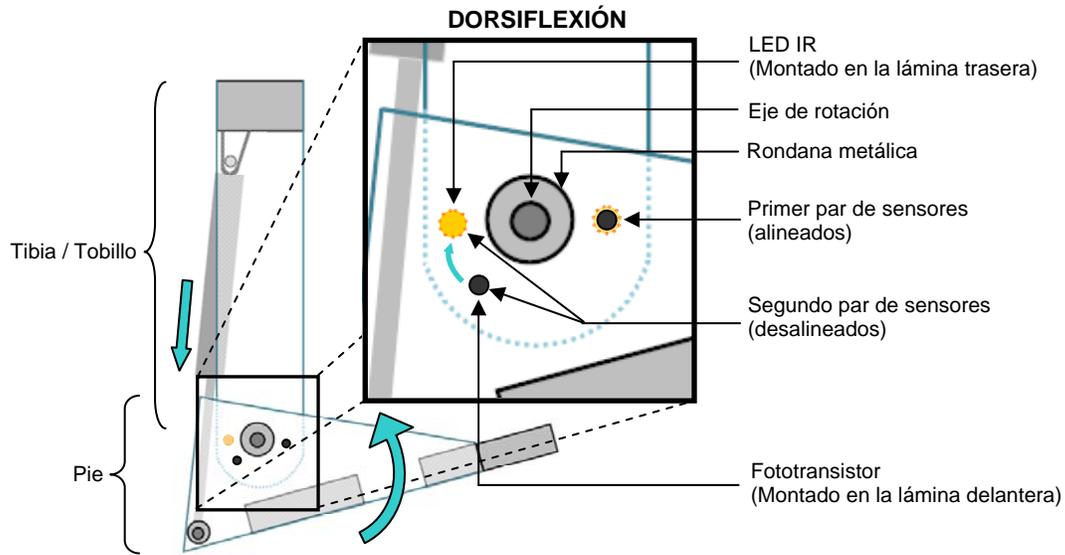


FIGURA 7.15a – Posicionamiento de sensores IR de tope en la articulación del tobillo.

En la figura 7.15b se observa que el segundo par de sensores solo se alinea cuando el pie ha alcanzado su máxima flexión plantar, es decir que el pistón neumático se ha comprimido lo más que se puede antes de forzar al material.

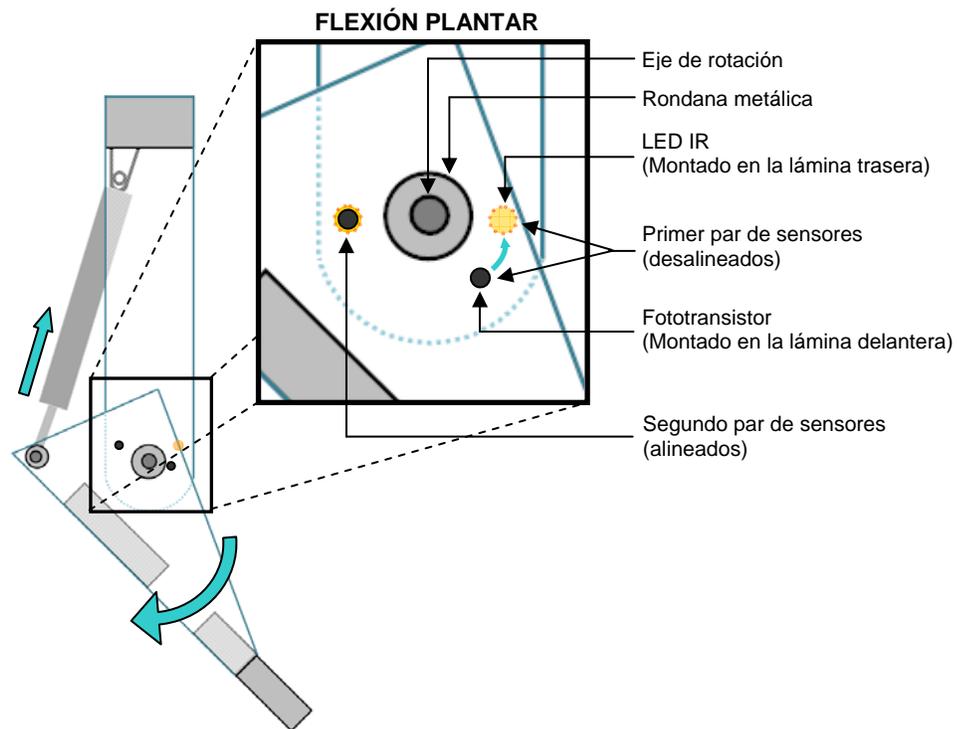


FIGURA 7.15b – Posicionamiento de sensores IR de tope en la articulación del tobillo.

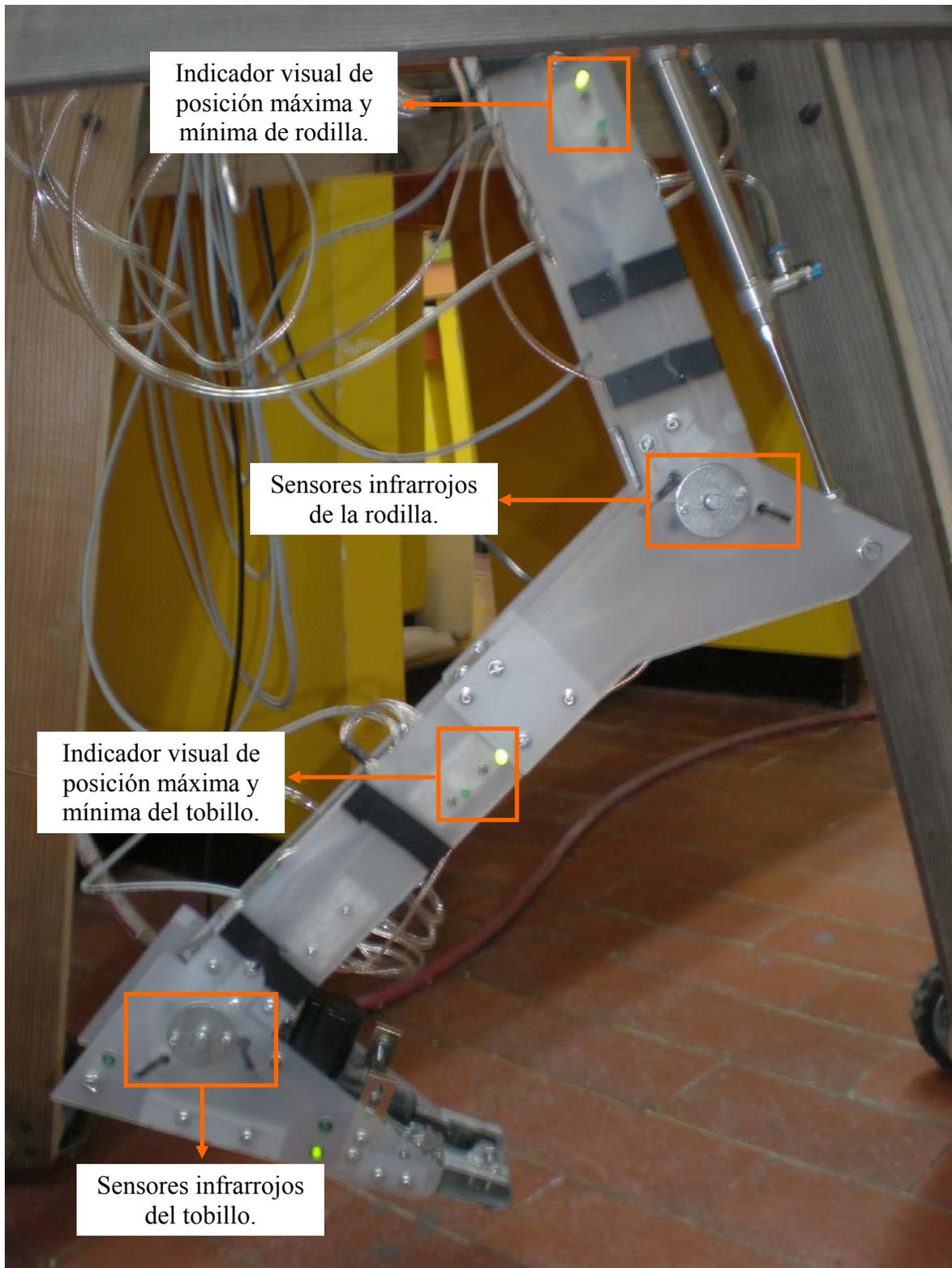


FIGURA 7.15c – Flexión de rodilla y dorsiflexión del pie en el prototipo real.



FIGURA 7.15d – Flexión de rodilla y flexión plantar del pie en el prototipo real.

7.1.3 Sensores de Toque

Finalmente se implementaron sensores de toque al prototipo. Estos sensores se encuentran localizados en dos partes; en el talón para indicar el momento en que la prótesis toca el suelo al dar un paso y en los dedos para indicar si se encuentran arriba o abajo. Para estos sensores se utilizaron dos tipos de interruptores. En el talón se utilizó un push-button normal abierto para timbre de 3A (figura 7.16 “a”) y en los dedos se utilizaron dos micro-interruptores normal abierto de 5A con palanca de lámina y rodaja (figura 7.16 “b”).

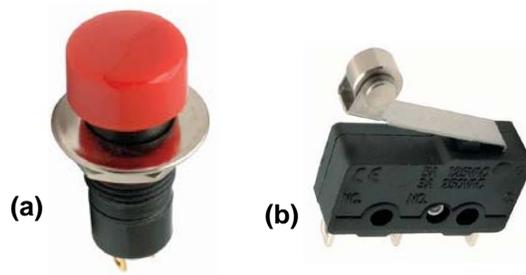


FIGURA 7.16 – (a) Push-button normal abierto utilizado en sensor del talón.
(b) Micro-interruptores normal abierto para sensores de los dedos.

El circuito de estos sensores es aun más sencillo que el de los sensores infrarrojos (figura 7.17). Al presionar el interruptor se obtiene un voltaje en alto de +3.3V a la salida del divisor de voltaje con la resistencia de $1K\Omega$. Este voltaje puede ser enviado directamente a un puerto de entrada del FPGA sin necesidad de un buffer. Nuevamente se tiene un LED conectado en paralelo con la salida para tener referencia visual que el sensor ha sido presionado.

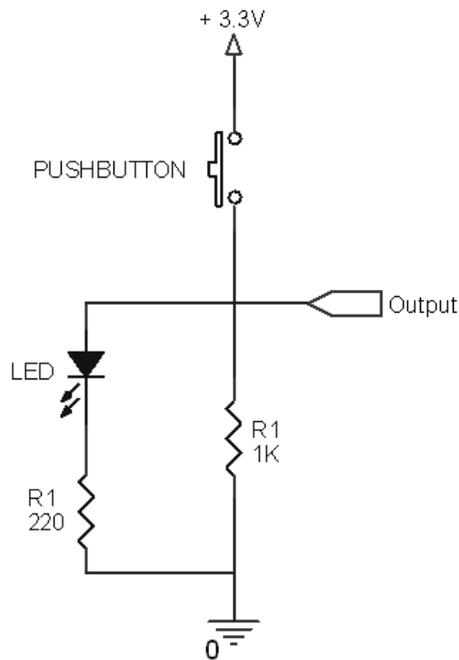


FIGURA 7.17 – Circuito electrónico para sensores de toque.

El circuito impreso que se fabricó incluye los tres sensores del pie y son alimentados por la misma fuente (figura 7.18). De este modo sirve como medio para conjuntar todos los sensores. Utilizando conectores de tornillo se facilita el montaje de cada uno de los interruptores por separado en su localización física sobre el prototipo.

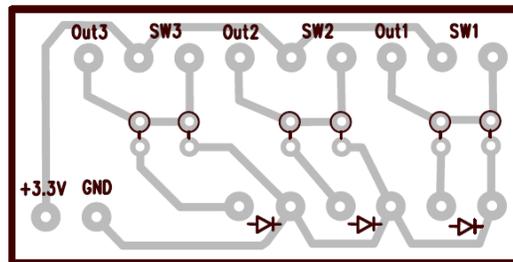


FIGURA 7.18 – Circuito impreso para sensores de presión.

7.1.3.1 Sensores de Toque de los Dedos

En la figura 7.19 se muestra la instalación del interruptor que indica cuando se han extendido los dedos. Al extender el vástago los dedos se extienden y el tornillo de montaje del actuador eléctrico baja por la placa guía y presionan la lámina del interruptor para activarlo. Al contraer el vástago del actuador eléctrico los dedos se flexionan y el interruptor es liberado.

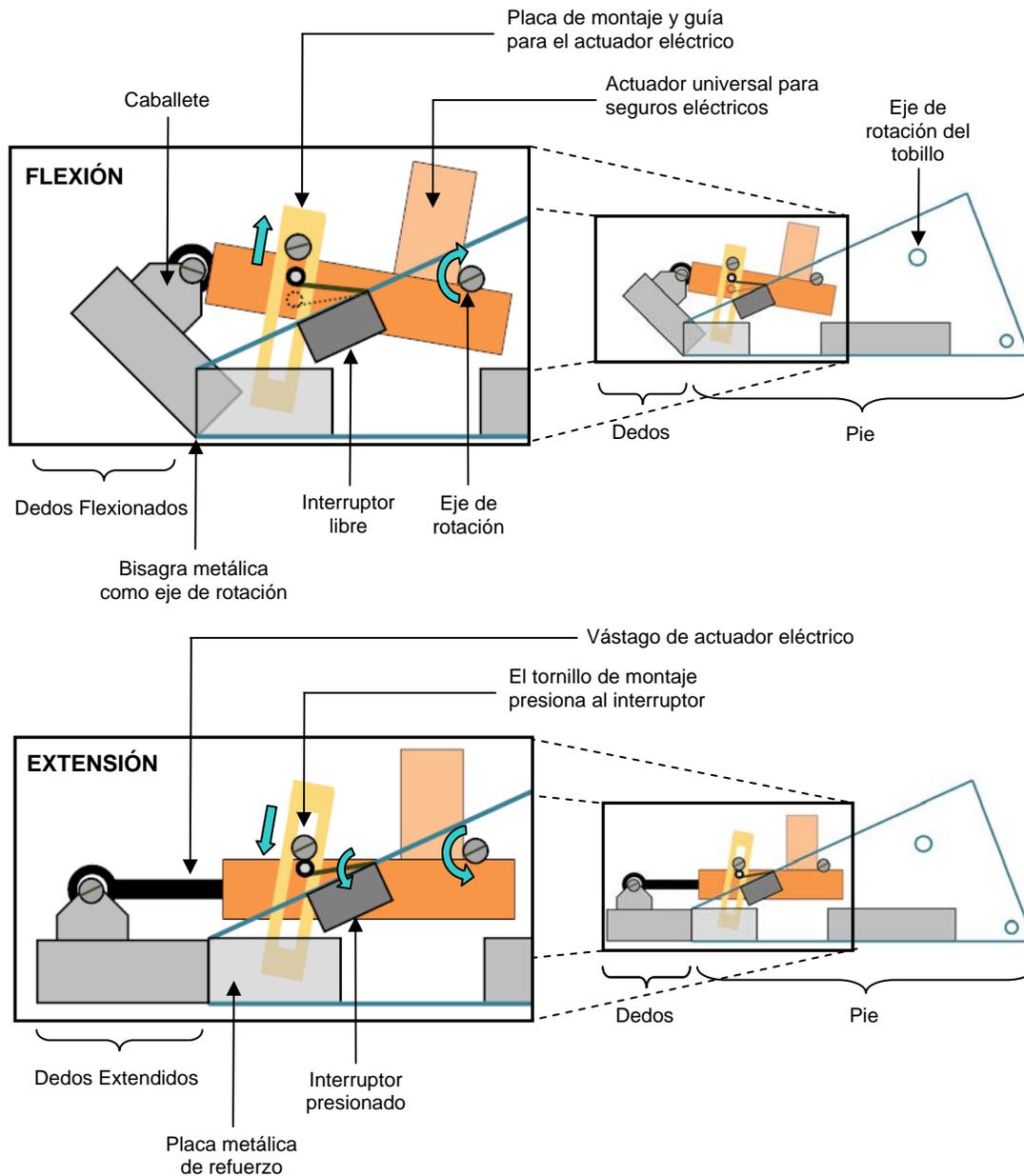


FIGURA 7.19a – Funcionamiento del sensor de toque al extender los dedos del prototipo.

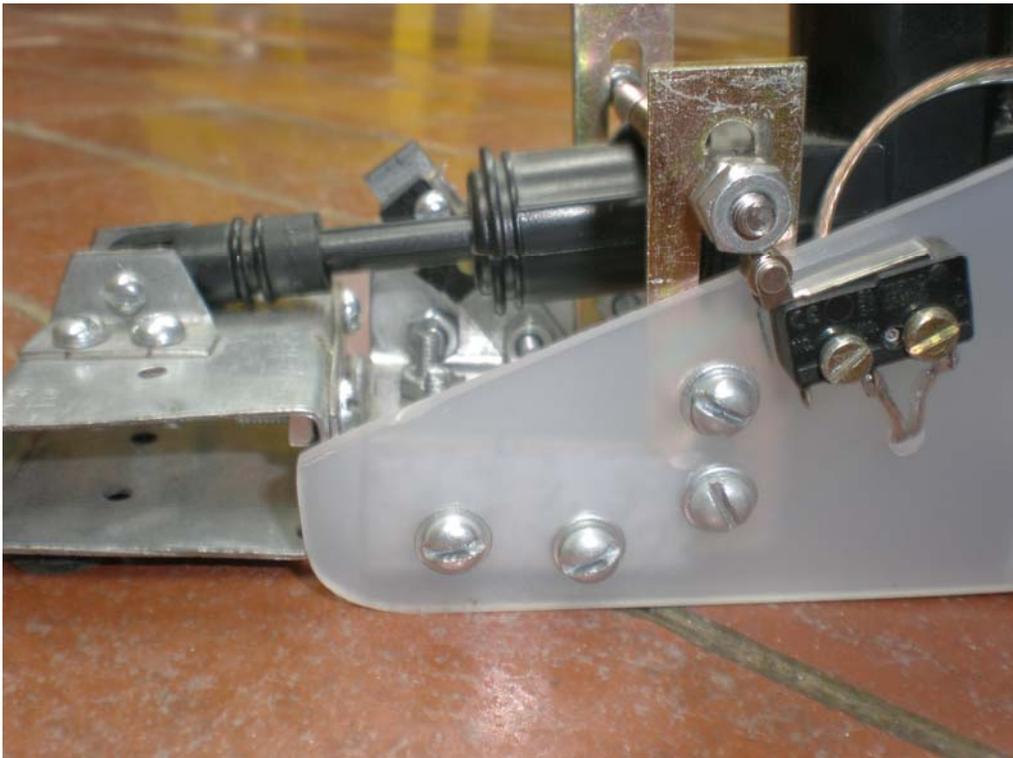
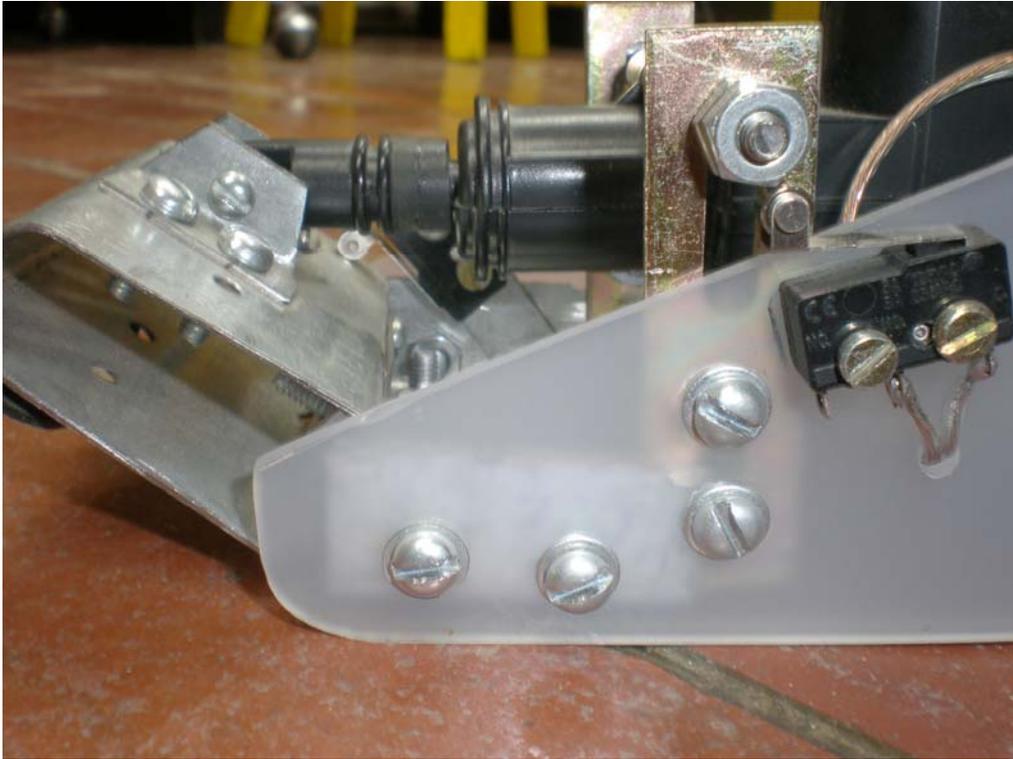


FIGURA 7.19b – Montaje de sensor de toque de extensión de los dedos en el prototipo real.

La figura 7.20 muestra el otro lado del pie, donde también se instaló un interruptor que indica cuando los dedos han sido flexionados. Al contraer el vástago los dedos se flexionan presionando la lámina del interruptor para activarlo. Al extender el vástago del actuador eléctrico los dedos bajan y el interruptor es liberado.

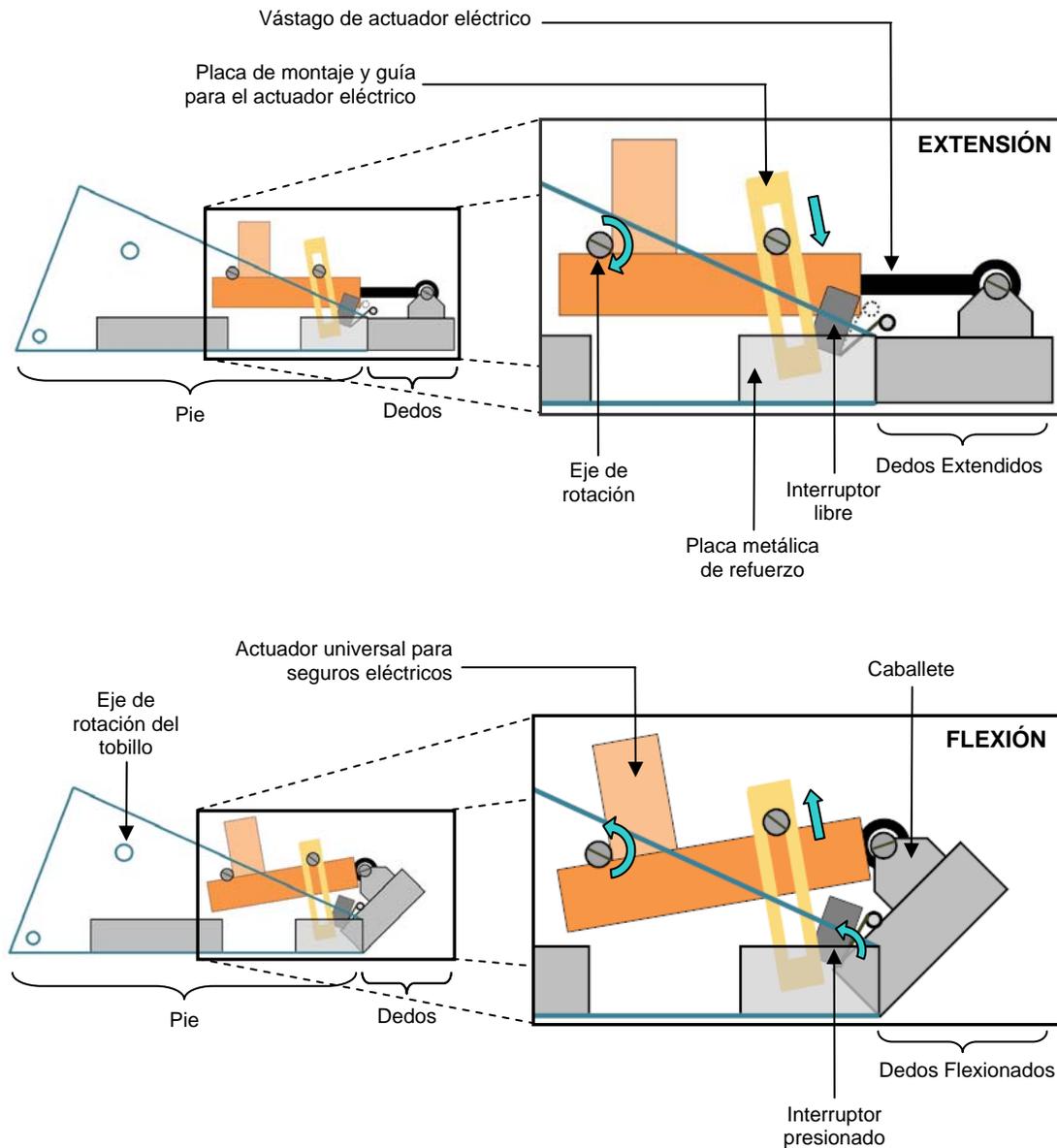


FIGURA 7.20a – Funcionamiento del sensor de toque al flexionar los dedos del prototipo.

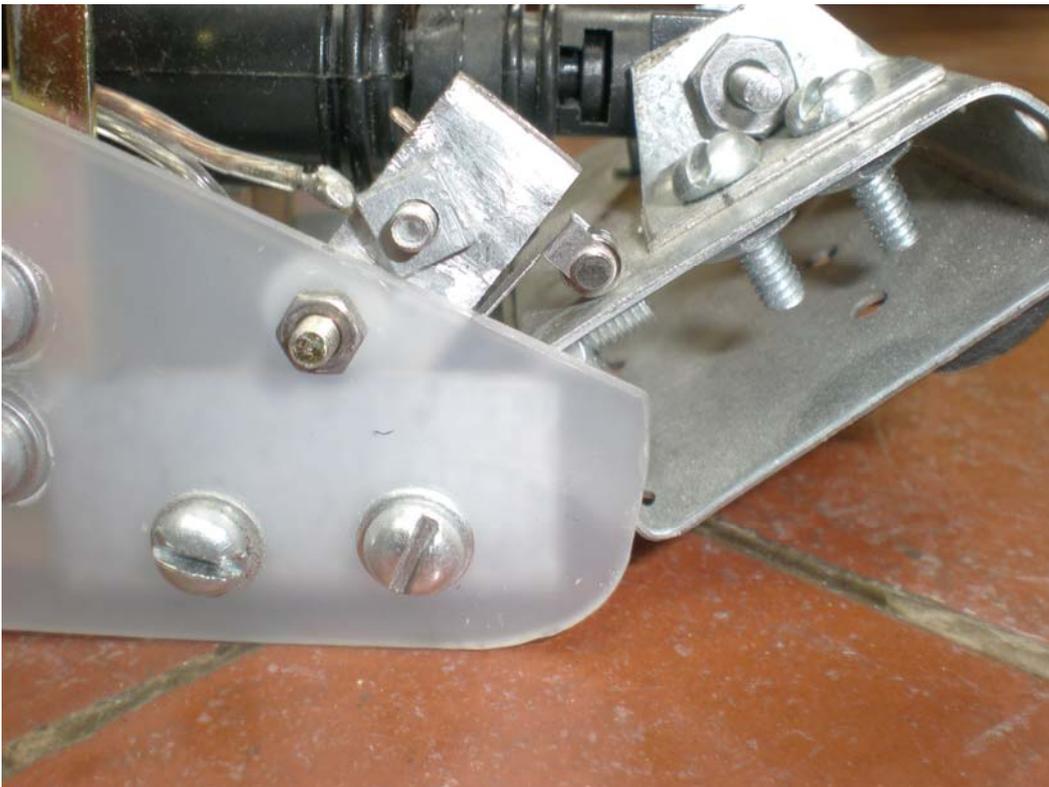


FIGURA 7.20b – Montaje de sensor de toque de flexión de los dedos en el prototipo real.

7.1.3.2 Sensor de Toque del Talón

La figura 7.21 muestra el sensor de toque montado en el talón. El push-button se instaló lo más atrás posible de una de las placas metálicas de refuerzo del pie a la altura correcta para que al hacer contacto el talón del prototipo con el suelo éste se presione sin dificultad.

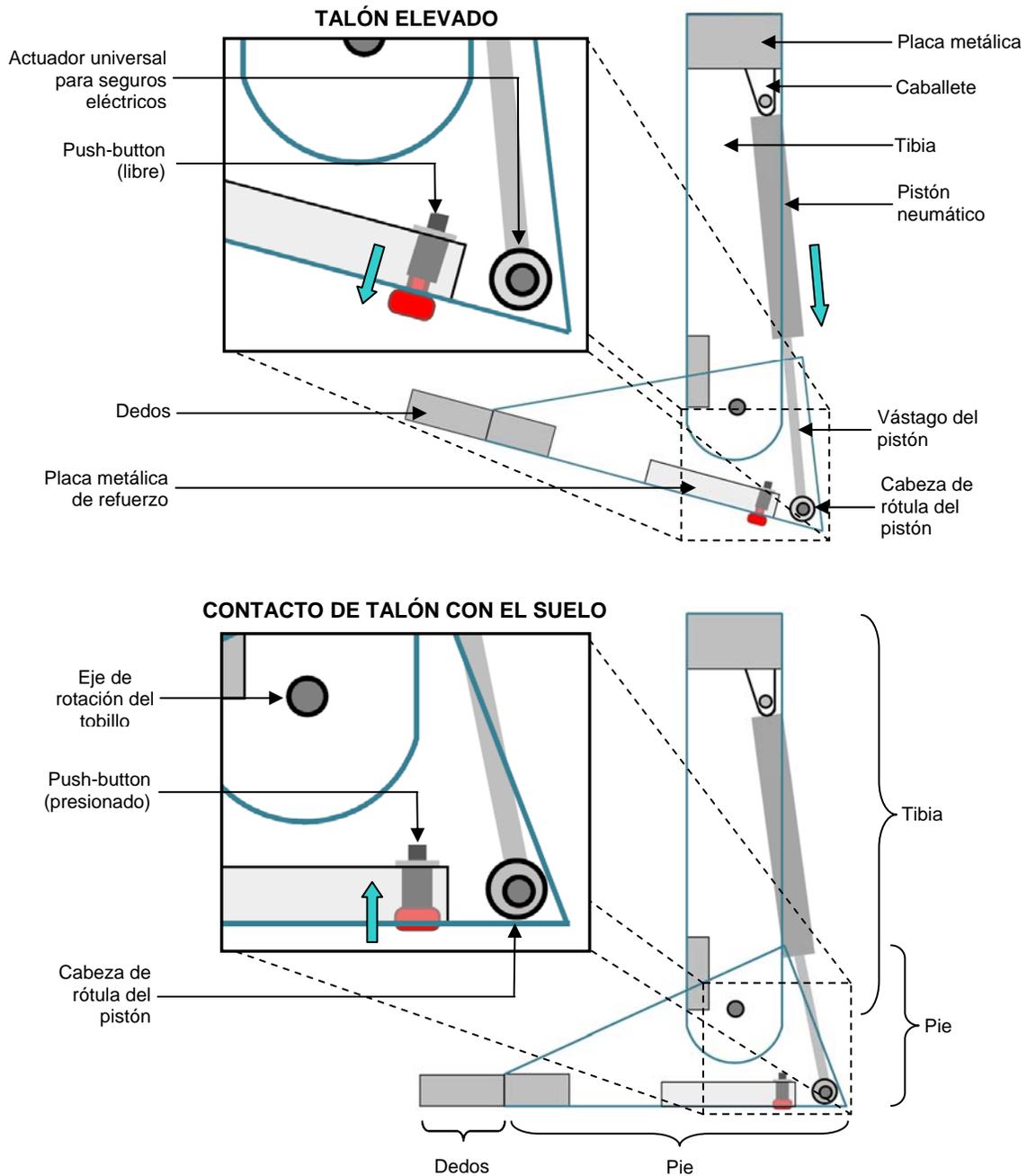


FIGURA 7.21a – Funcionamiento del sensor de presión en el talón al contacto con el suelo.

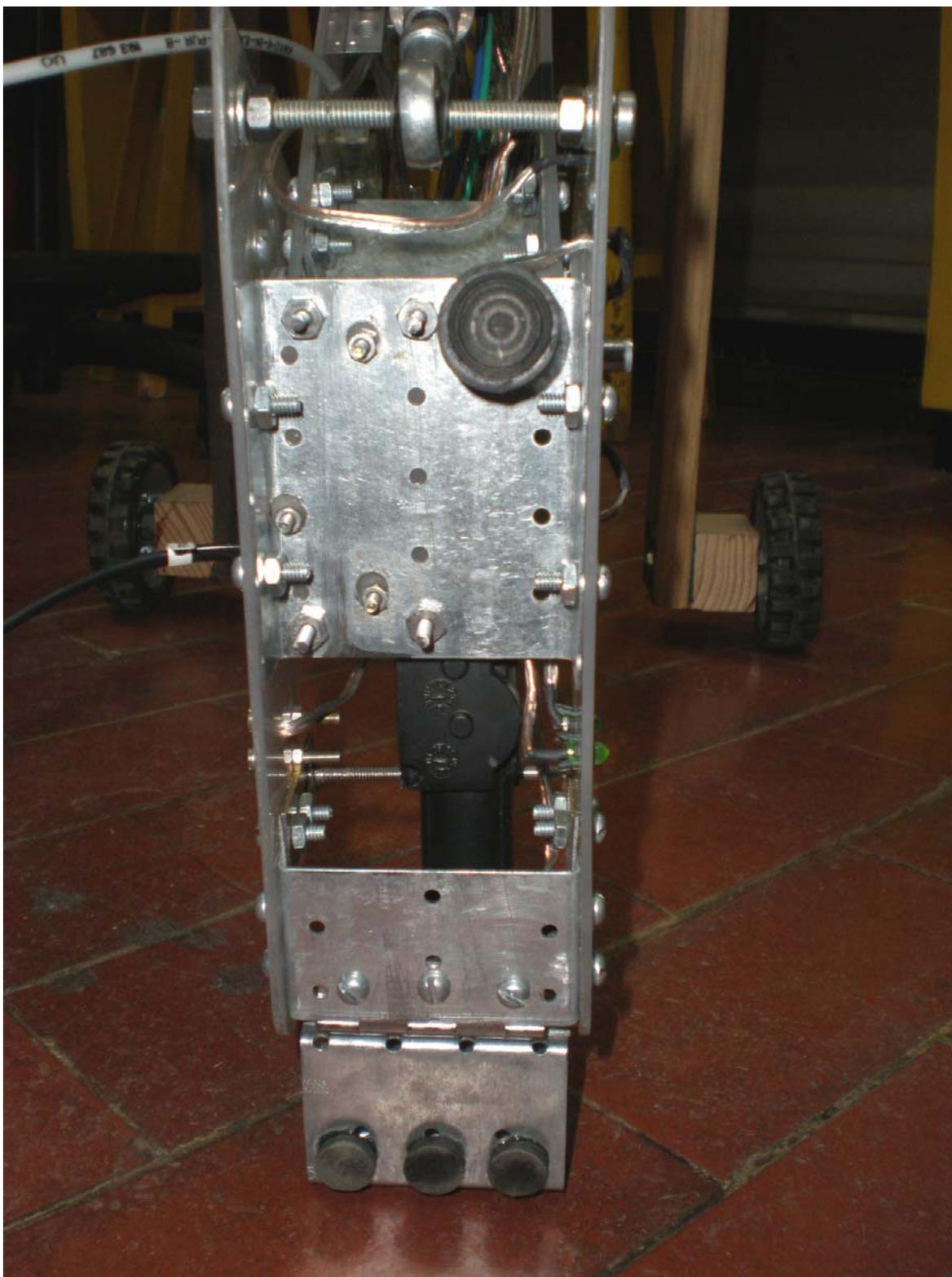


FIGURA 7.21b – Montaje del sensor de toque en el talón del prototipo real.

7.2 Resumen

En este capítulo se menciona la importancia de instalar diferentes sensores en el prototipo ya que es necesario tener una retroalimentación del comportamiento de la prótesis al controlarla. Se menciona la elección de cada uno de los sensores dependiendo de la función que se desea que realicen. Para este prototipo se utilizan tres tipos de sensores (encoders, infrarrojos y de toque) dependiendo el lugar de montaje.

Las señales generadas por el conjunto de sensores serán usadas por sistema digital basado en el FPGA, determinar los movimientos que debe ejecutar el prototipo neumático en cada momento de la marcha. En el siguiente capítulo se describirá la arquitectura y las funciones del sistema digital de control.