Technical Report

IRI-DT-10-08

Diseño de un pie para un robot humanoide

Guillermo Barbadillo
Guillem Alenyà

Julio-Agosto 2010

Institut de Robòtica i Informàtica Industrial

Índice general

1. Introducción **3**
1.1. Antecedentes 3
1.2. Objetivos 4
1.3. Partes del trabajo 4
1.4. Estado del arte 4
1.5. Cambios a introducir en el nuevo pie 6

2. Electrónica y Acondicionamiento de Señal **7**
2.1. Electrónica 7
2.2. Dimensionando la resistencia de la placa electrónica 8
2.3. Nueva placa electrónica 9
2.4. *Zero Moment Point* 10
2.5. Incertidumbre en el cálculo del ZMP 12

3. Diseño Mecánico **13**
3.1. Prototipo 1 13
3.1.1. Filosofía del primer prototipo 13
3.1.2. Problemas del primer prototipo 14
3.2. Prototipo 2 14
3.2.1. Cambios introducidos en este prototipo 14
3.2.2. Filosofía del segundo prototipo 14
3.3. Prototipo 3 15
3.3.1. Cambios introducidos en este prototipo 15
3.3.2. Filosofía del tercer prototipo 15
3.3.3. Problemas del tercer prototipo 16
3.4. Prototipo 4 16
3.4.1. Filosofía del cuarto prototipo 16
3.4.2. Muelle 17
3.5. Prototipo 5 17
3.5.1. Muelle 17
3.6. Prototipo 6 17
3.6.1. Cambios introducidos 17
3.6.2. Muelle 18
3.7. Prototipo 7 18
3.7.1. Muelle 18

4. Experimentación con los prototipos **21**
4.1. Análisis de los prototipos. Prueba de los Quince Puntos 21
4.1.1. Resultados eje x 22
4.1.2. Resultados eje y 22
4.1.3. Medida individual de cada sensor 24
4.2. Comparación Cuatro-Cinco Sensores 24
4.3. Probando el pie con Twiki 27

5. El Prototipo VI a fondo **28**

6. Programación **32**

7. Conclusiones **34**

8. Bibliografía **35**

9. Anexo 1. Piezas del pie **37**

10. Anexo 2. Tablas de cálculos de incertidumbre del ZMP **44**

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La propuesta se enmarca dentro del proyecto Humanoid Lab del Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (IRI). El grupo dispone de múltiples plataformas humanoides educativas (Robonova y Bioloid). Existe una primera versión de un sistema de realimentación de fuerza para los pies de estos robots, desarrollada en el propio grupo, que funciona correctamente pero presenta algunas deficiencias y limitaciones que se pretenden subsanar.

El robot con el que se va a trabajar es Twiki.Figure 1.1 on page 3, una versión de robonova muy mejorada. Twiki es un robot antropomórfico, lo que quiere decir que tendrá los mismos sentidos que un ser humano. Twiki nunca podrá tener cámaras en las manos o en los pies, solo podrá tenerlas en la cabeza. Por esta razón los pies de Twiki son muy importantes ya que le permitirán detectar obstáculos como las escaleras que de otra manera no podría mantener el equilibrio.

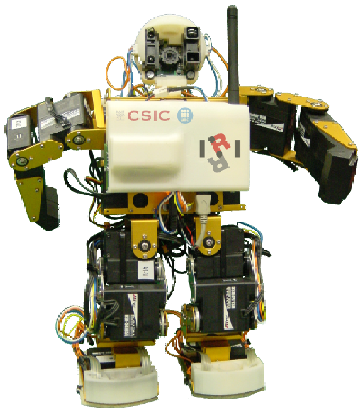


Figura 1.1: Twiki vestido de gala

1.2. Objetivos

Diseñar e implementar un nuevo sistema de sensores del pie que cumpla con las siguientes especificaciones:

- Ser capaz de detectar la dirección de aplicación de la fuerza sobre la planta del pie.
- Ser capaz de detectar contactos puntuales con posibles obstáculos.
- Proporcionar al robot la capacidad de adaptarse al terreno detectando irregularidades en el mismo.
- El sistema tiene que ser robusto y fiable. Integración del sensor desarrollado dentro de la arquitectura hardware y software utilizadas en el grupo.

1.3. Partes del trabajo

La tarea se ha dividido en los siguientes apartados:

- Diseño de la electrónica necesaria para recibir la información de los sensores. Existe una placa electrónica capaz de admitir hasta cuatro sensores y deberemos ampliarla para que pueda aceptar ocho.
- Diseño mecánico del pie. Tendremos que construir un pie que albergue los sensores y tenga las estructuras necesarias para transmitir las fuerzas a los sensores. Deberemos ceñirnos al tamaño de pie ya existente y respetar la conexión con el servo que ocupa gran tamaño.
- Elaboración de un programa informático para poder almacenar y observar la salida de los sensores. El programa será fundamental para poder recoger datos y evaluar el funcionamiento de los prototipos.

1.4. Estado del arte

Existe un pie con cuatro sensores de presión en la suela y dos sensores frontales. La mecánica que alberga los sensores frontales funciona correctamente y en principio no debe ser modificada. El problema lo presentan los propios sensores que como se ve en la siguiente imagen tienen una cola muy alargada que no puede ser cortada como se ve en la Figure 1.2 on page 5.

La cola es bastante frágil y ciertos movimientos del robot la seccionaban. La función de los sensores frontales es la de poder detectar obstáculos y más específicamente la de detectar el peldaño de una escalera ya que el robot Twiki participa en una competición de subir y bajar escaleras. Pueden verse los sensores frontales en la Figure 1.3a on page 5.

Los sensores de la suela, que se ven en la Figure 1.3b on page 5, tienen la función de detectar cuando no hay más suelo y hay que bajar la escalera. Con ese objetivo se colocan cuatro sensores en formación rectangular, dos adelante y dos atrás y contactan con el suelo con dos placas independientes una para adelante y otra para atrás. La información que transmiten esos sensores es de todo o nada ya que están configurados electrónicamente para ello y su funcionamiento también

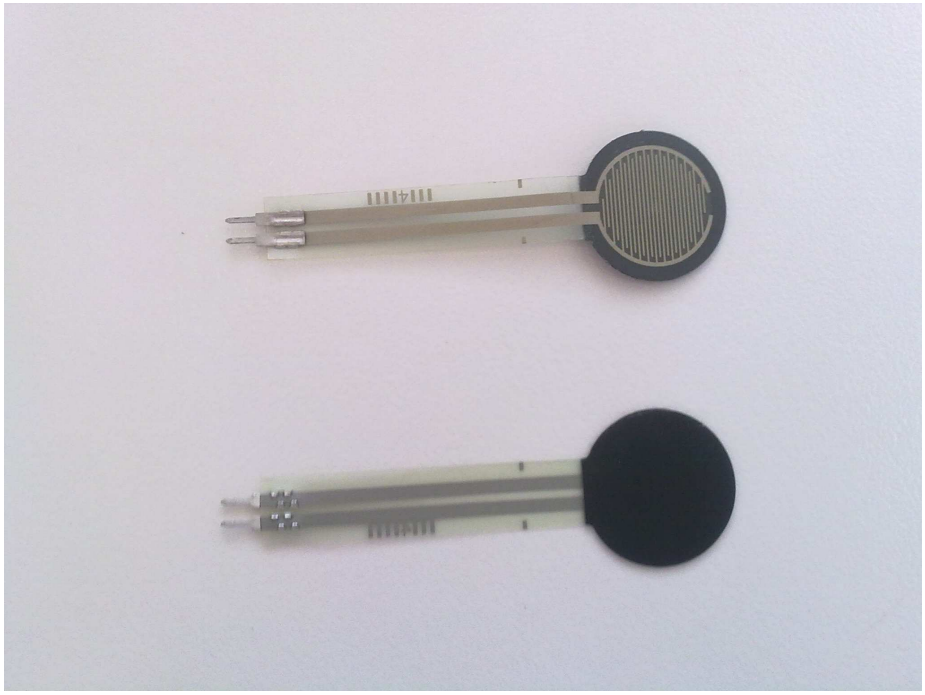
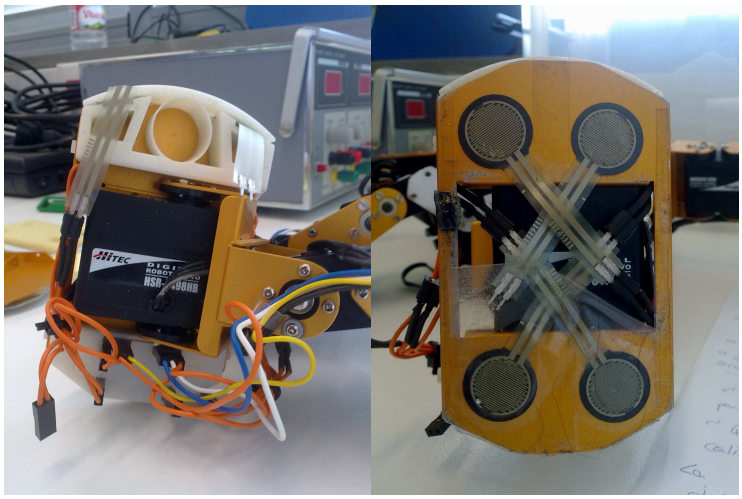


Figura 1.2: Sensor FSR visto por arriba y por abajo

es correcto. Pero presentan dos inconvenientes: el primero es que las chapas que tocan el suelo están unidas con pegamento y siempre acaban soltándose. El segundo es que no permite calcular la normal de la fuerza por ser un sistema de todo o nada debido a la electrónica y a su diseño mecánico.



(a) Sensores delanteros del pie (b) Sensores de la planta del pie

Figura 1.3: Pie existente de Twiki

1.5. Cambios a introducir en el nuevo pie

- Se va a aumentar el número de sensores a ocho. Cuatro estarán situados en la base del pie, dos estarán en la parte frontal, uno estará en el lateral y el último en la parte trasera. Esto permitirá a Twiki detectar obstáculos laterales y traseros. Solo tiene un sensor lateral porque en el lado interior se encuentra el otro pie y como la electrónica existente se quiere mantener y solo tiene ocho canales prescindimos del sensor en el lado interior del pie.
- La electrónica debe modificarse para que acepte los ocho sensores, antes solo aceptaba cuatro.
- El pie debería ser lo más robusto posible, a ser posible de una sola pieza.

Capítulo 2

Electrónica y Acondicionamiento de Señal

2.1. Electrónica

Vamos a utilizar sensores de presión FSR cuya hoja de características se puede consultar en la página web de Interlink Electronics [1]. Estos sensores se basan en una resistencia variable según la presión ejercida sobre ellos como se puede ver en la Figure 2.1 on page 7.

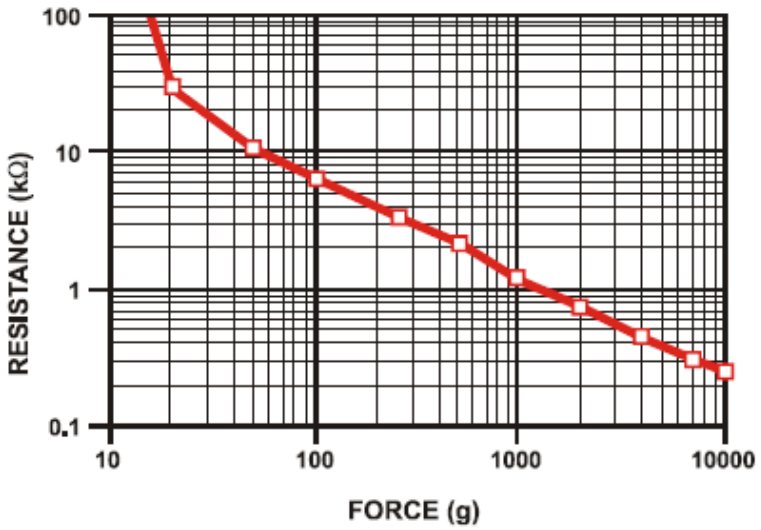


Figura 2.1: Variación de la resistencia respecto a la fuerza

La electrónica que vamos a implementar tiene la función de convertir ese cambio de resistencia en una señal que nosotros podamos utilizar. La electrónica ya estaba diseñada por Sergi Hernández [2] y se puede consultar su funcionamiento y principios en el primer anexo. En la Figure 2.2 on page 8 se

puede ver un esquemático del circuito.

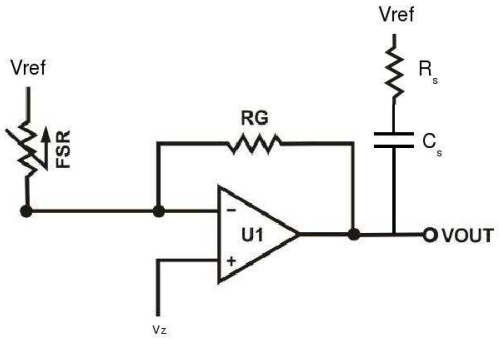


Figura 2.2: Esquema del circuito

La salida que vamos a obtener va a depender directamente de la resistencia RG. Cuanto mayor sea la resistencia obtendremos una resolución mayor pero en contraprestación el rango de medidas será menor. Debe determinarse adecuadamente el peso con el que va a trabajar el sensor para poder escoger la resistencia

2.2. Dimensionando la resistencia de la placa electrónica

La elección de la resistencia que vamos a colocar en la electrónica será fundamental para el buen funcionamiento del del pie. Para ver que resistencia va a ser la más adecuada vamos a realizar una simulación con el ordenador. Conocemos la variación de la resistencia con respecto a la fuerza como se veía en la Figure 2.1 on page 7. Sabiendo esto vamos a calcular la salida que tendríamos en el circuito electrónico dependiendo de la resistencia RG que elijamos y lo representamos en la Figure 2.3 on page 9.

En la gráfica se puede apreciar que al disminuir el valor de la resistencia RG vamos a poder medir en un rango de medidas más grande pero a cambio vamos a perder resolución. A nosotros nos interesa tener la máxima resolución en nuestro rango de medidas.

Sabemos que el robot pesa unos 2 kg y solo en una situación muy desfavorable un sensor recibirá todo el peso. Antes se usaba la resistencia de 4,7 kΩ pero como vemos en la gráfica nos daría una resolución muy baja. Usando la resistencia de 4,7 kΩ podríamos llegar a medir hasta casi 6 kg. Por disponibilidad y porque se adecua también al peso del robot vamos a usar la resistencia de 10 kΩ. Con esta resistencia podremos medir hasta unos 2100 gramos.

Es posible que cuando se realicen pruebas con el sensor se vea que un sensor no recibe más de 1000 gramos en todo el recorrido. Si ese fuera el caso deberíamos escoger otra resistencia que nos diera mayor precisión. Podemos ver otras resistencias posibles en la Figure 2.4 on page 9. Quizá se podría utilizar una resistencia de 22 kΩ teniendo en cuenta que lo más probable es que siempre haya dos sensores apoyados y el peso se reparta entre ellos.

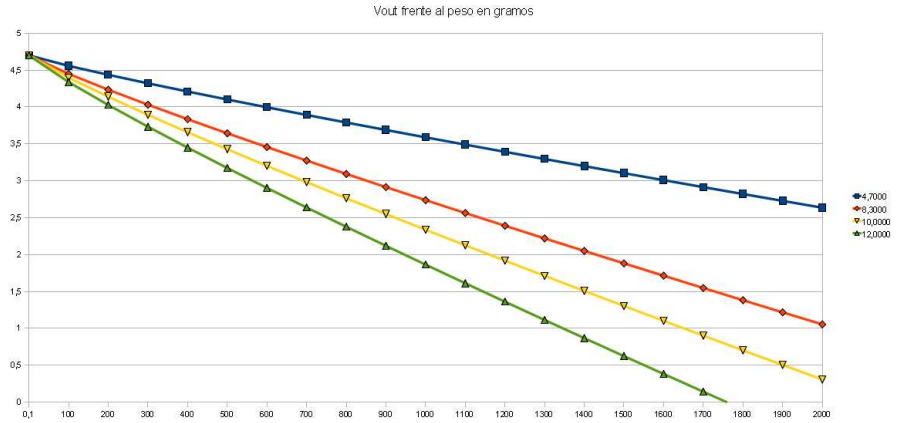


Figura 2.3: En el eje horizontal la masa en gramos y en el vertical la salida de voltaje en voltios. Se representa la salida que obtendríamos con cada una de las resistencias. Una vez que la salida es menor que cero dejamos de obtener información porque todo voltaje negativo al convertirlo en señal digital se transforma en voltaje nulo.

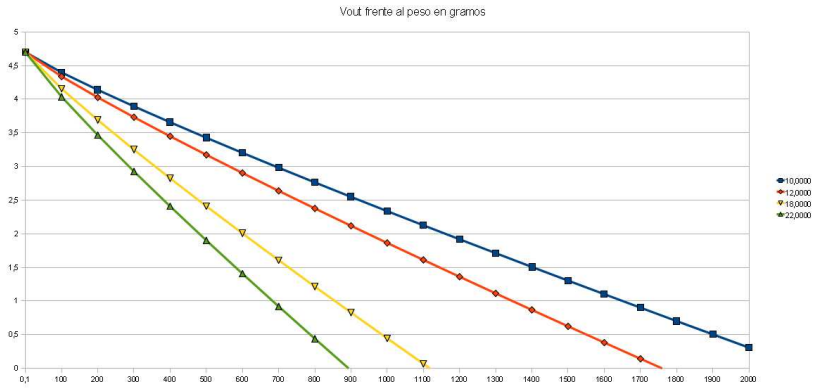


Figura 2.4: En el eje horizontal la masa en gramos y en el vertical la salida de voltaje en voltios. Elegir una resistencia mayor nos va a asegurar una medida más precisa de la resistencia del FSR pero a cambio vamos a hipotecar el rango de medida.

2.3. Nueva placa electrónica

La electrónica que usamos actualmente utiliza un bus *I2C* para transformar la señal analógica en digital. El *I2C* admite hasta ocho canales de entrada, de los que solo estábamos utilizando cuatro. El tamaño de la anterior placa electrónica ya era importante como se puede ver *Figure 2.5 on page 10* aún teniendo solo el acondicionamiento de señal para cuatro sensores.

La nueva placa capaz de admitir ocho sensores no podía ser mucho mas grande que la otra por razones de espacio. Por eso decidimos hacer una configuración de sandwich. La placa iba a ser mucho más alta pero la superficie

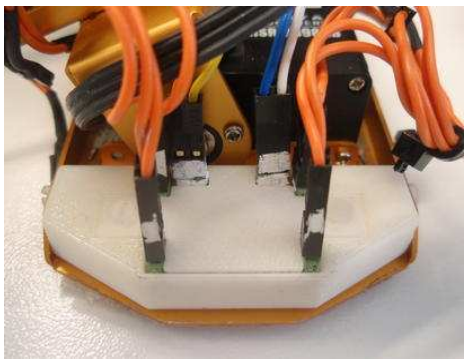


Figura 2.5: Antiguo espacio reservado a la electrónica

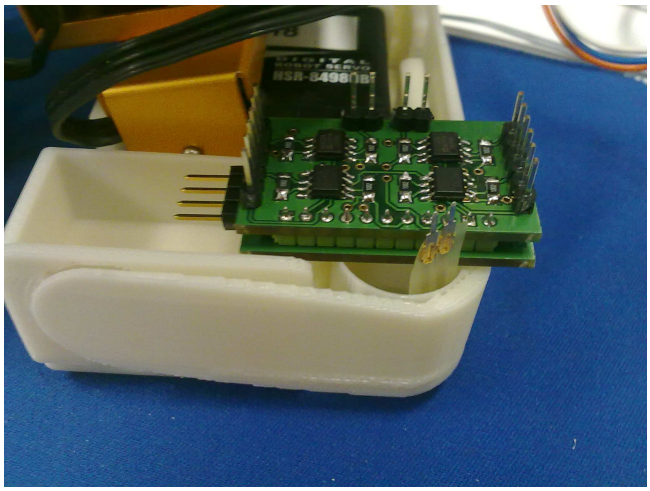


Figura 2.6: La nueva placa sandwich junto a su ubicación

ocupada no sería mucho mayor. En la placa de arriba colocaríamos todo el acondicionamiento de los ocho sensores y en la placa de abajo situaríamos el conversor analógico-digital. Podemos ver el resultado final en la Figure 2.6 on page 10.

2.4. *Zero Moment Point*

El *Zero Moment Point* es un concepto relacionado con la dinámica que se utiliza en el control de robots humanoides. Es el punto de contacto con el suelo en el que las fuerzas de contacto no producen momento. Su utilidad radica en que una vez calculado nos informa de la estabilidad del robot. Si el ZMP está centrado el robot será estable pero si esta en los extremos el robot caerá. Se entiende mejor en la Figure 2.7 on page 11. Una explicación más extensa se puede encontrar en el Proyecto de Master de Sergi Culubret[3].

El calculo del ZMP se realiza de la siguiente manera. Obtenemos la fuerza que está recibiendo cada sensor y la multiplicamos por la distancia del sensor al origen. Sumamos los productos y lo dividimos entre la suma de fuerzas. Vamos

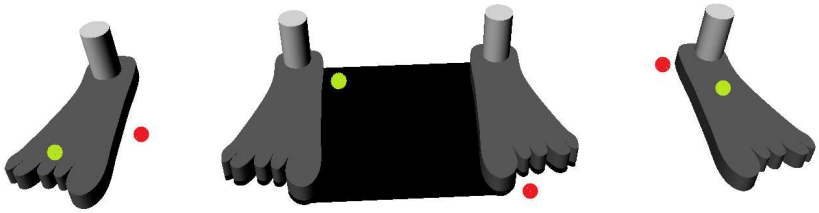


Figura 2.7: Los puntos verdes representan ZMP estables y los rojos inestables

a ver como se calcula el ZMP para el pie de la Figure 2.8 on page 11.

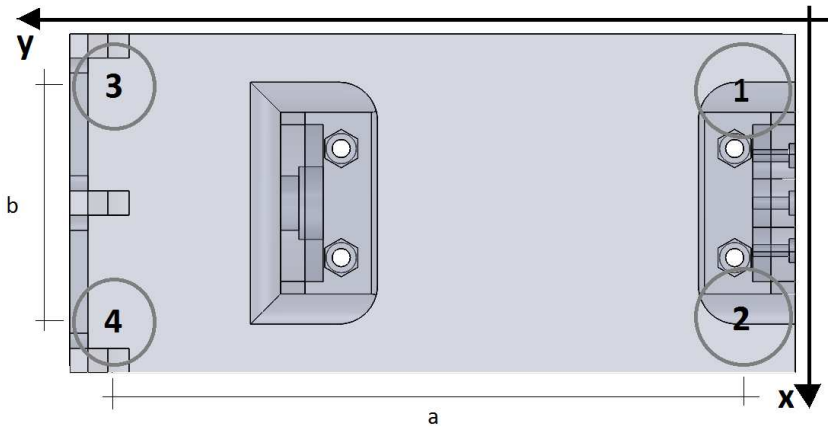


Figura 2.8: Los círculos numerados representan los sensores y "a" y "b" son las distancias entre centros

Podemos situar la posición del ZMP con dos coordenadas por estar en un plano. La componente en X se calcula como

$$X_{ZMP} = b\left(1 - \frac{Fz_A}{Fz_A + Fz_B}\right) = b\frac{Fz_B}{Fz_A + Fz_B}, \tag{2.1}$$

siendo

$$Fz_A = F_{Z1} + F_{Z3} \tag{2.2}$$

y

$$Fz_B = F_{Z2} + F_{Z4}. \tag{2.3}$$

La componente en Y se define como

$$Y_{ZMP} = a\left(1 - \frac{Fz_A}{Fz_A + Fz_B}\right) = a\frac{Fz_B}{Fz_A + Fz_B}, \tag{2.4}$$

siendo

$$Fz_A = F_{Z2} + F_{Z3} \tag{2.5}$$

y

$$Fz_B = F_{Z1} + F_{Z4}. \tag{2.6}$$

Como la medida del sensor tiene un error intrínseco el calculo del ZMP tendrá una incertidumbre que vamos a calcular ahora.

2.5. Incertidumbre en el cálculo del ZMP

En las hojas de características del FSR nos dicen que los sensores presentan una tolerancia de $\pm 25\,\%$. A partir de este dato vamos a determinar numéricamente la incertidumbre que podemos aceptar en el cálculo del ZMP. Para ello realizaremos el siguiente experimento virtual. Daremos arbitrariamente un valor inicial a la resistencia de cada sensor. Con esos valores calcularemos el correspondiente ZMP. Seguidamente alteraremos los valores iniciales siempre dentro de los márgenes de tolerancia y calcularemos los nuevos ZMP. Finalmente veremos la desviación que se ha producido respecto al ZMP real al añadir las posibles variaciones debido a la tolerancia.

Se pueden encontrar las tablas de cálculos en el Capítulo10.

Hemos obtenido las siguientes conclusiones:

- La incertidumbre teórica en el cálculo del ZMP es independiente de la fuerza total ejercida sobre los sensores. Tendremos la misma precisión con un peso de 100g que con un peso de 5kg
- La máxima incertidumbre se da en el centro del pie por ser la distancia máxima a los sensores. A raíz de este hecho surge la idea de colocar un quinto sensor situado en el centro para reducir la incertidumbre en esa posición.
- Utilizando cuatro sensores tenemos que la incertidumbre en el eje x será de 5.29mm y en el eje y será 8.9mm
- Utilizando cinco sensores tenemos que la incertidumbre en el eje x será de 4.48mm y en el eje y será 7.54mm. No obstante hay que tener en cuenta que del calculo teorico de la incertidumbre cuando usamos cinco sensores no podemos decir que sea tan fiable como el obtenido para cuatro sensores. Esto es asi porque hemos considerado que ejerciendo una fuerza en el centro del pie los cinco sensores se cargan por igual cuando en la realidad el sensor central recibiría más fuerza. Por eso será mejor determinar la precisión experimentalmente como haremos en el Capítulo Chapter 4 .

Capítulo 3

Diseño Mecánico

Realizamos un total de siete prototipos en la tarea de conseguir el pie adecuado. Los tres primeros prototipos no nos sirvieron para experimentar con ellos pero si para encontrar el camino y poder ver que funcionaba y que no. El primer prototipo tenía unas uniones entre piezas muy débiles que se rompieron impidiendo su puesta a prueba. El segundo prototipo resultó inviable al no poder pasar los cables bajo la base del pie. El tercer prototipo permitió experimentar con él pero el muelle era demasido duro y por eso no se ha incluido en el capítulo de experimentación. A partir del cuarto prototipo pudimos realizar pruebas para poder analizar su funcionamiento. Los prototipos se construían mediante una impresora de plástico.

3.1. Prototipo 1

3.1.1. Filosofía del primer prototipo

La primera decisión que se toma es que al igual que el pie ya existente de Twiki, la base y la pieza que alberga los sensores frontales serán independientes con el fin de facilitar la conexión al servo. De la misma forma los sensores trasero y lateral estarán en otra pieza independiente.

La segunda decisión es respecto a las colas de los sensores que supondrán un gran problema a lo largo de todo el diseño del pie. Se decide que van a circular por debajo de la planta del pie el mayor número posible de colas.

La tercera decisión es que el contacto con el suelo se realizará primero con una delgada lámina de plástico para que el pie pueda derrapar y a continuación una capa de espuma que permita distribuir adecuadamente el peso y de esta forma permita calcular el Zero Moment Point o punto de aplicación de la normal. La idea de usar espuma estaba inspirada en un pie construido por Sergi Culubret [3] que permitía medir con fidelidad en que posición se estaba aplicando la fuerza.

La cuarta decisión es realizar los sensores lateral y trasero con un sistema análogo al que tenían los sensores delanteros. Esto quiere decir que utilizaremos un cilindro hueco muy delgado y que se comprima fácilmente para unir las "alas" que tocan los sensores con la estructura de la pieza. La bondad de este sistema es que podemos construir el mecanismo de una sola pieza porque de otra manera las alas se pegarían con pegamento al sensor.

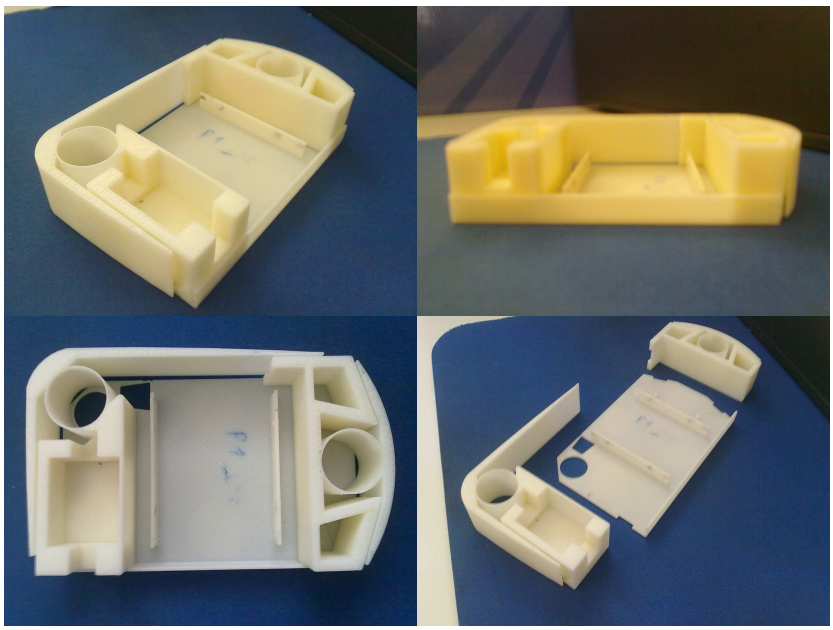


Figura 3.1: El prototipo 1 visto desde distintos ángulos

La quinta decisión consistía en colocar los sensores de la base en posición de cruz para simplificar los cálculos del ZMP.

El resultado se puede ver en Figure 3.1 on page 14.

3.1.2. Problemas del primer prototipo

- La unión con el servo era muy frágil como se ve en la Figure 3.2 on page 15.
- También era frágil la unión entre las distintas piezas

3.2. Prototipo 2

3.2.1. Cambios introducidos en este prototipo

- Las uniones centrales con el servo se han reforzado y además se han extendido hasta la banda lateral para aumentar la rigidez como se ve en laFigure 3.3 on page 16.
- Se han mejorado las uniones entre piezas de tipo lego.
- Bordes redondeados

3.2.2. Filosofía del segundo prototipo

Se mantenía la misma filosofía del primer prototipo. La idea era pasar los cables por debajo de la base. Al comenzar el montaje se vio que era imposible y

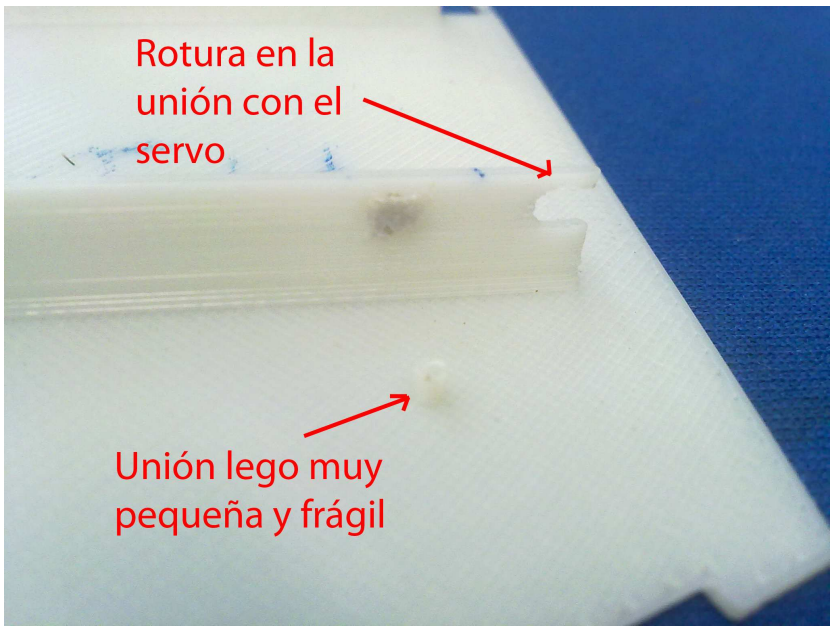


Figura 3.2: Fallos del prototipo 1

por eso se tuvo que rediseñar completamente. Se puede ver el lío de cables que suponía la idea inicial en la Figure 3.4 on page 17.

3.3. Prototipo 3

3.3.1. Cambios introducidos en este prototipo

- Se mejoran ligeramente las conexiones entre piezas
- Se rediseñan las salidas de los sensores, se cubre la parte delantera de los sensores para evitar que al agacharse el robot seccione los cables.
- Se construyen carriles para la cola de los sensores en la suela del pie como se puede ver en la Figure 3.5 on page 18.
- Se implementa el sistema de sujección de la suela mediante muelles. Elegimos utilizar muelles porque nos permite tener un pie robusto y duradero. Si utilizamos pegamento para unir la suela a la base siempre acaba soltándose. Puede verse el muelle de unión en la Figure 3.6 on page 19.
- Se aumenta la bandeja de la electrónica

3.3.2. Filosofía del tercer prototipo

El primer cambio de filosofía respecto a los prototipos anteriores es recuperar la distribución en rectángulo de los sensores de la suela. Esto se hace porque si

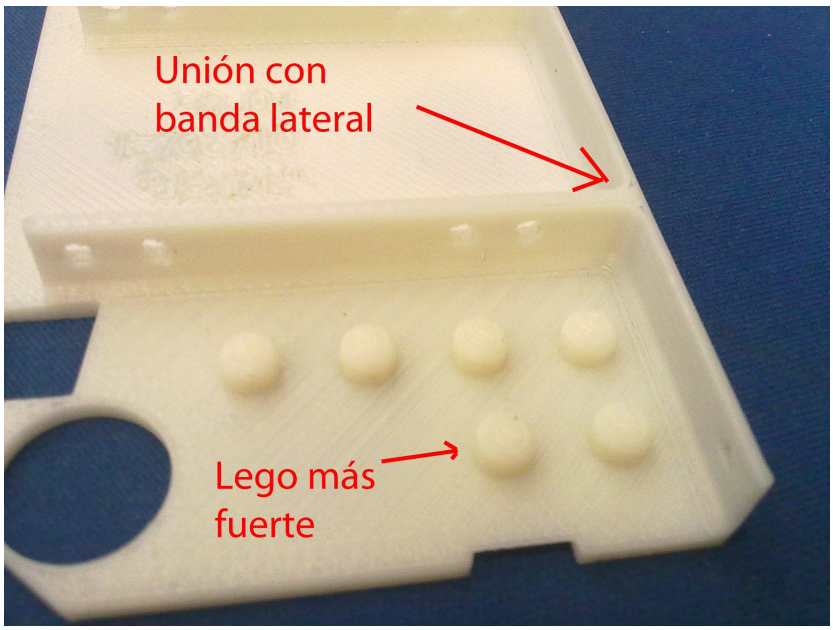


Figura 3.3: Refuerzo de la unión con el servo

lo que queremos es saber si estamos tocando suelo o aire con la parte de adelante del pie lo sabremos mejor teniendo dos sensores que teniendo solo uno.

El segundo cambio consiste en rediseñar las salidas de las colas de los sensores de una forma más racional y funcional.

El tercer y quizá mayor cambio consiste en abandonar la espuma en la planta del pie y sustituirla por dos muelles que sostienen la suela del pie. En el hueco entre la base y la suela irán albergados los sensores. Este cambio se produce por la necesidad de que el pie sea robusto y duradero. Podríamos usar la espuma pero acabar

El cuarto cambio consiste en aumentar la bandeja de la electrónica ya que había sido modificada para poder recibir la información de los ocho sensores y el tamaño había crecido.

3.3.3. Problemas del tercer prototipo

El muelle era demasiado duro y absorbía gran parte de la fuerza. Como queremos que toda la fuerza vaya a los sensores vamos a hacer los muelles más altos y delgados para que sean más blandos. Podemos ver uno de los nuevos muelles en la Figure 3.7 on page 19.

3.4. Prototipo 4

3.4.1. Filosofía del cuarto prototipo

Se mantiene la misma filosofía del anterior prototipo. Lo único que va a variar en los siguientes prototipos va a ser el muelle. Se va a ensayar con diferentes alturas de muelle para ver cual funciona mejor. Además los sensores llevan unos

Figura 3.4: Esquema de cables bajo la suela del pie

tacos para canalizar la presión. Tenemos dos tipos de tacos: unos de caucho delgados y poco compresibles y unos de espuma más gruesos y que se comprimen mucho.

3.4.2. Muelle

Este prototipo utiliza tacos de caucho y la distancia base-suela era excesiva. Por eso el muelle tenía que comprimirse unos 0,5 mm antes de que los sensores recibiesen fuerza. Esto hacía que no pudiese detectar cargas pequeñas.

3.5. Prototipo 5

3.5.1. Muelle

Este prototipo utiliza tacos de espuma y la distancia base-suela era más pequeña que el conjunto sensor y taco. Esto hacía que la suela se combase y que recibiesen más fuerza los sensores de los extremos que el sensor central. Se puede ver una comparación de las distintas distancias y material utilizado en la Figure 3.8 on page 20.

3.6. Prototipo 6

3.6.1. Cambios introducidos

La unión con el servo se rediseña porque daba problemas ya que al girar había rozamiento.

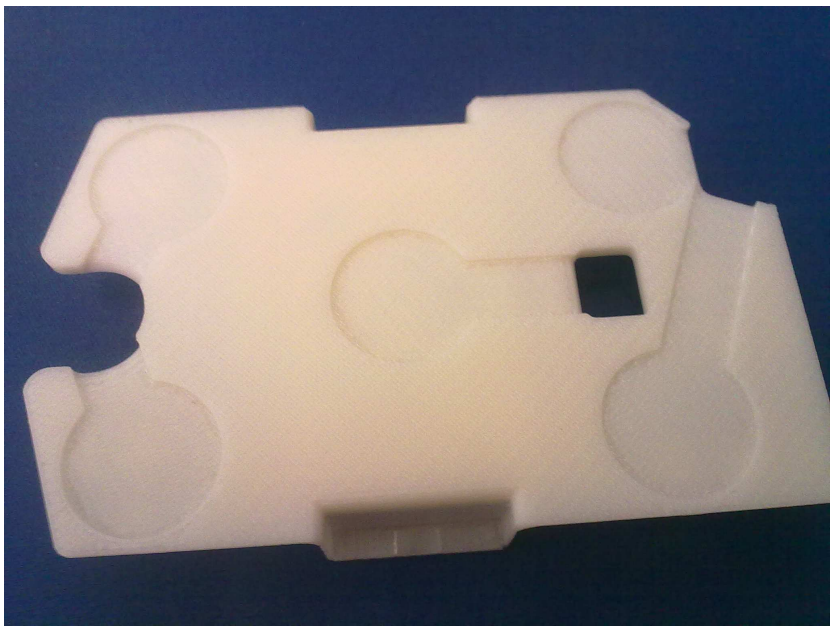


Figura 3.5: Canales para las colas de los sensores

3.6.2. Muelle

Este prototipo utiliza tacos de espuma y la distancia base-suela era justamente la medida sensor junto con el taco. El comportamiento fue muy bueno.

3.7. Prototipo 7

3.7.1. Muelle

Este prototipo utiliza tacos de caucho y la distancia base-suela era justamente la medida sensor junto con el taco. Sin embargo el comportamiento no fue tan bueno como se esperaba.

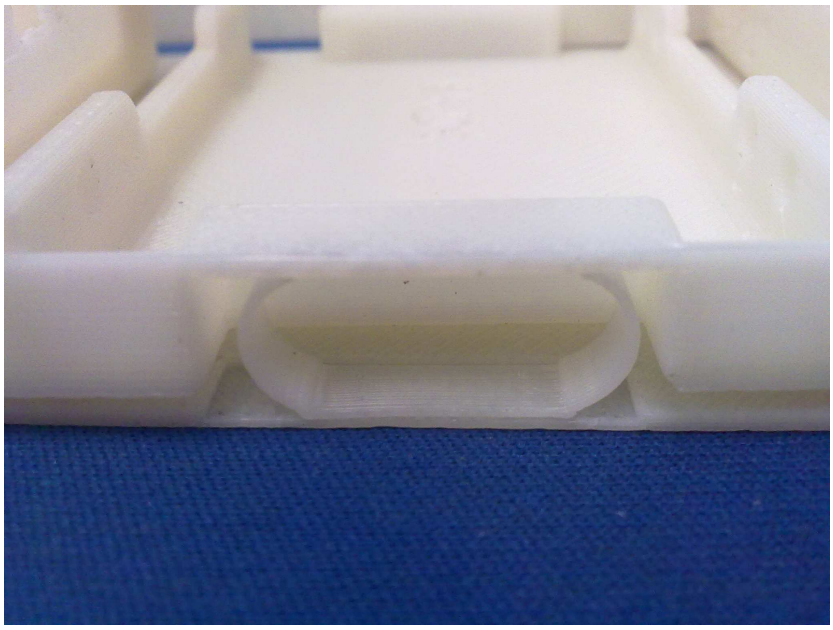


Figura 3.6: Muelle de unión entre la base y la suela del pie

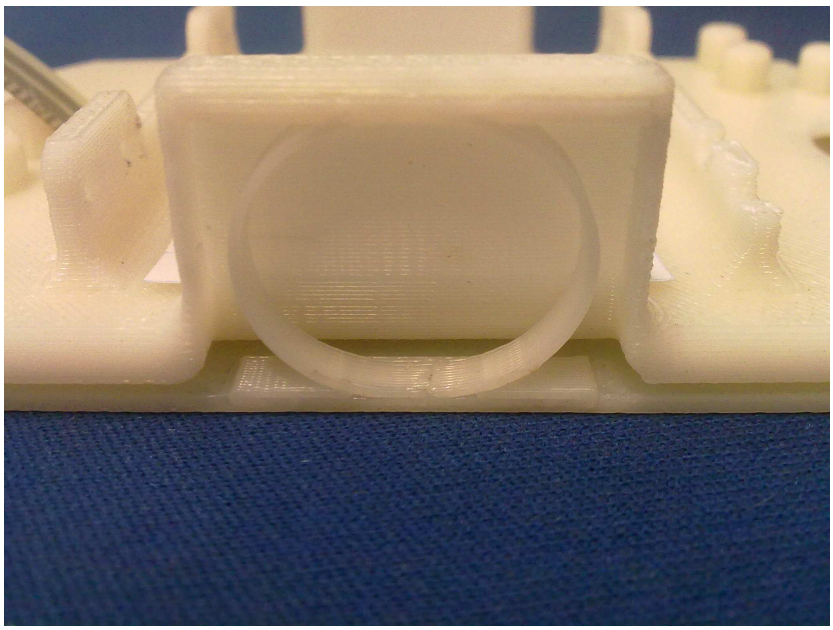


Figura 3.7: Muelles más altos y delgados

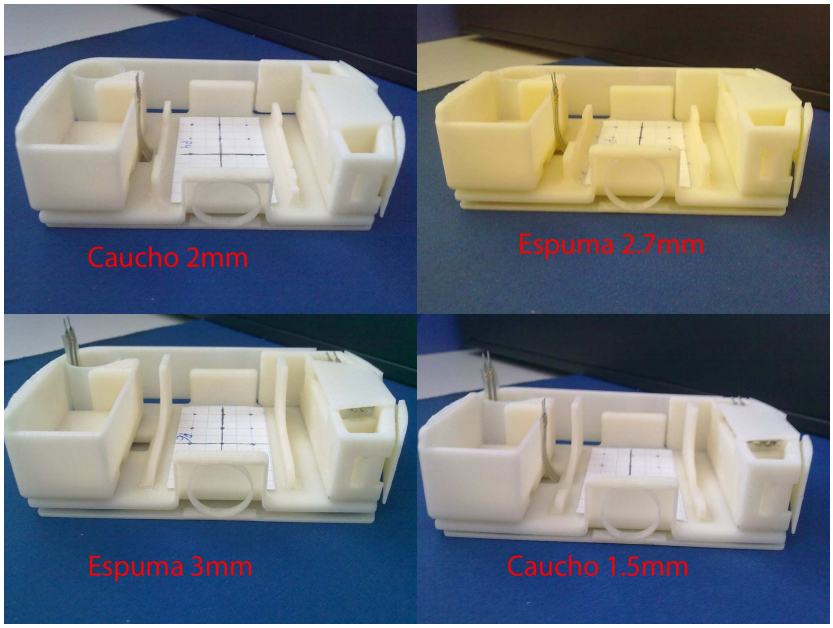


Figura 3.8: Comparación de distancias base-suela de los prototipos

Capítulo 4

Experimentación con los prototipos

4.1. Análisis de los prototipos. Prueba de los Quince Puntos

Para comprobar que tal calcula el ZMP cada prototipo elaboramos una prueba estándar. Vamos a ir presionando en puntos conocidos y midiendo la respuesta obtenida para luego representarla gráficamente. Se pueden ver los puntos presionados en la Figure 4.1 on page 22. En primer lugar probamos cuatro prototipos cuyas características resumo a continuación. Empezamos por el prototipo cuarto al no ser los anteriores funcionales y poder hacer pruebas con ellos. Todos estos modelos disponen de 5 sensores aunque en algunos de ellos el central no registra apenas fuerza. La diferencia principal es la altura del muelle y el tipo de taco utilizado.

Prototipo cuatro Este prototipo utiliza tacos de caucho, muy poco deformables y junto con el sensor tiene un sensor de 1,5 mm . El hueco para el sensor era de 2 mm por lo que el muelle debía comprimirse 0,5 mm hasta que los sensores comenzaban a soportar peso. Debido a ello no podía medir fuerzas pequeñas.

Prototipo cinco El quinto prototipo utiliza tacos de espuma, deformables y de un grosor de 3 mm. El hueco para el sensor se hizo de 2,7 mm por lo que estaba ligeramente precargado el muelle. Esto ocasiono que se combase la suela por los extremos y que el sensor central no midiese nada.

Prototipo seis Este prototipo utiliza tacos de espuma y el hueco es el exacto, 3 mm. El funcionamiento es muy bueno.

Prototipo siete Este prototipo utiliza tacos de caucho y el hueco también es el exacto, 1,5 mm. No funciona tan bien como esperábamos.

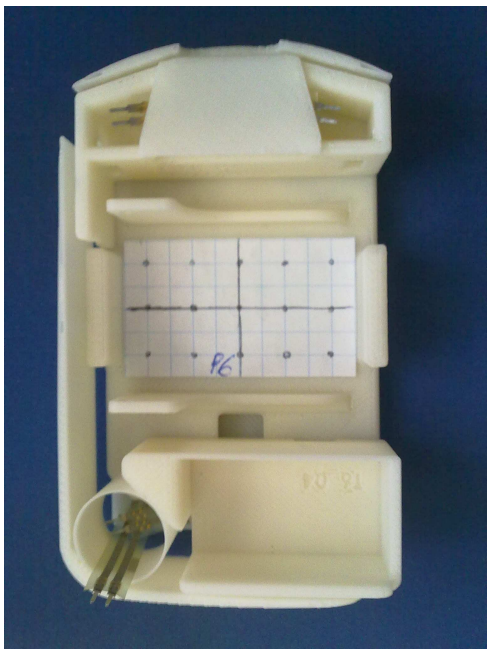


Figura 4.1: Los puntos de presión

4.1.1. Resultados eje x

Se observa que los prototipos que usan tacos de caucho (4 y 7) presentan una mayor variabilidad que los que usan tacos de espuma (5 y 6). Esto puede explicarse sabiendo que los tacos de espuma pueden comprimirse del orden de casi 1 mm mientras los de caucho son prácticamente incompresibles. Por ello el comportamiento de los tacos de espuma es más progresivo en lugar del todo o nada del caucho.

Hay que recordar que la incertidumbre calculada para el eje x era de 5,29 mm.

De entre los dos prototipos que usan espuma el que mejor se comporta es el prototipo 6 que se ajusta bastante bien a la gráfica real. Además presenta un comportamiento muy repetitivo.

En resumen:

- Mejor tacos espuma
- El mejor prototipo el 6

4.1.2. Resultados eje y

Las conclusiones son idénticas al apartado anterior. Los prototipos que usan tacos de espuma son menos variables y por lo tanto preferibles. En este caso es aún más evidente, solo hay que fijarse en la escala de las gráficas. Los que usan caucho tienen la escala de -40 a 40, el prototipo 6 tiene la escala de -20 a 15. La diferencia es abismal.

Hay que recordar que la incertidumbre calculada para el eje x era de 8,9 mm.

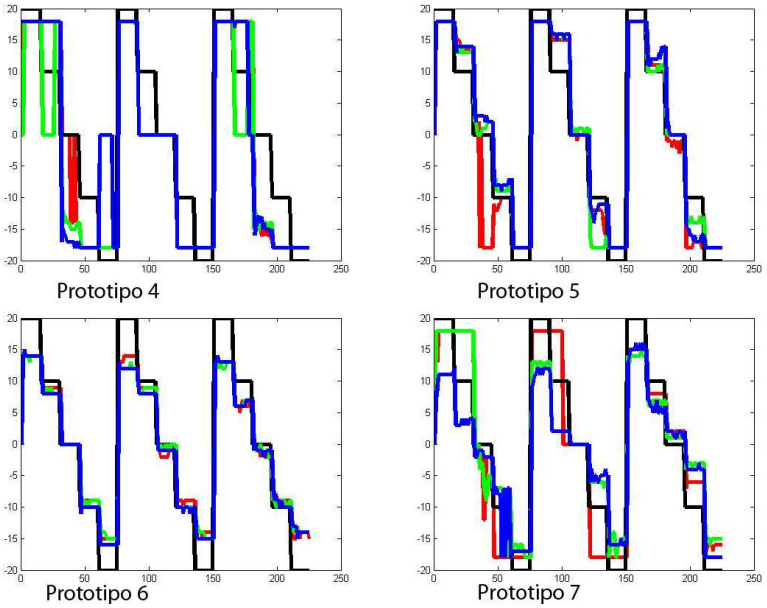


Figura 4.2: En el eje vertical está la posición X en mm. El color negro representa la posición real y los otros colores son posiciones medidas experimentalmente. Si funcionase perfectamente deberían coincidir real y experimental.

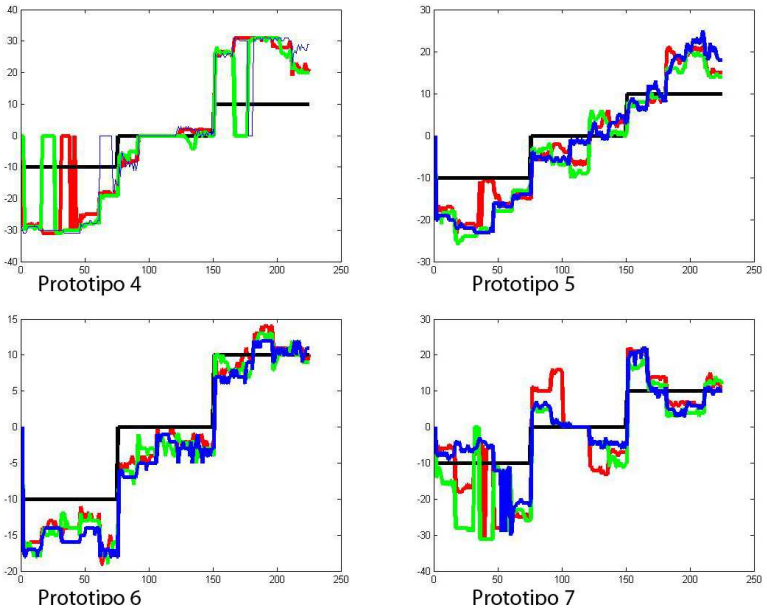


Figura 4.3: En el eje vertical está la posición Y en mm. El color negro representa la posición real y los otros colores son posiciones medidas experimentalmente. Si funcionase perfectamente deberían coincidir real y experimental.

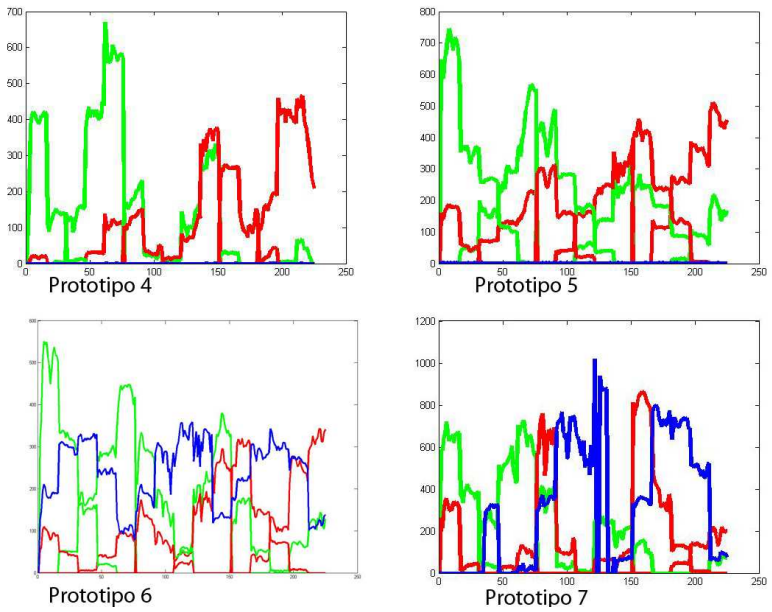


Figura 4.4: Peso recibido por cada sensor. En azul el sensor central y los demás en rojo y verde.

Nuevamente el prototipo 6 vuelve a ser el mejor.

4.1.3. Medida individual de cada sensor

El objetivo de esta gráfica es ver si está actuando el sensor central. Por eso hemos asignado el color verde y el rojo a dos sensores distintos y el azul al central. Como la fuerza se realiza manualmente hay variaciones en las escalas de las gráficas.

Se puede ver que en los prototipos 4 y 5 el sensor central no mide nada y por lo tanto resulta inútil. Ese comportamiento es debido a una mala estimación en la distancia base-suela.

Los prototipos 6 y 7 tienen la distancia exacta y por eso el sensor central si que mide peso.

Peso recibido por cada sensor. En azul el sensor central y los demás en rojo y verde.

4.2. Comparación Cuatro-Cinco Sensores

Una vez decidido que vamos a utilizar el prototipo número seis es necesario comprobar si es mejor utilizar cuatro o cinco sensores. Hay que tener en cuenta que en el conjunto del pie solo podemos usar ocho sensores por restricciones de la electrónica. El plan inicial era colocar dos sensores frontales, uno lateral y uno trasero además de los cuatro de la suela. Por eso colocar cinco sensores supone renunciar a uno de los sensores, seguramente el trasero por ser menos importante.

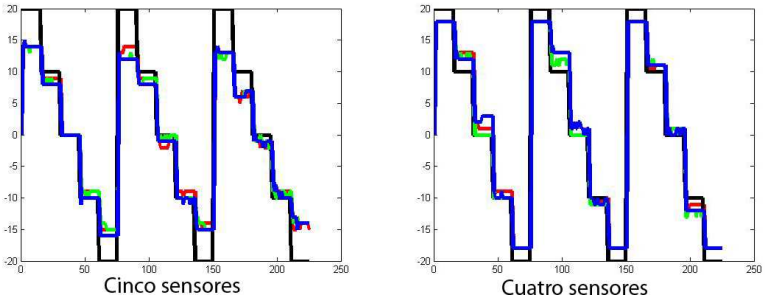


Figura 4.5: En el eje vertical está la posición X en mm. El color negro representa la posición real y los otros colores son posiciones medidas experimentalmente. Si funcionase perfectamente deberían coincidir real y experimental.

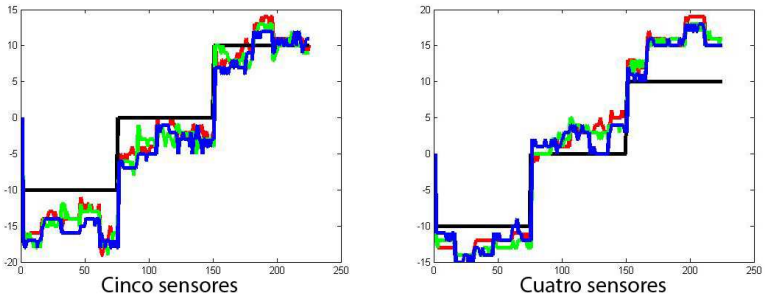


Figura 4.6: En el eje vertical está la posición Y en mm. El color negro representa la posición real y los otros colores son posiciones medidas experimentalmente. Si funcionase perfectamente deberían coincidir real y experimental.

Vamos a comparar como funciona el pie con cuatro y cinco sensores para averiguar si merece la pena colocar el quinto sensor.

Podemos ver en la Figure 4.5 on page 25 y en la Figure 4.6 on page 25que no hay grandes diferencia entre usar cinco o cuatro sensores al hacer la prueba de los Quince Puntos, incluso parece que los resultados mejoran usando cuatro sensores.

Podemos ver que no hay diferencia entre usar cinco o cuatro sensores. Por lo tanto vemos que no tiene sentido utilizar cinco sensores ya que no existe mejora aparente de los resultados.

Realizamos además otra prueba para ver que el pie funciona correctamente. Para ello vamos a representar el peso que recibe cada sensor y vamos a efectuar el mismo recorrido que en la prueba anterior. Podemos ver el color que representa cada sensor y el recorrido seguido en la Figure 4.7 on page 26.

Si el prototipo funciona bien en cada uno de los tres tramos debería haber simetría entre los colores rojizos por una parte y entre los azulados por otra. Asimismo debería haber tambien una simetría global entre el violeta y el azul oscuro, y entre el rojo y el azul claro. Vemos los resultados en la Ilustración 26.

Vemos que el que mejor cumple las predicciones teóricas es el prototipo de cuatro sensores. Las simetrías se cumplen muy bien. Por lo tanto la decisión es clara, vamos a utilizar cuatro sensores en lugar de cinco. Añadir un quinto

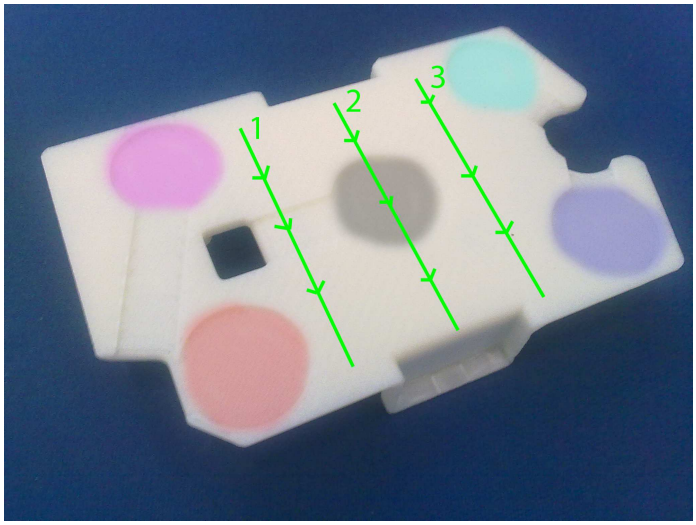


Figura 4.7: Sensores coloreados y recorrido del experimento

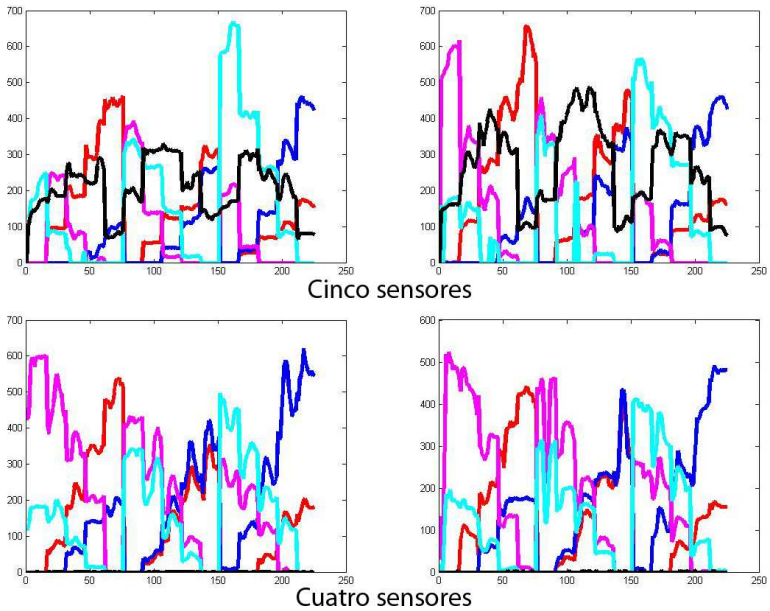


Figura 4.8: Peso recibido por cada sensor en gramos

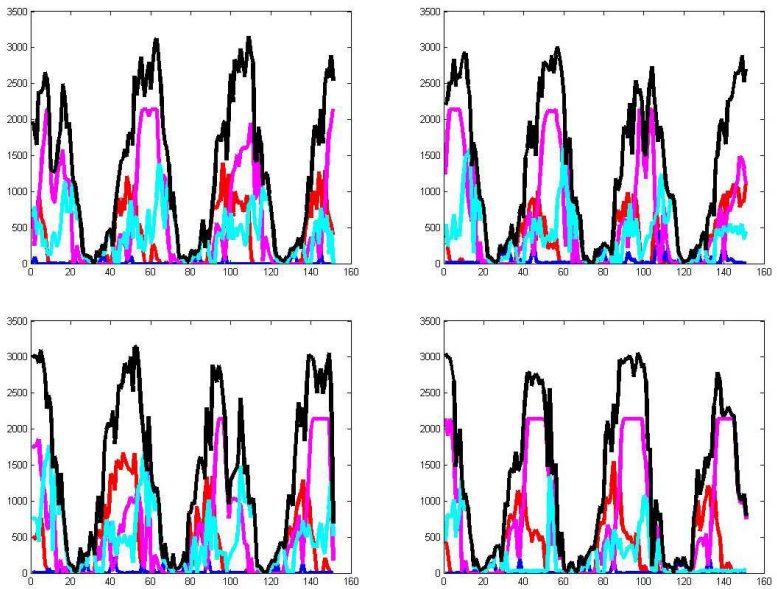


Figura 4.9: En la escala vertical se representa el peso en gramos. En negro se representa el peso total soportado por el pie y en colores el soportado individualmente por cada sensor. Podemos ver que en momentos puntuales el sensor soporta más de 2kg y la electrónica se satura.

sensor no mejora las prestaciones e incluso las empeora.

4.3. Probando el pie con Twiki

Nos hubiera gustado poder haber hecho más pruebas con Twiki pero el tiempo para realizar el proyecto ha sido reducido. Sin embargo queríamos ver si la resistencia de 10 kΩ elegida en el Section 2.2 era la adecuada o se podía apurar más. Para ello diseñamos el siguiente experimento. Consistía en hacer andar a Twiki hacia adelante e ir midiendo los gramos que soportaba cada sensor. Este experimento lo realizamos cuatro veces. Luego analizamos los resultados para ver cual es el maximo peso que se daba y en función de ello elegir la resistencia. Podemos ver los resultados en la Figure 4.9 on page 27.

Los resultados son bastante parecidos y se puede apreciar claramente que son cíclicos, de carga y descarga. Representa cuando el pie está apoyado y cuando está en el aire. Hemos de decir que Twiki no andaba de todo bien y en ocasiones perdía el equilibrio pero las pruebas tienen validez porque el peso que recibiría estando siempre equilibrado no variaría mucho. Como vemos en la Figure 4.9 on page 27 uno de los sensores llega a medir más de 2kg de peso. Por lo tanto en ese sensor está bien dimensionada la resistencia, no podríamos coger una mayor. Por lo tanto por simplicidad nos quedamos con la resistencia de 10 kΩ para todos los sensores de la suela.

Capítulo 5

El Prototipo VI a fondo

Una vez ya hemos decidido que el mejor prototipo es el número seis vamos a conocerlo mas a fondo.

En la 5.1podemos ver la base ya pegada a los muelles y la suela. Se aprecian claramente las clavijas de Lego sobre las que se montarán las piezas que albergan los sensores superiores. Tambien se ven los orificios ideados para que salgan las colas de los sensores de la suela.

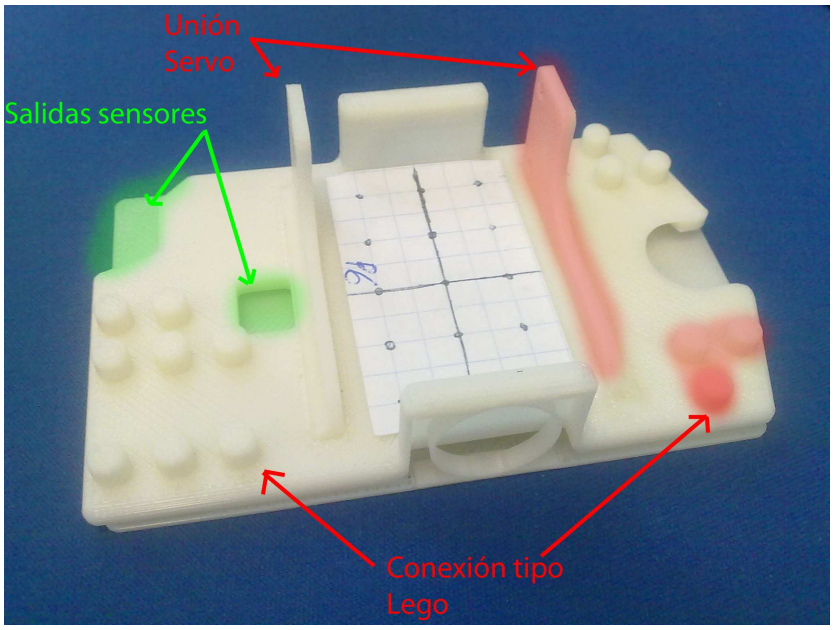


Figura 5.1: El prototipo 6 visto desde arriba

En la 5.2podemos ver claramente como están unidas la suela y la base. En cada lado del pie hay un muelle lo suficientemente blando para que prácticamente no absorba fuerza y lo suficientemente resistente para que no se rompa.

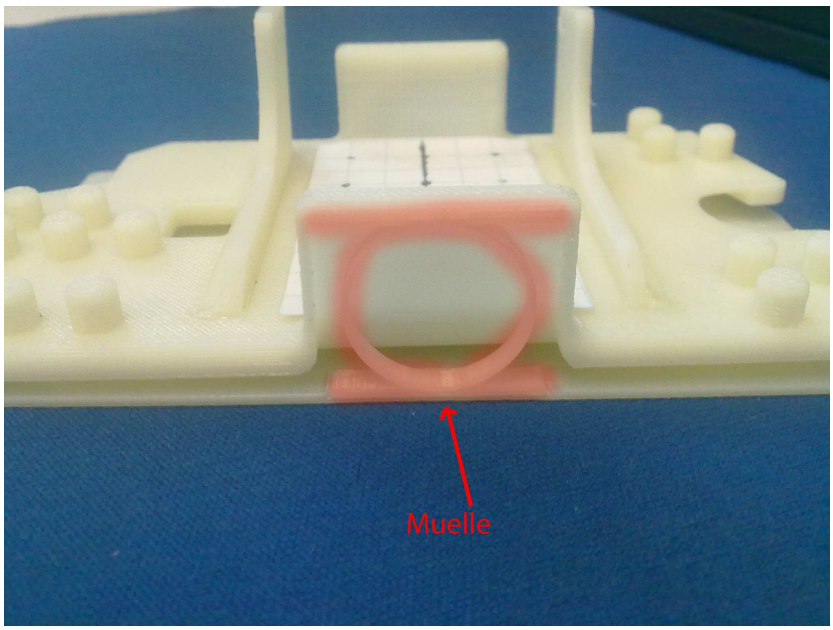


Figura 5.2: Vista lateral del prototipo

En la 5.3podemos ver la parte inferior de la base sobre la que se colocan los sensores. No hace falta utilizar pegamento ya que al tener un hueco bien dimensionado los sensores encajan y no suelen moverse.

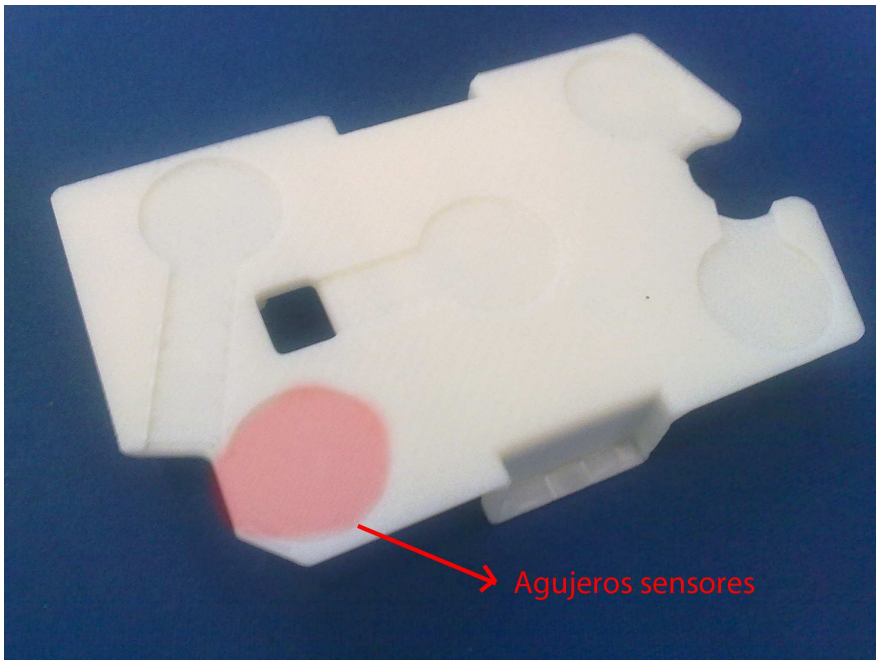


Figura 5.3: Parte de abajo de la base

En la 5.4vemos la pieza que alberga los sensores delanteros y el lateral. También se puede apreciar el camino que siguen los sensores de la suela a traves del cilindro y la salida por las aberturas.

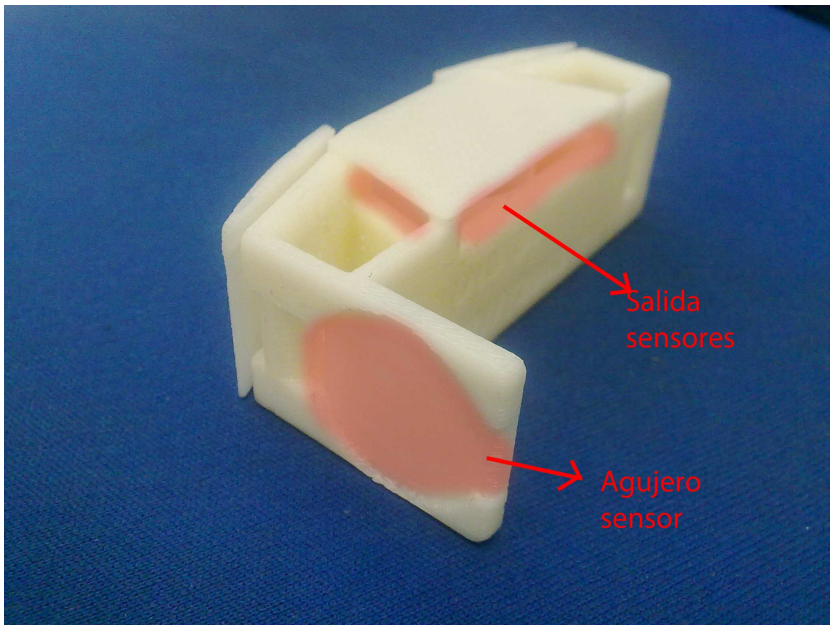


Figura 5.4: Pieza sensores frontales y lateral

En la 5.5vemos el hueco donde se alojan los sensores delanteros. Tampoco es necesario utilizar pegamento, esto facilita un fácil recambio de los sensores defectuosos.

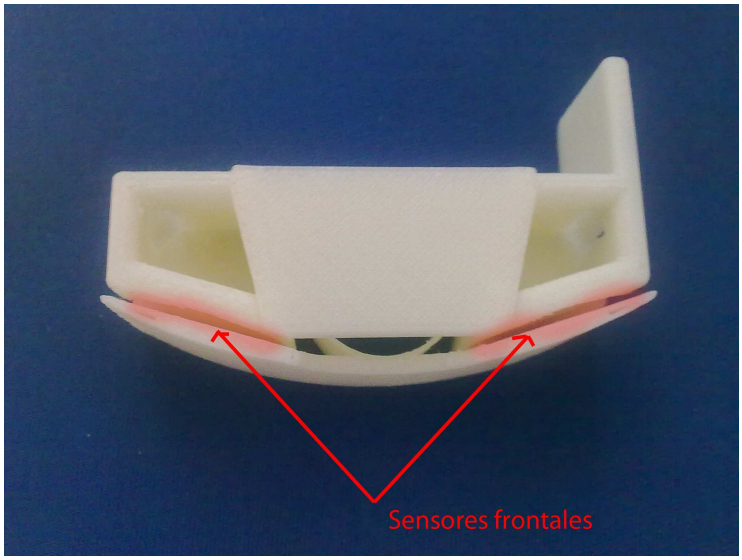


Figura 5.5: Vista de los sensores frontales

En la 5.6vemos la pieza que tiene el sensor trasero y la bandeja de la electrónica.

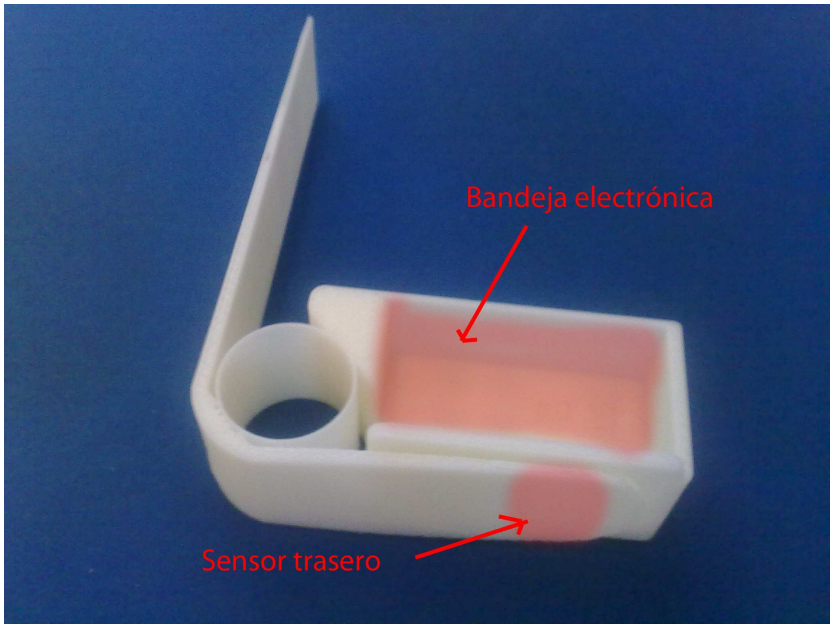


Figura 5.6: Pieza del sensor trasero y bandeja de electrónica

Capítulo 6

Programación

Necesitabamos un programa que fuera capaz de obtener la lectura de los sensores para poder evaluar el rendimiento de los prototipos. El programa se elaboró en Linux utilizando las librerías utilities y communications disponibles en el IRI. La librería utilities se modificó ligeramente por motivos de comodidad a la hora de trabajar con los archivos .log generados a partir de la información de los sensores.

El bus I2C proporcionaba para cada sensor un número natural entre 0 y 1023. A partir de ese número y sabiendo la resistencia RG utilizada, ver la 2.2, podemos averiguar el valor de la resistencia del FSR. Y sabiendo la resistencia del FSR calculamos el peso que está recibiendo. El programa elaborado podía funcionar en varios modos:

- Resistencia. Mostraba la resistencia de cada sensor.
- Peso en Newtons
- Peso en gramos
- ZMP. Mostraba por pantalla el ZMP calculado.

En la *Figure 6.1 on page 33* podemos ver una captura de pantalla del programa en funcionamiento.

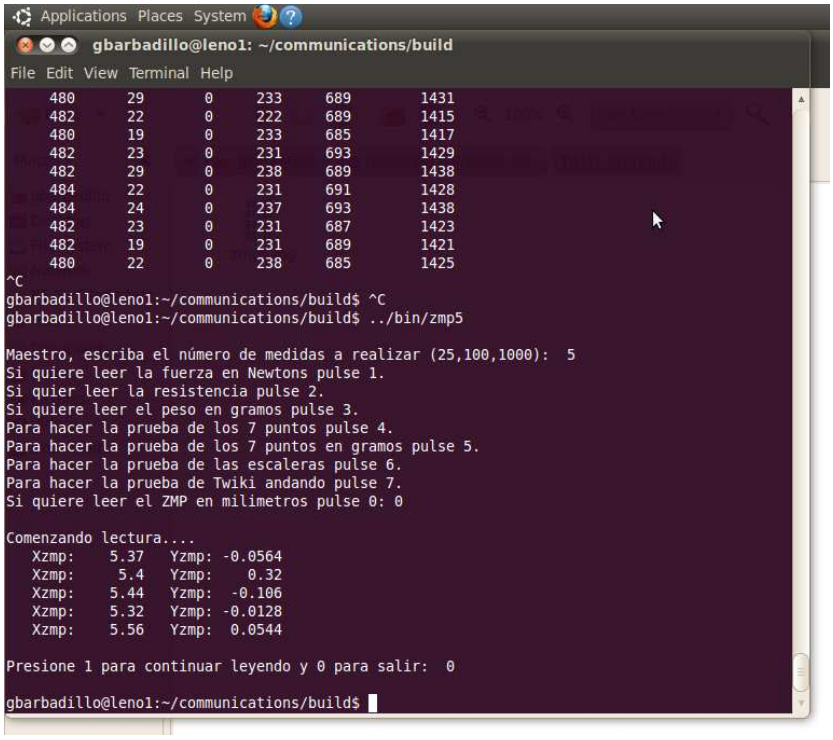


Figura 6.1: Captura de pantalla del programa en funcionamiento.

Capítulo 7

Conclusiones

- El sistema "estructura que alberga sensor" + muelle + "chapa que transmite fuerza al sensor" funciona muy bien. Es un sistema robusto y funcional. Creemos que debería mantenerse en futuras evoluciones del pie
- Creemos que deberían buscarse otros sensores. El problema de ubicar y conducir las alargadas y frágiles colas de los sensores ha sido uno de los mayores con los que nos hemos topado. Facilitaría muchísimo el diseño de un futuro pie encontrar un sensor de dimensiones más reducidas.
- Respecto a la electrónica pensamos que no deberia aumentarse. Si se mantienen los sensores FSR no será posible tener mas de ocho sensores en un pie por motivos de tamaño. El adaptar la placa electrónica para que pueda admitir ocho entradas ha supuesto un aumento de tamaño hasta prácticamente el límite permitido por el tamaño del pie. Está es otra razón para abandonar los sensores FSR ya que no podremos aumentar su número en el futuro.
- Los tacos de espuma son superiores a los de caucho en el aspecto de que son deformables y permiten un reparto gradual del peso en la planta del pie. El caucho no es compresible pero a cambio es más delgado y nos permite ahorrar espacio. Por lo tanto proponemos usar siempre espuma en la suela del pie y caucho en los sensores superiores que no requieren un reparto entre varios sensores.
- Una evolución futura del pie debería buscar un pie que fuese prácticamente simétrico tanto respecto al eje X como al eje Y. Por lo menos esto debería aplicarse a la base del pie sobre la que se montarían los otros módulos. Las conexiones Lego deberían ser iguales adelante y atrás, las salidas para los sensores también... Esto aseguraría que la geometría del pie no interfiriese a la hora del cálculo del ZMP.

Capítulo 8

Bibliografía

Bibliografía

[1] Interlink Electronics. Hoja de características fsr, http://www.media.mit.edu/resenv/classes/mas836/fsrguide.pdf.

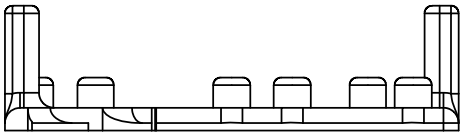
[2] Sergi Hernández. Electrónica usada con los sensores fsr, http://apollo.upc.es/humanoide/trac/wiki/pressuresensors.

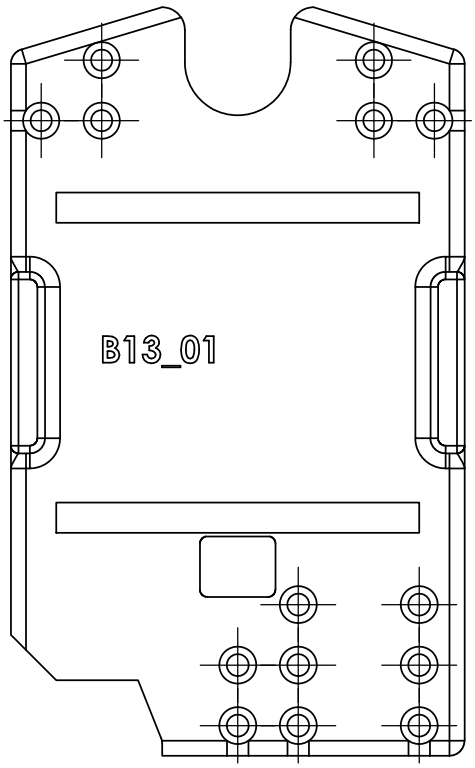
[3] Sergi Culubret i Cortada. Disseny d'unes cames per a un humanoide de petit tamany. sep 2010.

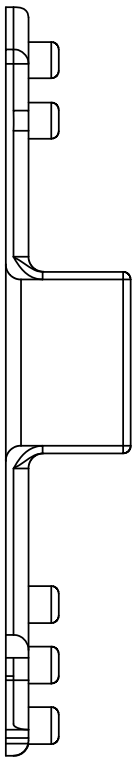
Capítulo 9

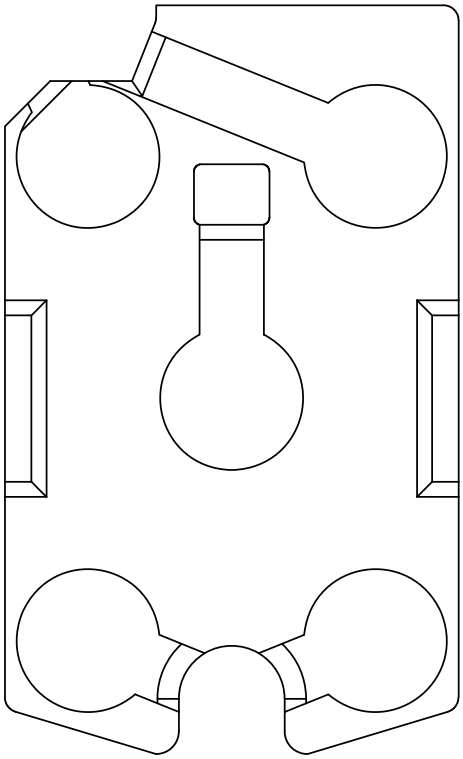
Anexo 1. Piezas del pie

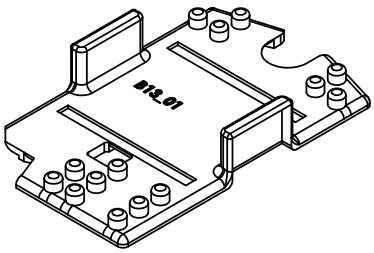
En este capitulo mostramos todas las piezas construidas para el pie. Son imágenes no acotadas porque se pueden consultar las medidas de una manera mas cómoda y eficaz en los archivos correspondientes del ordenador.



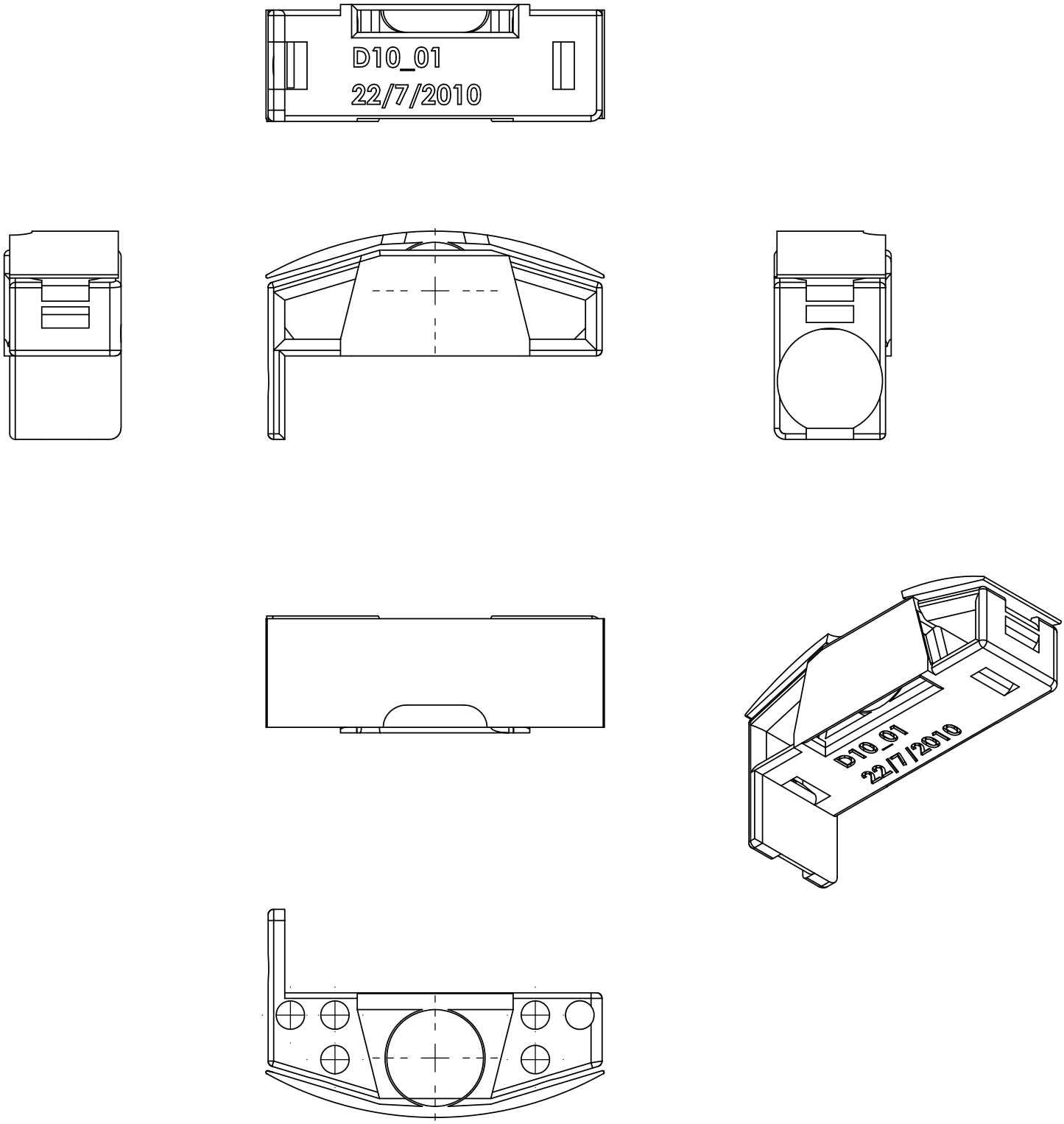




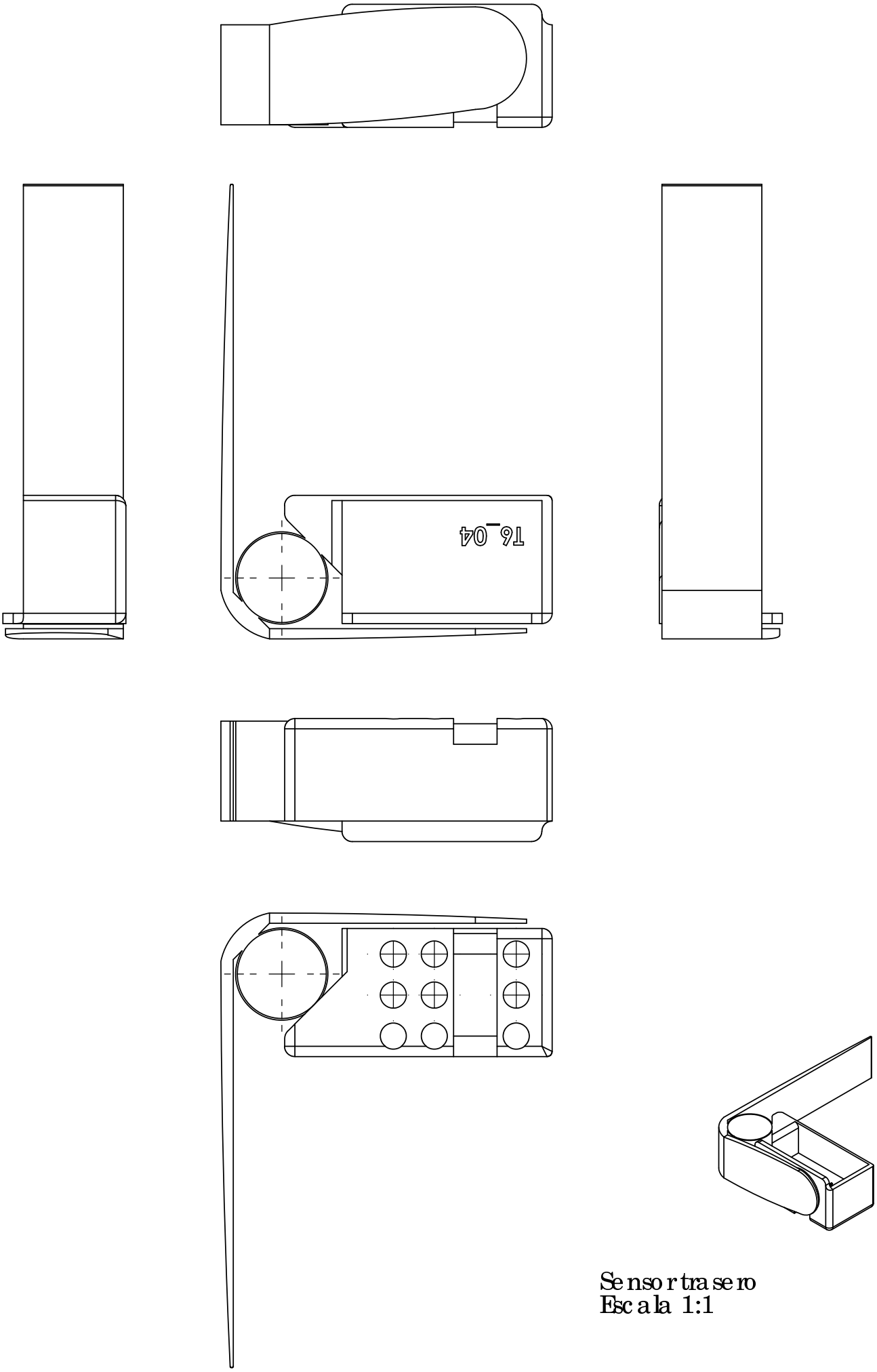




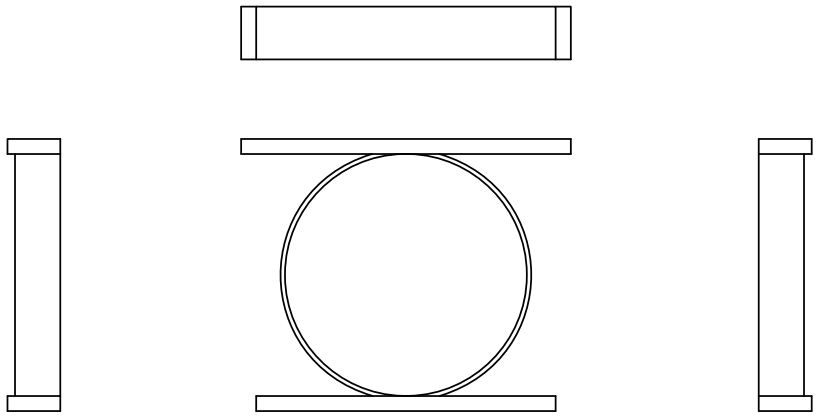
Base
Escala 1:1

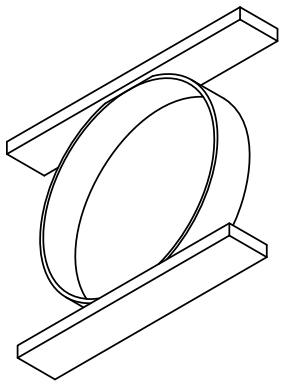


Sensor delantero
Escala 1:1

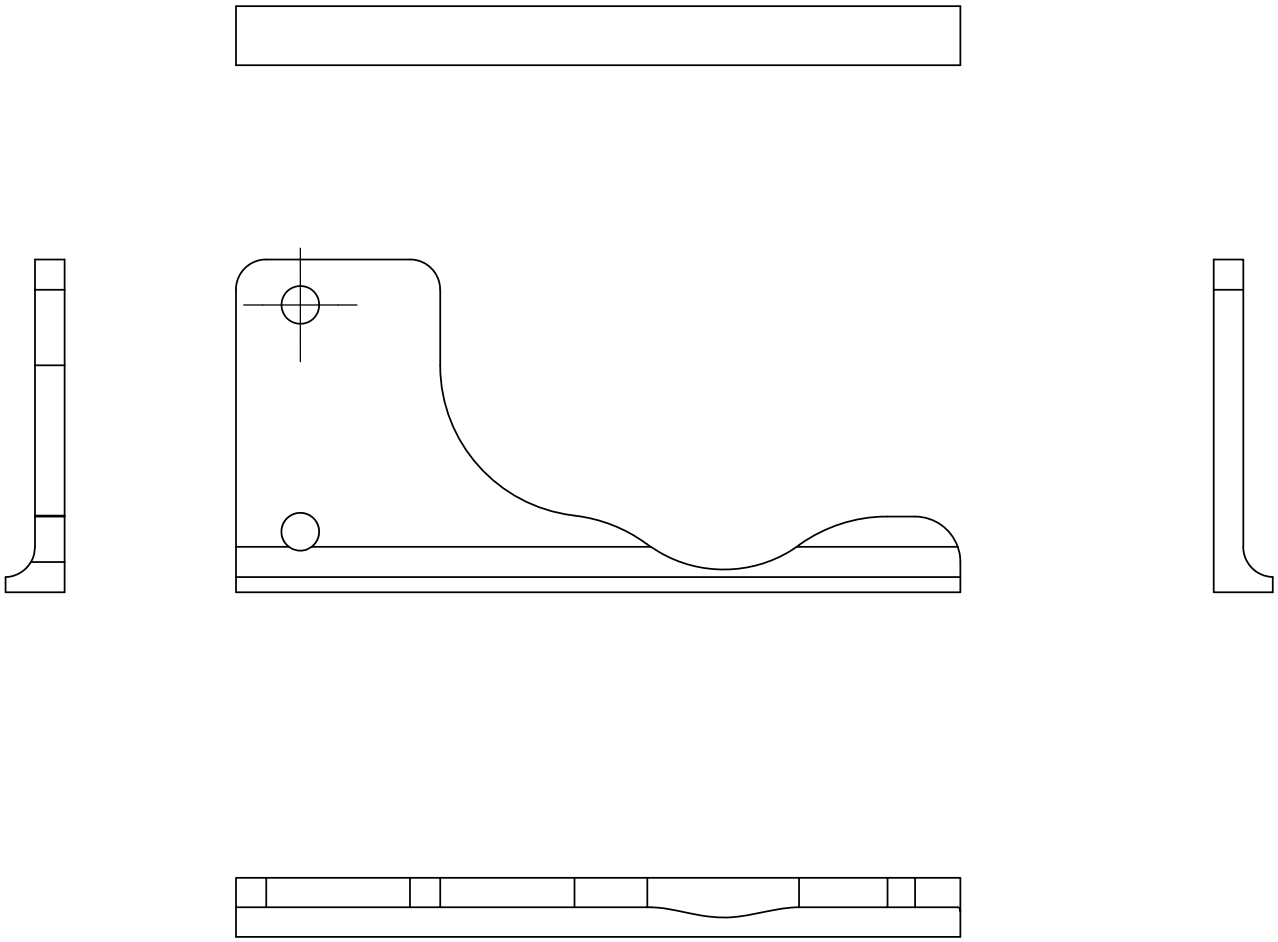


Sensor trasero
Escala 1:1

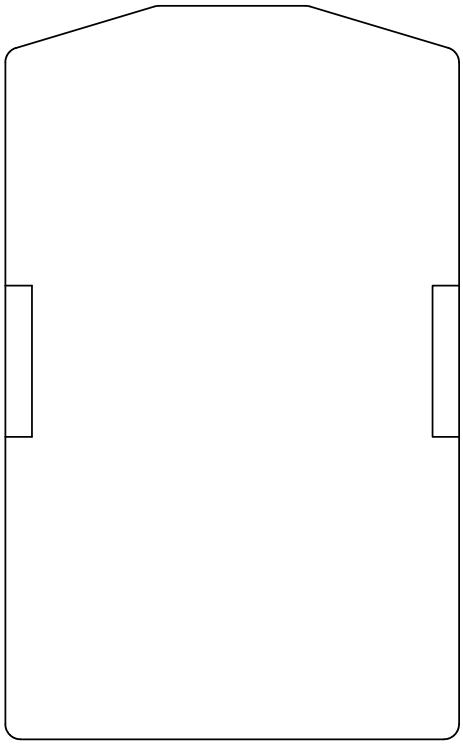


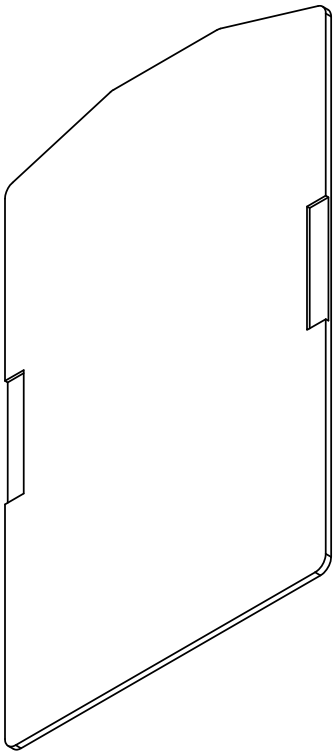


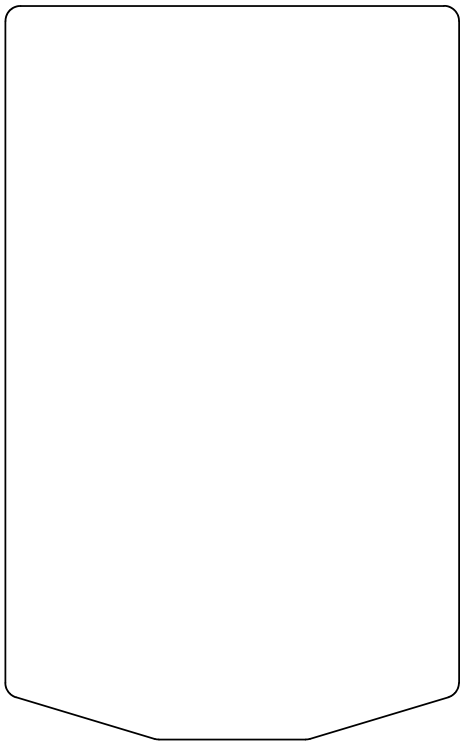
Muelle
Escala 2:1



Unión Servo
Escala 2:1







Suela
Escala 1:1

Capítulo 10

Anexo 2. Tablas de cálculos de incertidumbre del ZMP

Cálculos de error con cuatro sensores

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
23,58	2	2	2	2	0,00	0,00		
	1,5	2,5	1,5	2,5	0,00	-8,90	0,00	8,90
	1,5	1,5	2,5	2,5	-5,29	0,00	5,29	0,00
	2,5	2,5	2,5	1,5	3,07	5,17	-3,07	-5,17

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
51,19	1	1	1	1	0,00	0,00		
	0,75	1,25	0,75	1,25	0,00	-8,90	0,00	8,90
	0,75	0,75	1,25	1,25	-5,29	0,00	5,29	0,00
	1,25	1,25	1,25	0,75	3,07	5,17	-3,07	-5,17

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
8,46	5	5	5	5	0,00	0,00		
	3,75	6,25	3,75	6,25	0,00	-8,90	0,00	8,90
	3,75	3,75	6,25	6,25	-5,29	0,00	5,29	0,00
	6,25	6,25	6,25	3,75	3,07	5,17	-3,07	-5,17

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
3,90	10	10	10	10	0,00	0,00		
	7,5	12,5	7,5	12,5	0,00	-8,90	0,00	8,90
	7,5	7,5	12,5	12,5	-5,29	0,00	5,29	0,00
	12,5	12,5	12,5	7,5	3,07	5,17	-3,07	-5,17

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
1,79	20	20	20	20	0,00	0,00		
	15	25	15	25	0,00	-8,90	0,00	8,90
	15	15	25	25	-5,29	0,00	5,29	0,00
	25	25	25	15	3,07	5,17	-3,07	-5,17

Parece que independientemente del valor de las resistencias el error es el mismo.

FT	R1	R2	R3	R4	X	Y	Xerror	Yerror
7,24	2	20	20	20	-14,29	-24,07		
	1,5	25	15	25	-15,11	-27,27	0,81	3,20
	1,5	15	25	25	-16,19	-25,44	1,90	1,37
	2,5	25	25	15	-12,77	-21,51	-1,52	-2,56
	2,5	15	15	15	-11,71	-19,72	-2,58	-4,35
	1,5	25	25	25	-16,11	-27,13	1,82	3,06

FT	R1	R2	R3	R4	X	Y	Xerror	Yerror
13,28	1	50	50	50	-18,08	-30,45		
	0,75	62,5	37,5	62,5	-18,27	-31,11	0,19	0,67
	0,75	37,5	62,5	62,5	-18,47	-30,77	0,40	0,32
	1,25	62,5	62,5	37,5	-17,74	-29,87	-0,34	-0,58
	1,25	37,5	37,5	37,5	-17,41	-29,33	-0,67	-1,12
	0,75	62,5	62,5	62,5	-18,47	-31,11	0,39	0,66

Conforme nos acercamos a los sensores el error disminuye, parece que el mayor error es en el centro

FT	R1	R2	R3	R4	X	Y	Xerror	Yerror
12,69	2	2	20	20	-16,31	0,00		
	1,5	2,5	15	25	-16,31	-8,90	0,00	8,90
	1,5	1,5	25	25	-17,43	0,00	1,12	0,00
	2,5	2,5	25	15	-15,38	0,85	-0,94	-0,85
	2,5	1,5	15	15	-15,63	8,11	-0,68	-8,11
	1,5	2,5	25	25	-17,02	-8,44	0,71	8,44

FT	R1	R2	R3	R4	X	Y	Xerror	Yerror
25,92	1	1	50	50	-18,53	0,00		
	0,75	1,25	37,5	62,5	-18,53	-8,90	0,00	8,90
	0,75	0,75	62,5	62,5	-18,73	0,00	0,20	0,00
	1,25	1,25	62,5	37,5	-18,35	0,15	-0,18	-0,15
	1,25	0,75	37,5	37,5	-18,40	8,76	-0,13	-8,76
	0,75	1,25	62,5	62,5	-18,66	-8,82	0,13	8,82

FT	R1	R2	R3	R4	X	Y	Xerror	Yerror
25,92	50	1	50	1	0,00	31,21		
	37,5	1,25	37,5	1,25	0,00	30,61	0,00	0,60
	37,5	0,75	62,5	1,25	-5,29	31,21	5,29	0,00
	62,5	1,25	62,5	0,75	5,24	31,42	-5,24	-0,22
	62,5	0,75	37,5	0,75	0,05	31,38	-0,05	-0,17
	37,5	1,25	62,5	1,25	-0,09	30,90	0,09	0,30

Cuando tenemos que la x es muy grande el error en ella sera pequeño pero podra ser grande en la y.

Cálculos de error con cinco sensores

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	R5 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
23,58	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00		
	1,50	2,50	1,50	2,50	2,50	0,00	-7,54	0,00	7,54
	1,50	1,50	2,50	2,50	2,50	-4,48	0,00	4,48	0,00
	2,50	2,50	2,50	1,50	1,50	2,24	3,77	-2,24	-3,77

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	R5 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
51,19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00		
	0,75	1,25	0,75	1,25	1,25	0,00	-7,54	0,00	7,54
	0,75	0,75	1,25	1,25	1,25	-4,48	0,00	4,48	0,00
	1,25	1,25	1,25	0,75	0,75	2,24	3,77	-2,24	-3,77

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	R5 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
3,90	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00	0,00		
	7,50	12,50	7,50	12,50	12,50	0,00	-7,54	0,00	7,54
	7,50	7,50	12,50	12,50	12,50	-4,48	0,00	4,48	0,00
	12,50	12,50	12,50	7,50	7,50	2,24	3,77	-2,24	-3,77

Probando con una configuración en la que el sensor central reciba más peso.

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	R5 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
23,58	2,00	2,00	2,00	2,00	1,50	0,00	0,00		
	1,50	2,50	1,50	2,50	1,88	0,00	-7,13	0,00	7,13
	1,50	1,50	2,50	2,50	1,88	-4,23	0,00	4,23	0,00
	2,50	2,50	2,50	1,50	1,13	2,03	3,42	-2,03	-3,42

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	R5 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
51,19	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,00	0,00		
	0,75	1,25	0,75	1,25	0,63	0,00	-6,40	0,00	6,40
	0,75	0,75	1,25	1,25	0,63	-3,80	0,00	3,80	0,00
	1,25	1,25	1,25	0,75	0,38	1,70	2,86	-1,70	-2,86

FT (N)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (kΩ)	R5 (kΩ)	X (mm)	Y (mm)	Xerror (mm)	Yerror (mm)
3,90	10,00	10,00	10,00	10,00	1,00	0,00	0,00		
	7,50	12,50	7,50	12,50	1,25	0,00	-2,64	0,00	2,64
	7,50	7,50	12,50	12,50	1,25	-1,57	0,00	1,57	0,00
	12,50	12,50	12,50	7,50	0,75	0,52	0,88	-0,52	-0,88