



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Medida de la fuerza sobre el cuerpo humano mediante sensores
piezorresistivos de tipo film**

Autor: D. Óscar Fuente Antolín

Tutor: D. Alberto Mansilla Gallo

Valladolid, septiembre, 2021



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Medida de la fuerza sobre el cuerpo humano mediante sensores piezorresistivos de tipo film

Autor: D. Óscar Fuente Antolín

Tutor: D. Alberto Mansilla Gallo

Valladolid, septiembre, 2021

RESUMEN

El objetivo del trabajo se centra en la posibilidad de medir la fuerza y/o presión ejercida sobre el cuerpo humano mediante sensores de tipo film piezorresistivos, este tipo de sensores presentan una disminución de resistencia cuando se incrementa la fuerza que actúa sobre su superficie. Se ha realizado una búsqueda de diversos artículos científicos para estudiar las características más importantes de estos sensores: linealidad, histéresis, deriva o drift. Tras esto se han diseñado y realizado una serie de ensayos que simulen el posicionamiento de los sensores entre una órtesis y el cuerpo humano. En el trabajo se ha realizado un estudio de las distintas tecnologías (shuntmode y truemode) y sensores disponibles en el mercado. Se han seleccionado tres fabricantes diferentes (Interlink, Sensitronics y Tekscan) y se han realizado un estudio comparando sus principales características: Linealidad, histéresis, drift o deriva (respuesta del sensor en el tiempo). Para cada sensor se ha propuesto una calibración específica con un algoritmo basado en una máquina de estados. Con esta calibración se ha realizado un ensayo para estudiar la precisión de los sensores bajos distintos estados de carga y descarga en diferentes intervalos de tiempo para obtener precisiones con un error de entre el 5 % y el 10 %. Para validar los sensores se ha diseñado y realizado un ensayo que simule una aplicación real, en este caso la medida de la fuerza/presión entre un corsé ortopédico y el cuerpo humano con cuatro sensores, aunque los resultados obtenidos no han podido ser validados debido a la complejidad de las superficies de contacto. Finalmente se ha realizado un ensayo más simple para validar la medición de los sensores en una superficie plana y de área conocida.

ABSTRACT

The objective of this project focuses on the possibility of measuring the force and/or pressure exerted on the human body by means of piezoresistive film type sensors, this type of sensor presents a decrease in resistance when the force acting on its surface increases. A search of various scientific articles has been carried out to study the most important characteristics of these sensors: linearity, hysteresis and drift. After this, a series of tests have been designed and carried out that simulate the positioning of the sensors between an orthosis and the human body. In this project a study of the different technologies (shuntmode and truemode) and sensors available on the market has been carried out. Three different manufacturers have been selected (Interlink, Sensitronics and Tekscan) and a study has been carried out comparing their main characteristics: Linearity, hysteresis and drift (response of the sensor in time). For each sensor a specific calibration has been proposed with an algorithm based on a state machine. With this calibration, a test has been carried out to study the precision of the sensors under different states of charge and discharge in different time intervals to obtain accuracies with an error between 5 % and 10 %. To validate the sensors, a test has been designed and carried out that simulates a real application, in this case the measurement of the force / pressure between an orthopedic corset and the human body with four sensors, although the results obtained could not be validated due to the complexity of the contact surfaces. Finally, a simpler test has been carried out to validate the measurement of the sensors on a flat surface with a known area.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ESTADO DEL ARTE	3
2.1. GALGAS EXTENSOMÉTRICAS Y CÉLULAS DE CARGA	3
2.2. SENSORES DE FUERZA PIEZORRESISTIVOS DE TIPO FILM FSR (Force Sensitive Resistor)	4
2.3. SENSORES DE FUERZA CAPACITIVOS	5
2.4. SENSORES DE FUERZA ÓPTICOS	6
2.5. SENSORES DE FUERZA PIEZOELÉCTRICOS	6
3. SENSORES FSR EN EL MERCADO Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	7
3.1. SENSORES DE FUERZA FLEXIFORCE DE TEKSCAN:	7
3.2. SENSORES TIPO MATRICIAL DE TEKSCAN	10
3.3. FABRICANTE OHMITE	11
3.4. FABRICANTE INTERLINK	11
3.5. FABRICANTE SENSITRONICS	12
3.5.1. SENSORES DE TIPO MATRICIAL DE SENSITRONICS.	12
3.6. FABRICANTE PERATECH	14
3.7. FABRICANTE TACTERION	14
3.8. FABRICANTE SINGLETACT	15
3.9. FABRICANTE TACTILUS	15
3.10. FABRICANTE KITRONYX	16
3.11. 3M VELOSTAT	16
4. ESTUDIO DE LOS SENSORES FSR Y DISEÑO DE LOS ENSAYOS	19
4.1. CONFIGURACIÓN DEL SENSOR EN LOS ENSAYOS	19
4.2. ENSAYOS PROPUESTOS: VARIABLES ELEGIDAS	21
4.3. SENSORES Y FABRICANTES ENSAYADOS	22
5. ESTUDIO DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS PARA LOS SENSORES FSR	25
5.1. CIRCUITO ELEGIDO	26
5.2. ANÁLISIS DEL CIRCUITO Y SU LINEALIDAD ELÉCTRICA	27
6. EQUIPO UTILIZADO PARA REALIZAR LOS ENSAYOS	31
7. ENSAYOS REALIZADOS CON LOS SENSORES FSR	33
7.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON EL SENSOR FSR402(1) DE INTERLINK. .	37
8. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE TRES FABRICANTES DE SENSORES	45
8.1. LINEALIDAD	47
8.1.1. LINEALIDAD DEL SENSOR FSR402.	47
8.1.2. LINEALIDAD DEL SENSOR FSR406	47
8.1.3. LINEALIDAD DEL SENSOR SENSITRONICS 1”	48
8.1.4. LINEALIDAD DEL SENSOR FLEXIFORCE A201	48

8.2.	HISTÉRESIS	49
8.2.1.	HISTÉRESIS DEL SENSOR FSR402 Y FSR406.....	49
8.2.2.	HISTÉRESIS DEL SENSOR SENSITRONICS 1”.....	50
8.2.3.	HISTÉRESIS DEL SENSOR FLEXIFORCE A201 DE TEKSCAN	50
8.3.	DRIFT/DERIVA, RESPUESTA DE LOS SENSORES EN EL TIEMPO	51
8.3.1.	RESPUESTA DE LOS SENSORES FSR402	51
8.3.2.	RESPUESTA DE LOS SENSORES SENSITRONICS 1”	52
8.3.3.	RESPUESTA DE LOS SENSORES FLEXIFORCE A201 DE TEKSCAN	53
8.3.4.	ENSAYOS CON CARGA NORMAL Y CORTANTE.	54
8.3.5.	ENSAYOS CON FUERZA CORTANTE REALIZADOS.....	55
8.4.	ENSAYOS ADICIONALES	59
8.4.1.	ENSAYO SUPERFICIE CURVA CON EL SENSOR FSR406 DE INTERLINK	59
9.	CALIBRACIÓN PROPUESTA PARA CADA SENSOR.....	61
9.1.	CALIBRACIÓN DEL SENSOR INTERLINK FSR402.....	61
9.2.	CALIBRACIÓN DEL SENSOR FSR406 INTERLINK.....	65
9.3.	CALIBRACIÓN DEL SENSOR SENSITRONICS 1”	67
9.4.	CALIBRACIÓN DEL SENSOR FLEXIFORCE A201 DE TEKSCAN	69
10.	APLICACIÓN REAL CORSÉ ORTOPÉDICO.....	73
10.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS.....	74
10.2.	RESULTADOS DEL ENSAYO CORSÉ ORTOPÉDICO	78
11.	ENSAYO 4 SENSORES SENSITRONICS CON GEOMETRÍA PLANA.....	85
11.1.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CON CUATRO SENSORES SENSITRONICS Y GEOMETRÍA PLANA	86
12.	LÍNEAS FUTURAS.....	91
13.	CONCLUSIONES	93
14.	REFERENCIAS.....	95
14.1.	PÁGINAS WEB	97
15.	ANEXOS	99
15.1.	PROGRAMAS LABVIEW.....	¡Error! Marcador no definido.
15.2.	PROGRAMA PYTHON PARA LA INTERPOLACIÓN.....	99

1. INTRODUCCIÓN

Los sensores de tipo film piezorresistivos son utilizados actualmente en diversos campos: aplicaciones médicas, industria automotriz, juguetes, robótica, aparatos musicales, deportes, etc. Cualquier aplicación que requiera la medida de la fuerza/presión con limitaciones de espacio y/o geometría que las células de cargas y galgas extensométricas no son adecuadas debido a su peso, espacio ocupado y complejidad de integración.

En este trabajo se han estudiado los sensores y tecnologías actuales disponibles para la medición de fuerzas entre el cuerpo humano y una órtesis. Tras llegar a la conclusión de que los sensores piezorresistivos de tipo film son los más adecuados, se ha procedido al estudio de diversos artículos científicos y guías de los fabricantes para conocer las principales características de estos sensores y más en profundidad, artículos científicos que aportan información sobre la medida de la fuerza en aplicaciones médicas.

Del estudio de estos artículos científicos y guías, se han extraído diversas conclusiones para diseñar y realizar diversos ensayos para calibrar los sensores, y de esta forma estudiar la capacidad de los sensores para realizar medidas de fuerza en la aplicación específica (medida de la fuerza entre el cuerpo humano y una órtesis). También se ha diseñado y construido el circuito electrónico más adecuado para realizar las mediciones en base a las recomendaciones de los fabricantes.

Simultáneamente se ha realizado un estudio de los distintos tipos de sensores y fabricantes que existen actualmente en el mercado. Finalmente se han elegido tres fabricantes distintos (Interlink, Sensitronics y Tekscan) y se ha realizado un estudio comparando entre los tres fabricantes las características más comunes que presentan los sensores de tipo film.

Se ha propuesto una calibración específica para cada sensor y fabricante implementada en el programa labview.

Después de estos ensayos, se ha diseñado y realizado un ensayo que simule una aplicación real, la medida de la fuerza/presión entre el torso y un corsé ortopédico con cuatro sensores del fabricante Sensitronics. Para complementar este ensayo se ha realizado un ensayo más simple con los cuatro sensores para poder verificar de una forma más aproximada la medida de la fuerza con cuatro sensores.

2. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se describen los sensores y tecnologías más utilizados actualmente para la medición de fuerzas o presiones:

- Galgas extensométricas y células de carga.
- Sensores piezorresistivos de tipo film (FSR).
- Sensores de fuerza capacitivos.
- Sensores de fuerza ópticos.
- Sensores de fuerza piezoeléctricos.

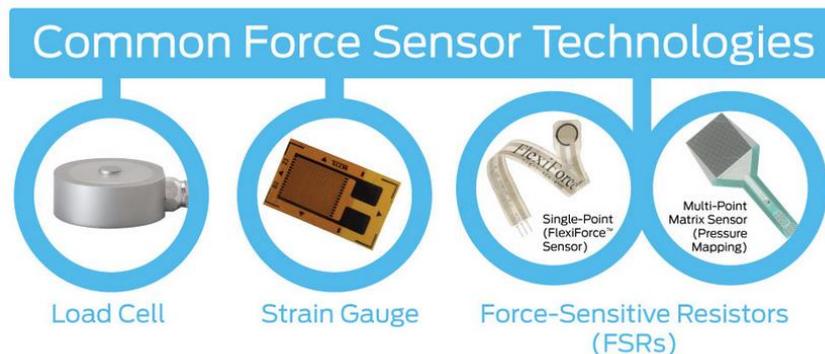


Figura 1 : Tecnologías más comunes para la medición de la fuerza/presión.

2.1. GALGAS EXTENSOMÉTRICAS Y CÉLULAS DE CARGA.

El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en la variación de la resistencia del material del que están constituidos debido a la deformación que sufren cuando son sometidos a una carga.

Las células de carga son adecuadas para medir fuerzas en puntos, tienen como inconveniente su volumen y su incapacidad de medir distribuciones de presiones sobre una superficie. Su precio es elevado en comparación con los sensores FSR. Las galgas extensométricas son muy precisas y de pequeño tamaño, pero requieren un circuito complejo y son caras de integrar para la medida de fuerzas de contacto.

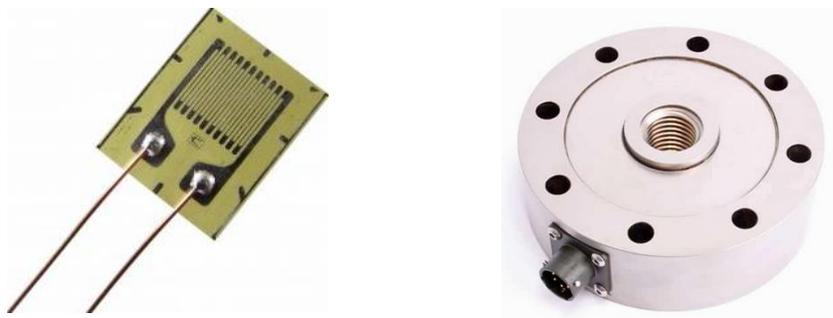


Figura 2 : Galga extensométrica y célula de carga.

2.2. SENSORES DE FUERZA PIEZORRESISTIVOS DE TIPO FILM FSR (Force Sensitive Resistor)

Son ligeros, delgados y deformables, por lo que son muy adecuados para aplicaciones médicas, pueden ser diseñados de diferentes formas y tamaños. Su gran desventaja es la incapacidad de medir fuerzas cortantes. Su principio de funcionamiento se basa en la variación de la resistencia del sensor cuando se aplica una carga y mediante el circuito adecuado medir un cambio de voltaje. Están constituidos comúnmente por capas de polímero flexible, electrodos de cobre o plata y tinta de carbono semiconductor. Dependiendo del tipo de sensor los electrodos y capas se pueden disponer de distintas formas para obtener distintas tecnologías que se describen más adelante.

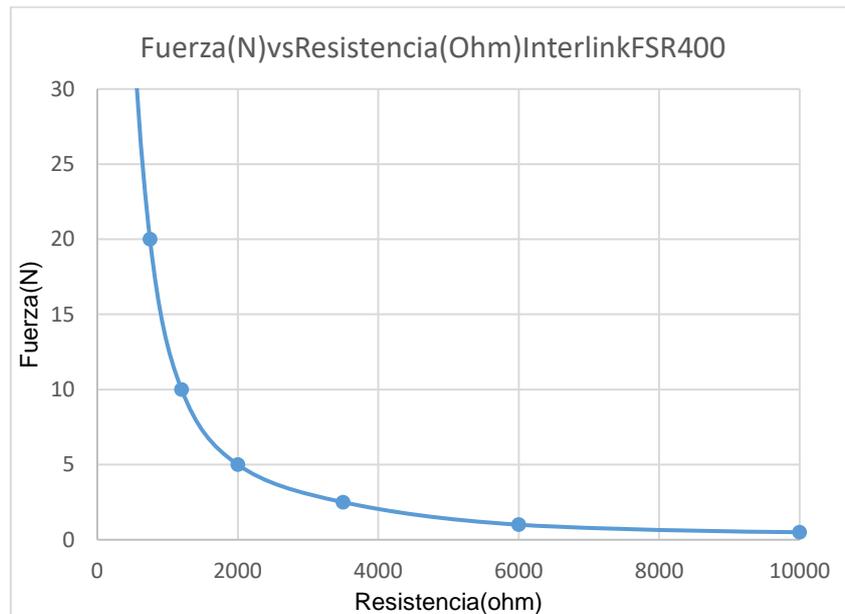


Figura 3 : Gráfica Fuerza-Resistencia del sensor FSR402 de interlink.

Se pueden dividir en dos tipos:

- Sensores FSR puntuales: distintos rangos de fuerza y área sensible.
- Sensores de distribución de presiones (matricial): Los FSR puntuales se pueden configurar en forma de matriz para medir distribuciones de presión sobre una superficie.



Figura 4 : Sensor FSR puntual y sensor matricial.

Dentro de los sensores FSR se pueden distinguir dos tipos de tecnologías:

- ThruMode.
- Shuntmode.

Los FSRs del tipo thruMode son más precisos, presentan mayor linealidad, menor deriva y pueden medir un mayor rango de fuerzas. Los FSRs del tipo thruMode son más costosos que los FSRs de tipo shuntMode debido a que en su fabricación se utiliza una mayor cantidad de plata y tinta de carbono. En el siguiente esquema se describe la fabricación de las dos tecnologías:

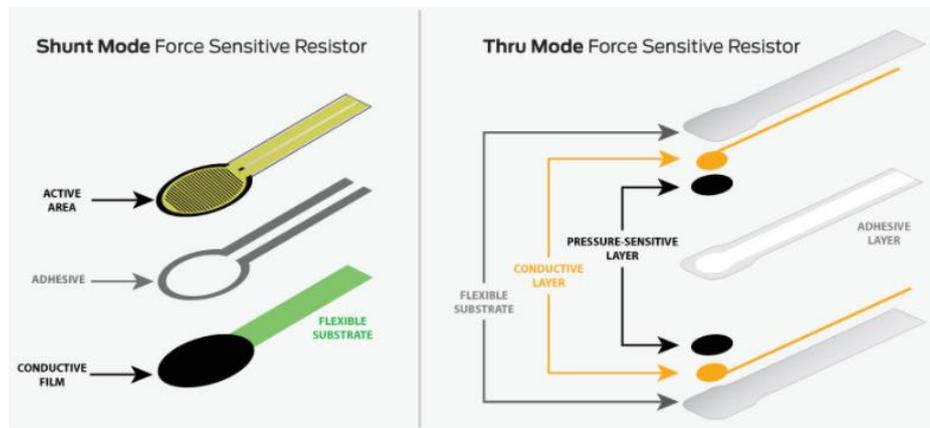


Figura 5 : Constitución sensores shuntmode y thru-mode.

<https://butlertechnologies.com/shunt-mode-vs-thru-mode/>

2.3. SENSORES DE FUERZA CAPACITIVOS

Se basan en medir la distancia entre dos electrodos separados por un material dieléctrico compresible. La ventaja con respecto a los sensores resistivos es que los electrodos nunca se llegan a tocar por lo que el sensor es más sensible y estable. También presentan la ventaja que el electrodo puede ser diseñado con la forma y material conductor para una aplicación específica. Son más costosos que los sensores resistivos.

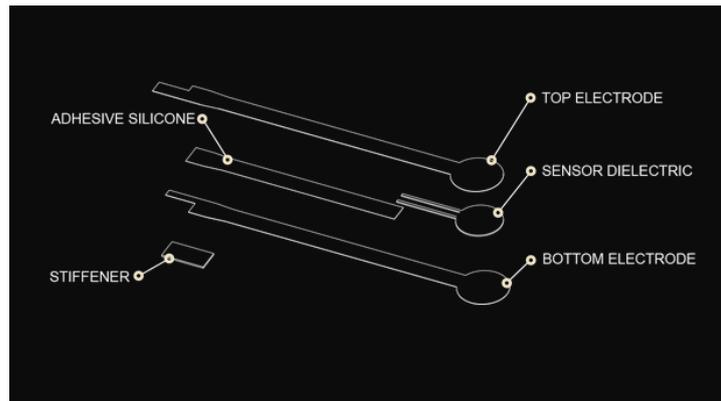


Figura 6: Constitución de un sensor capacitivo.

2.4. SENSORES DE FUERZA ÓPTICOS

Los sensores ópticos FBG (Fiber Bragg grating) tienen una alta sensibilidad y son utilizados en múltiples aplicaciones (medida de fuerza, temperatura, humedad, deformación...). Están constituidos por una fibra óptica, cuando la luz pasa por la fibra, el sensor de fibra óptica refleja la luz en una determinada longitud de onda. Una variación de la deformación o de la fuerza aplicada sobre la fibra óptica produce un cambio de la longitud de onda de la luz reflejada.

2.5. SENSORES DE FUERZA PIEZOELÉCTRICOS

Se basan en someter a una tensión mecánica a un material piezoeléctrico como es el cristal de cuarzo, esta tensión mecánica genera una carga eléctrica proporcional a la fuerza ejercida sobre el material. Debido a la rigidez de los materiales usados, son adecuados para medir fuerzas directamente sobre máquinas formando parte de su estructura, son adecuados para medir fuerzas transitorias. Por otra parte, su rigidez y tamaño los hacen inadecuados para determinadas aplicaciones médicas.

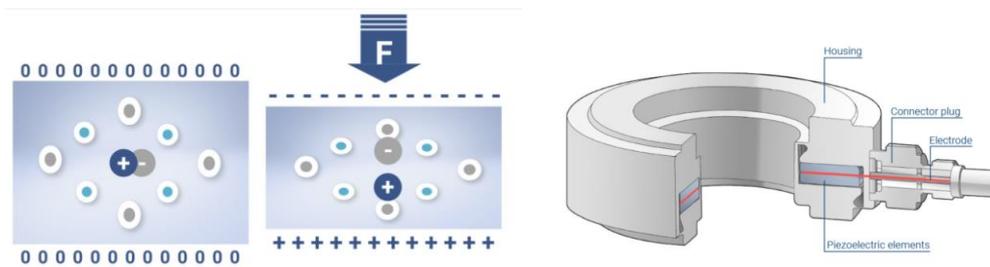


Figura 7: Principio de funcionamiento de los sensores piezoeléctricos.

3. SENSORES FSR EN EL MERCADO Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Se ha realizado la búsqueda de sensores FSR disponibles en el mercado para conocer sus características principales y precios. A continuación, se muestran imágenes con las dimensiones y características principales de los sensores facilitadas en las páginas web de los fabricantes.

3.1. SENSORES DE FUERZA FLEXIFORCE DE TEKSCAN:

FlexiForce A301 Sensor.

Rangos de medición: Bajo (0-4.4 N), Medio (0-111 N) y alto (0-445 N).

Precio: 55,30 \$ (4 unidades)

<https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a301>



Figura 8: Dimensiones y propiedades del sensor A301.

FlexiForce A201 Sensor

Rangos de medición: Bajo (0-4.4 N), Medio (0-111 N) y alto (0-445 N).

Precio: 75,50 \$ (4 unidades)

<https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a201>

Physical Properties

Thickness	0.203 mm (0.008 in.)
Length	191 mm (7.5 in.)** (optional trimmed lengths: 152 mm (6 in.), 102 mm (4 in.), 51 mm (2 in.))
Width	14 mm (0.55 in.)
Sensing Area	9.53 mm (0.375 in.) diameter
Connector	3-pin Male Square Pin (center pin is inactive)
Substrate	Polyester
Pin Spacing	2.54 mm (0.1 in.)

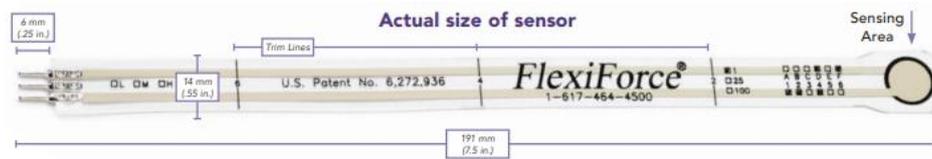


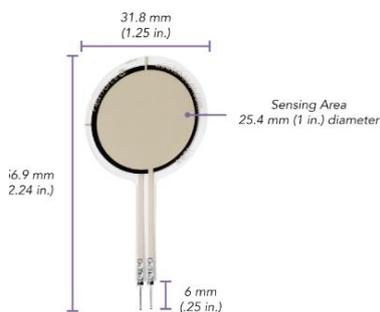
Figura 9: Dimensiones y propiedades del sensor a201.

FlexiForce A401 Sensor

Rangos de medición: 111 N (0 - 25 lb).

Precio: \$87.80 (4 unidades).

<https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a401?tab=specifications-performance>



Sensor Thickness:	0.203 mm (0.008 in.)
Force Sensor Length:	56.9 mm
Sensing Size (Diameter/Width):	25.4 mm
Standard Force:	111 N

Figura 10: Dimensiones y propiedades del sensor a401.

FlexiForce A502 Sensor

Rangos de medición: 222 N

Precio: 111,50 \$ (4 unidades)

<https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a502>

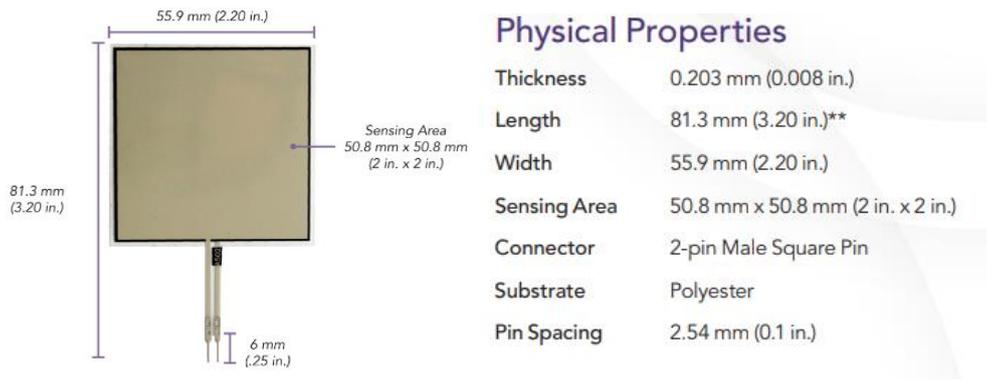


Figura 11: Dimensiones y propiedades del sensor A502.

Equipo de lectura de tekscan (electrónica y software)
Flexiforce ELF system.

The ELF System comes standard with one handle. Additional handles are available for purchase.

FlexiForce ELF System

The ELF Force Measurement System is a complete load and force measurement system with optional multi-point sensing and high speed capabilities.

\$741.60

Software Speed: Standard (200Hz)

Additional Handles: - None -

Quantity: 1

Figura 12: Flexiforce elf system y su precio.

Flexiforce WELF 2 system.

FlexiForce WELF 2 System

The Wireless ELF 2 System is a user-friendly, cost-effective load measurement system, turning your PC or laptop into a complete force measurement instrument.

\$1,299.99

Software Speed: Standard (200Hz)

Additional Transmitters: - None -

Quantity: 1

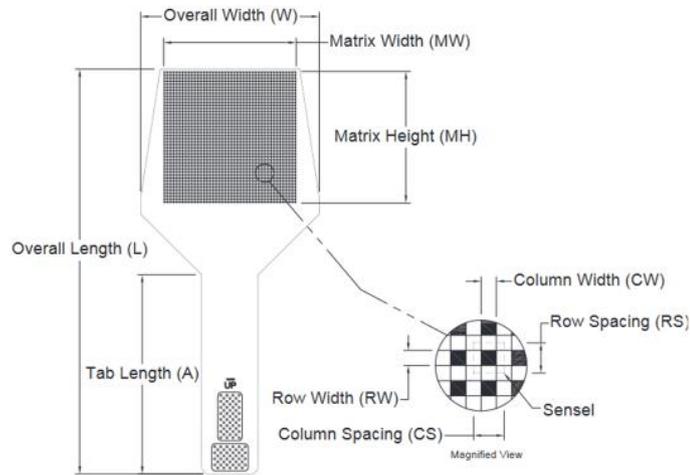
Add to cart

Figura 13: Flexiforce welf 2 system y su precio.

3.2. SENSORES TIPO MATRICIAL DE TEKSCAN

Ejemplos de los sensores matriciales que ofrece el fabricante Tekscan

Pressure Mapping Sensor 5101



General Dimensions			Sensing Region Dimensions									Summary	
Overall Length <i>L</i>	Overall Width <i>W</i>	Tab Length <i>A</i>	Matrix Width <i>MW</i>	Matrix Height <i>MH</i>	Columns			Rows			Total No. of Sensels	Sensel Spatial Resolution	
					<i>CW</i>	Pitch <i>CS</i>	<i>Qty.</i>	<i>RW</i>	Pitch <i>RS</i>	<i>Qty.</i>			
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)			(sensel per sq-cm)	
340.0	149.0	167.3	111.8	111.8	1.3	2.5	44	1.3	2.5	44	1,936	15.5	
(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)		(in)	(in)			(sensel per sq-in)	
13.39	5.86	6.59	4.40	4.40	0.050	0.100	44	0.050	0.100	44	1,936	100.0	

Pressure Ranges								
kPa	41	69	345	1,034	2,413	3,448	20,685	34,475
psi	6	10	50	150	350	500	3,000	5,000

Figura 14: Dimensiones y características del sistema pressure mapping sensor 5101.

Electrónica y software:

I-Scan System: Precio aproximado de todo el sistema (sensor, electrónica y software) > 10.000 \$.

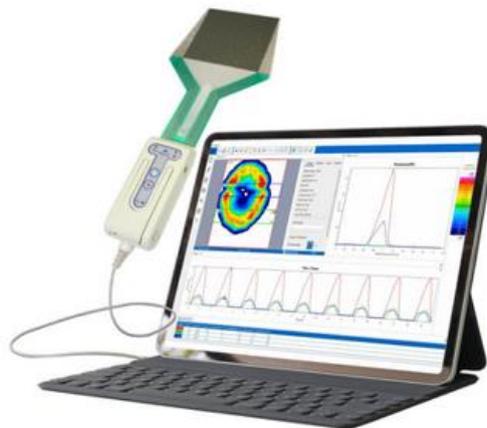


Figura 15: Sistema completo I-Scan System.

3.3. FABRICANTE OHMITE

FSR06 y FSR07.

Rango de aplicación: 20g – 5Kg.

<https://www.ohmite.com/fsr-series/>

Precio: 6,47 € (1 unidad).

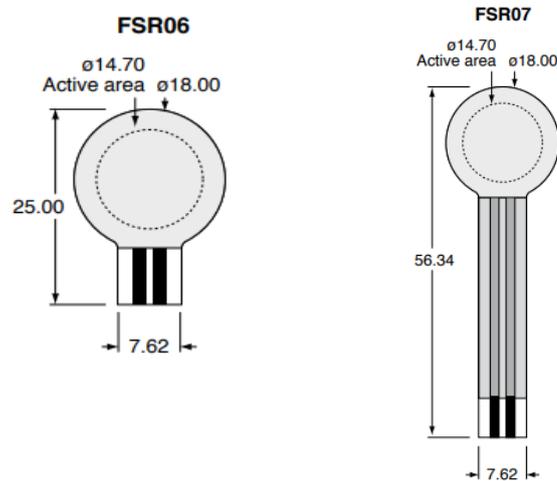


Figura 16: Dimensiones de los sensores FSR de ohmite.

3.4. FABRICANTE INTERLINK

FSR 400.

Rango de medición: 0,2N – 20N.

Precio: 2,52 € (1 unidad FSR402), 3,37 € (1 unidad FSR406).

<https://www.interlinkelectronics.com/fsr-400-series.>



Figura 17: Dimensiones de los sensores FSR402 de Interlink.

3.5. FABRICANTE SENSITRONICS

Precio: 6,73 € (1 unidad).

<https://www.sensitronics.com/products-1-inch-thru-mode-fsr.php>

1-Inch ShuntMode FSR



1 inch active area single zone force sensor. Measure a wide range of values.

Property	Value	Notes
Size Range	1" Diameter.	See line diagram for overall dimensions.
Tail Length with Connector	0.8" (Short-Tail version), 1.3" otherwise	
Force Sensitivity Range	1 lbs. to 100 lbs.	With force spread across active area.
Pressure Sensitivity Range	1 psi to 125 psi	Mechanical Interface dependent
Part-to-Part Force Repeatability	approx. +/- 15% of average resistance	With consistent actuation
Maximum Current	5 mA	

1-Inch ThruMode FSR



1 inch active area single zone force sensor. Sensitive to small forces.

Property	Value	Notes
Size Range	1" Diameter.	See line diagram for overall dimensions.
Force Sensitivity Range	4 lbs. to 40 lbs.	With force spread across active area.
Pressure Sensitivity Range	5 psi to 50 psi	Mechanical Interface dependent
Part-to-Part Force Repeatability	approx. +/- 15% of average resistance	With consistent actuation
Maximum Current	5 mA	

Figura 18: Dimensiones y características de los sensores Sensitronics.

3.5.1. SENSORES DE TIPO MATRICIAL DE SENSITRONICS.

Truemode Matrix Array

Dimensiones área activa: 5,08 x 7,62 cm.

Medida de fuerzas bajas.(68 kg max)

Precio: 25,13 €.

<https://www.sensitronics.com/products-thru-mode-matrix-array.php>

Property	Value	Notes
Size Range	2"x3" Active Area	See line diagram for overall dimensions.
Force Sensitivity Range	.25 lbs to 12.5 lbs.	With force spread on a .5 in area.
Pressure Sensitivity Range	.5 psi to 25 psi	Mechanical Interface dependent

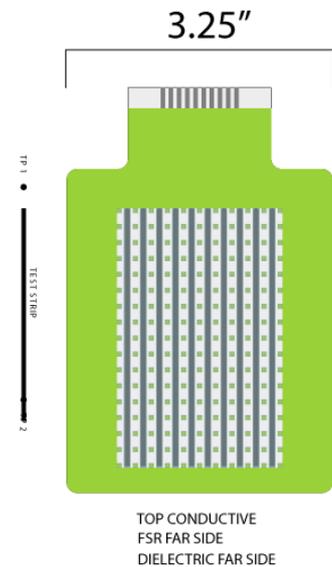


Figura 19: Dimensiones y características de la matriz TrueMode de Sensitronics.

Medida de la fuerza mediante sensores de tipo film

ShuntMode MatrixArray

Dimensiones área activa: 10,16x 10,16 cm.

Medida amplio rango de fuerzas/presiones.

Precio: 29,32 €.

<https://www.sensitronics.com/products-shunt-mode-matrix-array.php>

Property	Value	Notes
Size Range	4"x4" Active Area	See line diagram for overall dimensions.
Force Sensitivity Range	1 lbs to 50 lbs.	With force spread on a .5" area.
Pressure Sensitivity Range	5 psi to 100 psi	Mechanical Interface dependent

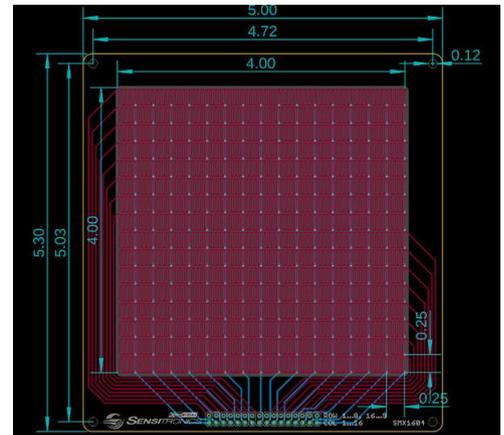


Figura 20: dimensiones y características de la matriz shuntmode de sensitronics.

Ejemplo de electrónica propuesta por Sensitronics:

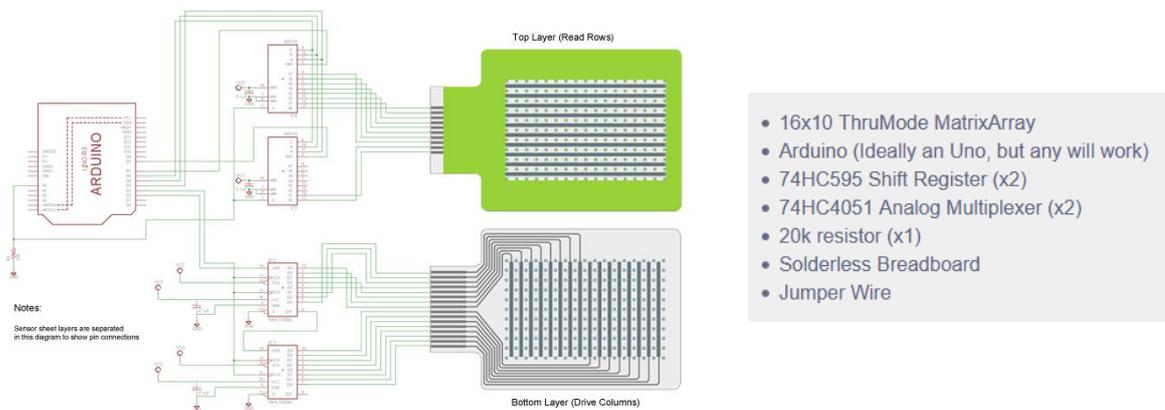


Figura 21: Circuito eléctrico y componentes propuestos por sensitronics.

3.6. FABRICANTE PERATECH
<https://www.peratech.com/sp200-10/>



Advantages	Applications	BOM
<ul style="list-style-type: none"> > High sensitivity, 10g activation > Low power consumption at rest > Repeatable and reliable force curve > Requires real force to activate reducing false activation > Minimal RFI interference, strong signal to noise ratio > Thin, light and compact > Robust, minimal moving parts and risk of ingress > Optimum environmental stability, and high temperature durability (finger electrodes) 		

The range of usable force for SP200 sensors gives excellent active resistance change up to 2kg. In addition, SP200 sensors also show excellent stability to environmental conditions and high temperature operation.

Figura 22: Características de los sensores Peratech.

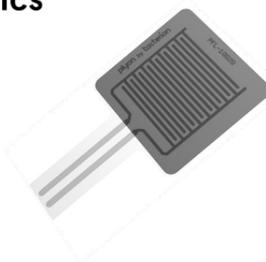
3.7. FABRICANTE TACTERION

Sensores Capacitivos/Resistivos

<https://www.tacterion.com/product/plyon-square>

2. Sensor characteristics

Key Features
<ul style="list-style-type: none"> • Resistive (Force) and Capacitive (Proximity, Touch) Readout • Excellent Signal Integrity under Bending • Highly Customizable Layers • Small, Thin and Durable • Simple Electrical Interface



Properties ²	Value
Minimal detectable force ³ :	0.5 N cm ⁻²
Overforce tolerance ³ :	1 kN cm ⁻²
Measurement range ³ :	[0.5, 15] N cm ⁻²
Non-Actuated Resistance:	>50MΩ
Operating Voltage Range:	≤ 5 V

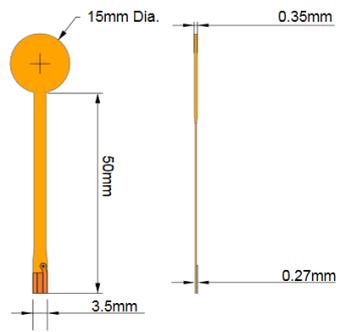
Figura 23: Características y propiedades de los sensores tacterion.

3.8. FABRICANTE SINGLETACT

Sensores capacitivos

Precio: 16,77 €.

<https://www.singletact.com/micro-force-sensors/standard-sensors/>



SENSORS

S15-4.5N
+Full scale Range: 0.45kg (1.0lbs)
+Minimal Detectable Force: 0.9g

S15-45N
+Full scale Range: 4.5kg (10lbs)
+Minimal Detectable Force: 9g

S15-450N
+Full scale Range: 45kg (100lbs)
+Minimal Detectable Force: 90g

CALIBRATED SENSORS

CS15-4.5N
+Full scale Range: 0.45kg (1.0lbs)
+Minimal Detectable Force: 0.9g

CS15-45N
+Full scale Range: 4.5kg (10lbs)
+Minimal Detectable Force: 9g

CS15-450N
+Full scale Range: 45kg (100lbs)
+Minimal Detectable Force: 90g

Figura 24: Dimensiones y características de los sensores Singletact.

3.9. FABRICANTE TACTILUS

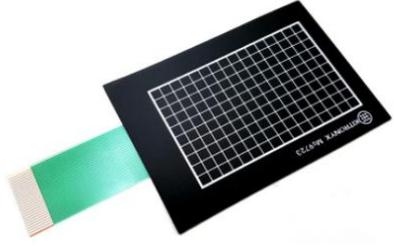
<https://sensorprod.com/shopping-cart/tactilus-free-form/round-sensors/>

 <p>Round Sensor 4 mm 0-100 PSI</p>	<p>Tactilus Free Form Round Sensor 4mm Size Diameter: 4 mm Approximate Pressure Range: 0 - 100 PSI Thickness: 0.20 mm</p> <p>\$4.70</p> <p>Add to cart</p>	 <p>Square Sensor 40 mm x 40 mm 0-50 PSI</p>	<p>Tactilus Free Form Square Sensor 40mm Size Dimensions: 40mm x 40mm Approximate Pressure Range: 0 - 50 PSI Thickness: 0.28 mm</p> <p>\$5.00</p> <p>Add to cart</p>
 <p>Round Sensor 10 mm 0-100 PSI</p>	<p>Tactilus Free Form Round Sensor 10mm Size Diameter: 10 mm Approximate Pressure Range: 0 - 100 PSI Thickness: 0.20 mm</p> <p>\$5.50</p> <p>Add to cart</p>	 <p>Square Sensor 8 mm x 8 mm 0-100 PSI</p>	<p>Tactilus Free Form Square Sensor 8mm Size Dimensions: 8mm x 8mm Approximate Pressure Range: 0 - 100 PSI Thickness: 0.20 mm</p> <p>\$10.00</p> <p>Add to cart</p>

Figura 25: Dimensiones y características de los sensores Singletact.

3.10. FABRICANTE KITRONYX

https://www.kitronyx.com/store/p30/%5BMS9723%5D_FSR_Matrix_Array_Sensor_%2816x10_Rows_and_Columns_%2F_80mm_x_50mm_Active_Sensing_Area%29.html



[MS9723] FSR Matrix Array Sensor (16x10 Rows and Columns / 80mm x 50mm Active Sensing Area)
80,00 US\$ SKU: MS9723

80.0 x 50.0m (mm) active sensing area matrix sensor with 16x10 electrodes and 160 sensing locations.

f t p G+

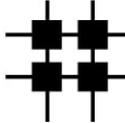
					
Size 73 X 105 mm	Sensing Area Size 50 X 80 mm	Sensel Size 5 x 5 mm	Pressure Range 1 ~ 4 kgf/cm2	Temperature Range -20 ~ 60 °C	Compatible Electronics Tinn

Figura 26: Dimensiones y características de los sensores Kitronyx.



Snowboard 2 Plus
330,00 US\$ SKU: SNOWBOARD2PLUSHP

Snowboard 2 Plus is an enhanced version of our popular Snowboard 2 and an entry level force and tactile sensor HDK (Hardware Development Kit). It is designed to work with any resistive type matrix sensors including FSR matrix sensors. It also supports popular single point FSR sensors.

By purchasing the Snowboard 2 Plus you actually get

- Force sensing controller (sensor is not included). Snowboard 2 can acquire data from a matrix sensor or 10 single points FSR sensors.
- Snowboard 2 Plus is an all-in-one force sensing development platform
- Multiple point force sensing without crosstalk for entry level pressure mapping, pressure distribution sensing, and tactile sensing applications
- Works standalone or with other microcontrollers such as Arduino

Figura 27: Electrónica ofrecida por Kitronyx.

3.11. 3M VELOSTAT

El fabricante 3M ofrece un film de material compuesto piezoeléctrico formado por un polímero y partículas de carbono similar a los utilizados por los sensores FSR disponibles en el mercado. Con este film es posible diseñar y construir sensores puntuales o matriciales personalizados. La precisión y repetibilidad de estos sensores dependen en gran medida de los materiales utilizados, disposición de

los electrodos, procedimiento de calibración adecuado etc. Se puede adquirir una lámina de dimensiones 28x28 cm por 4,85 €.



Figura 28: Film piezorresistivo de Velostat.

https://es.farnell.com/adafruit-industries/1361/accessory-type-conductive-sheet/dp/2419170?gclid=CjwKCAjwgOGCBhAIEiwA7FUXkIXfMBO82Gho2ogNHBnqVOXoKiTRRuV-HTRO7rEjtryGhVxTSEuU7RoC4uIQAvD_BwE&mckv=sUBsRDwsn_dc|pcrid|491327006346|plid||kword||match||slid||product|2419170|pgrid|117798495964|ptaid|pla-338222698227&CMP=KNC-GEN-GEN-SHOPPING-SMEC-Whoops-High-Desktop-09-Dec-2020&gross_price=true

4. ESTUDIO DE LOS SENSORES FSR Y DISEÑO DE LOS ENSAYOS

Se ha realizado primeramente la búsqueda y estudio de artículos científicos relacionados con los sensores FSR, artículos científicos donde se describen sus características principales, linealidad, histéresis, drift o deriva, repetibilidad, precisión, influencia de fuerzas cortantes y demás variables. Se han estudiado más a fondo artículos científicos relacionados con la calibración de estos sensores en aplicaciones médicas, en las cuales los sensores están sometidos a fuerzas cortantes y curvatura debido al entorno en el que están integrados (materiales deformables como espumas de prótesis/órtesis y piel humana. También se ha realizado el estudio de las guías de integración mecánica y eléctrica que proponen los distintos fabricantes para realizar calibraciones adecuadas de los sensores FSR.

Una vez realizado el estudio de los distintos artículos científicos se ha procedido a diseñar una serie de ensayos para verificar y a continuación calibrar los sensores FSR para una aplicación concreta (medición de fuerza/presión entre una órtesis y el cuerpo humano).

De los artículos científicos y guías de los fabricantes se han sacado diversas conclusiones para diseñar los ensayos y calibraciones:

- Calibración del sensor mediante la aplicación de una fuerza al sensor y a una célula de carga simultáneamente.
- Para que la calibración sea correcta, se debe realizar el montaje del sensor de una forma aproximada a la aplicación real (materiales, posición, curvatura...), se debe aplicar fuerzas similares e intervalos de tiempo similares en los que la fuerza es aplicada, es decir, una calibración específica.
- Se debe ejercer la fuerza en la misma área de forma repetida, es decir, la fuerza ejercida debe pasar por la mayor parte del área sensible del sensor, no es correcto que se ejerza una fuerza sobre un área mayor o menor que el área sensible del sensor FSR.

4.1. CONFIGURACIÓN DEL SENSOR EN LOS ENSAYOS

Para realizar las verificaciones de los sensores se han elegido dos tipos de configuraciones que simulan el posicionamiento del sensor para la medición de fuerza/presión entre una órtesis y el cuerpo humano, a continuación, se muestran las configuraciones elegidas:

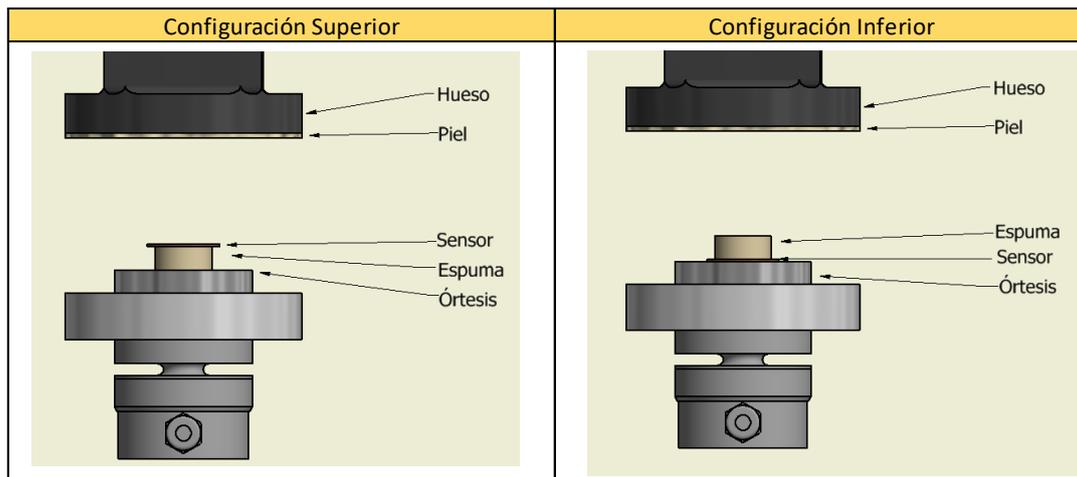


Figura 29: Configuraciones elegidas para los ensayos.

Se han diseñado y creado distintos utillajes y actuadores mediante impresión 3D para simular las condiciones de los sensores dentro de una órtesis. El actuador simula la zona del cuerpo en la que está situado el sensor FSR (por ejemplo, la cabeza, hueso y piel de 1,2 mm). En la zona inferior del esquema se sitúa en contacto con la célula de carga la zona de la órtesis donde está colocado el sensor (espuma adherida al material de la órtesis).

Materiales:

- Hueso y órtesis: PLA (ácido poliláctico).
- Piel y espuma: Goma Eva.

Se ha elegido un diámetro de la espuma del 80 % del diámetro del área sensible para así garantizar que aproximadamente toda la fuerza pasa por el sensor.

Vista en 3 dimensiones de la configuración del sensor en los ensayos:

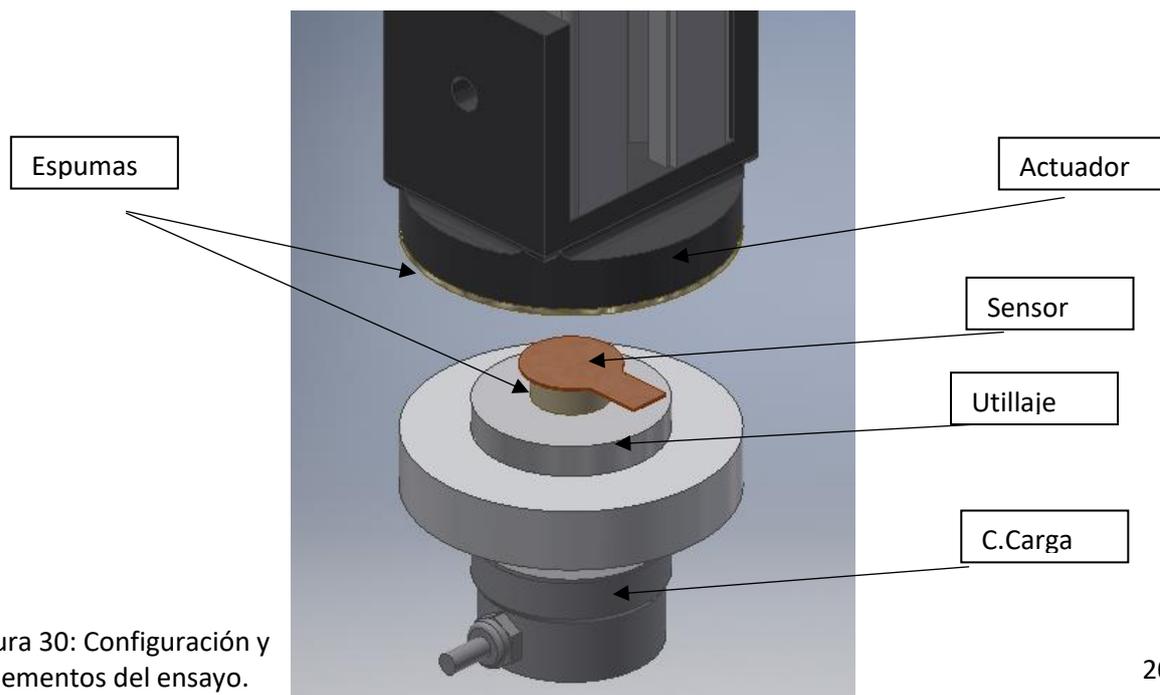


Figura 30: Configuración y elementos del ensayo.

4.2. ENSAYOS PROPUESTOS: VARIABLES ELEGIDAS

En la siguiente tabla se recogen las variables de elegidas:

Variables							
Espesor Piel	Espesor Espuma	Geometría/Curvatura (radio en mm)	F.Cortante	Puck	Tecnología	Posición sensor	Fabricantes
1,20mm (Cabeza)	6 mm	Plano	NO	Sin Puck	FSR Puntual	Configuración Superior	Intelink
10mm (Tórax)		60 mm					
5mm (Tórax)	10 mm	80 mm	Si	Puck	FSR Matriz	Configuración Inferior	Sensitronics
							Tekscan

Figura 31:Tabla con la variables a estudiar elegidas.

Espesor piel: Simula el espesor de la zona de la piel donde es colocado el sensor, distinción entre cabeza y tórax.

Espesor Espuma: Simula el espesor de la espuma de la zona de la ortesis donde es colocado el sensor.

Geometría/Curvatura: Simula el radio de curvatura de la zona en la cual es colocado el sensor.

Fuerza Cortante: Simula la introducción de fuerzas cortantes o de rozamiento sobre la superficie sensible del sensor.

Puck: Disco deformable con un diámetro similar al del área sensible del sensor, permite conseguir que una fuerza ejercida sobre un área mayor a la del sensor pase por el “puck” y así transmitir toda la fuerza al sensor.

Tecnología: Sensores puntuales o tipo matriz

Posición del sensor: El sensor se coloca sobre la espuma o entre la espuma y la órtesis, esquemas descritos en la figura x.

Fabricantes: Se han estudiado tres fabricantes: Intelink, Sensitronics y Tekscan.

4.3. SENSORES Y FABRICANTES ENSAYADOS

Interlink:

Rango de fuerza: 0,2 a 20N

Tecnología: Shuntmode.

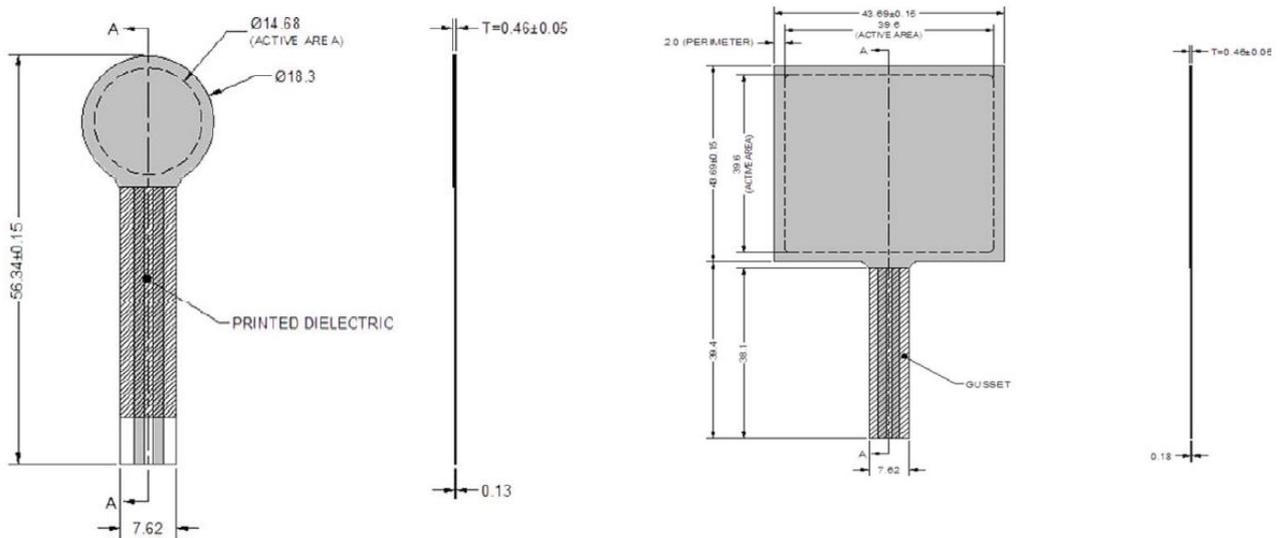


Figura 32: Sensores Interlink utilizados y sus dimensiones.

Sensitronics:

1 Inch ThruMode FSR

Rango de fuerza: 0,1-181 N.

Tecnología: Truemode.

Diámetro área sensible 25,4 mm.



Figura 33: Sensor Truemode de Sensitronics.

Tekscan:

FlexiForce A201

Rango de fuerza: 0-111N.

Tecnología: Truemode.

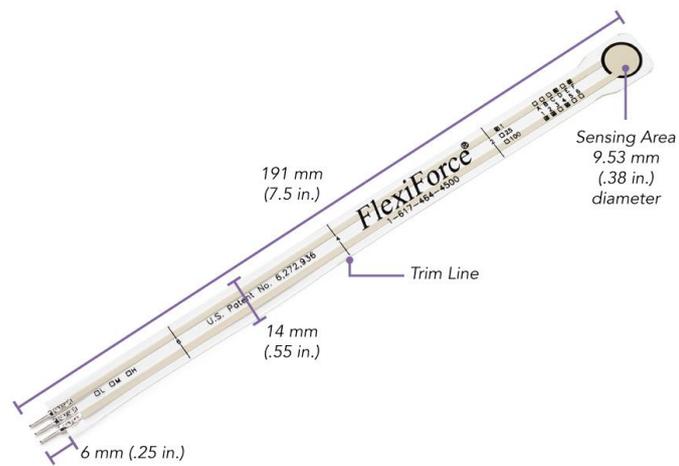


Figura 34: Sensor FlexiForce A201 de Tekscan.

5. ESTUDIO DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS PARA LOS SENSORES FSR

Los sensores FSR presentan una variación de resistencia cuando se ejerce sobre su área sensible una fuerza/presión, es decir, se puede medir una variación de tensión cuando el sensor está integrado en un circuito eléctrico como por ejemplo un divisor de tensión.

Se ha realizado un estudio de las guías de integración eléctrica que proporcionan los fabricantes Interlink y Tekscan para decidir cuál es el circuito eléctrico adecuado para realizar los ensayos y calibraciones.

Circuitos y componentes propuestos por Tekscan:

Circuito Inversor:

Ventajas:

- Salida lineal.
- Rango 0-Vsupply.

Desventajas:

- 2 alimentaciones.

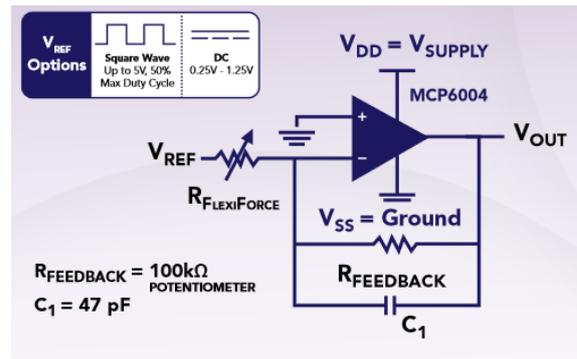


Figura 35: Circuito inversor propuesto por Tekscan.

Circuito no inversor:

Ventajas:

- Salida lineal
- 1 alimentación.

Desventajas:

- Rango de medida: V_{ref}-V_{supply}.

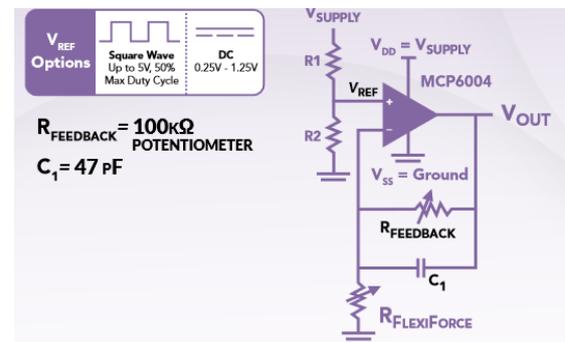


Figura 36: Circuito no inversor propuesto por Tekscan.

Divisor de tensión:

Ventajas:

- Simple
- 1 Alimentación

Desventajas:

- Menor linealidad
- No existe separación entre circuitos

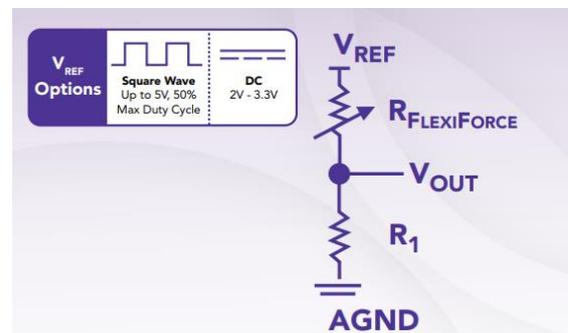


Figura 37: Circuito divisor de tensión propuesto por Tekscan.

Circuitos y componentes propuestos por Interlink:

Divisor de tensión:

- No lineal.
- Simple y barato.
- Se ajusta R_m para obtener la sensibilidad deseada.

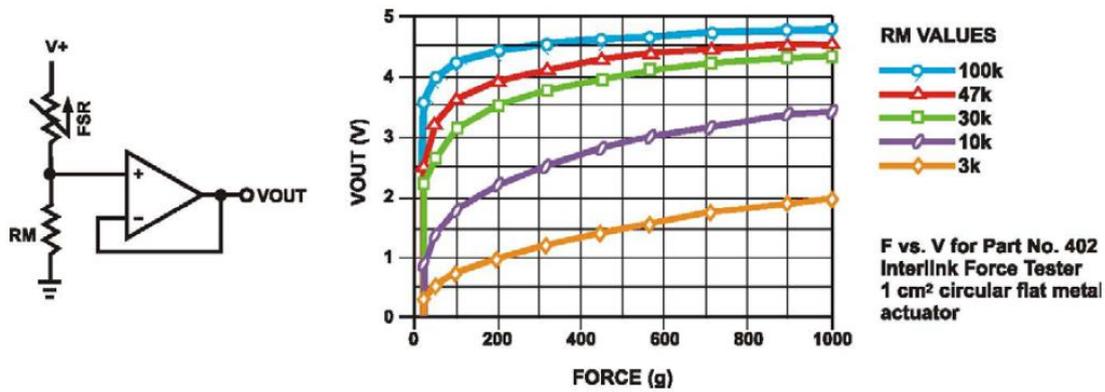


Figura 38: Divisor de tensión propuesto por Interlink.

Convertidor Corriente-Tensión:

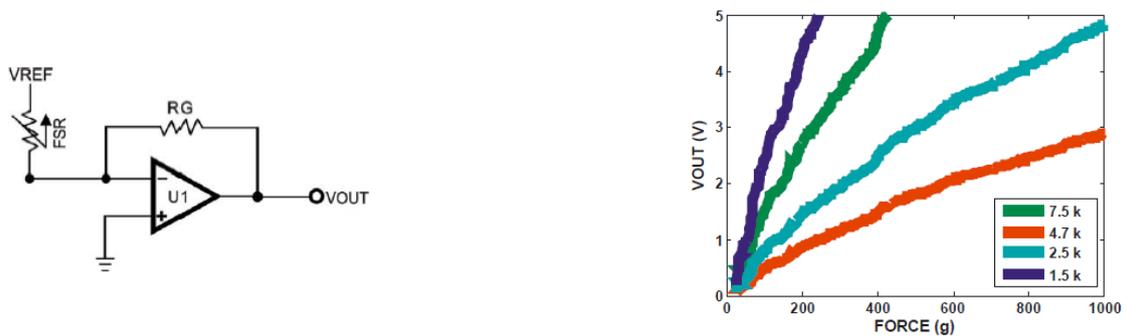


Figura 39: Convertidor Corriente-Tensión propuesto por Interlink.

- Linealidad y resolución óptimas.
- Amplificador LM324.
- $V_{ref} = 5$ V.

5.1. CIRCUITO ELEGIDO

Finalmente se ha elegido diseñar un circuito convertidor corriente-tensión similar al propuesto por Interlink para obtener una señal de tensión amplificada y lo más lineal posible.

Componentes:

Medida de la fuerza mediante sensores de tipo film

- Amplificador LM324.
- Regulador de tensión L7905CV.
- 2 potenciómetros de 100 Ω y 100 k Ω .
- 2 resistencias de 47 Ω .
- Conectores.

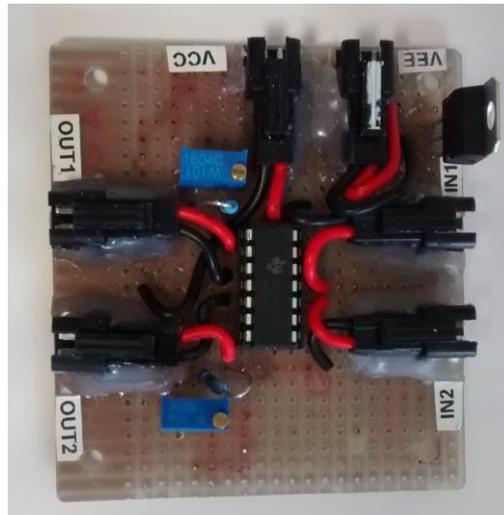


Figura 40: Circuito amplificador utilizado en los ensayos.

La tensión de referencia proporcionada por el inversor de tensión es de -5 V para obtener una tensión de salida del amplificador positiva, el amplificador está alimentado durante los ensayos por una fuente de alimentación de laboratorio a ± 9 V. La placa permite la conexión de 2 sensores.

5.2. ANÁLISIS DEL CIRCUITO Y SU LINEALIDAD ELÉCTRICA

Se ha comprobado experimentalmente la linealidad del circuito convertidor corriente-tensión y su error. Para ello, se ha usado un potenciómetro de 10 k Ω simulando un sensor conectado al circuito amplificador, la salida del circuito amplificador se ha conectado a una tarjeta usb-6000-Ni (dispositivo DAQ), y está conectada por usb a un ordenador para leer la tensión de salida con el programa labview. Se han ido midiendo las tensiones de salida variando la resistencia del potenciómetro en el rango 0-10.000 Ω . Se ha comprobado el conector 2 del circuito.

La salida teórica de tensión del circuito convertidor corriente-tensión se describe mediante la siguiente ecuación:

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(\frac{-R_G}{R_{FSR}} \right)$$

- V_{out} (Tensión de salida).
- V_{ref} (Tensión de referencia -5 V).
- $-R_G$ (Resistencia de realimentación 95,2 Ω del conector 2).
- R_{FSR} (Resistencia variable del sensor, en este ensayo, potenciómetro 10 k Ω).

Recta teórica frente a recta real:

Se ha calculado V_{out} en diez puntos distribuidos uniformemente en el intervalo 0-10 k Ω :

Recta Teórica(2)		
R (Ω)	1/R	Vout
9760	0,0001025	0,0487705
8760	0,0001142	0,0543379
7760	0,0001289	0,0613402
6760	0,0001479	0,0704142
5760	0,0001736	0,0826389
4760	0,0002101	0,1
3760	0,000266	0,1265957
2760	0,0003623	0,1724638
1760	0,0005682	0,2704545
760	0,0013158	0,6263158

Recta Real (2)		
R (Ω)	1/R	Vout
9760	0,0001025	0,0485
8760	0,0001142	0,051
7760	0,0001289	0,061
6760	0,0001479	0,07
5760	0,0001736	0,082
4760	0,0002101	0,102
3760	0,000266	0,1275
2760	0,0003623	0,173
1760	0,0005682	0,271
760	0,0013158	0,634

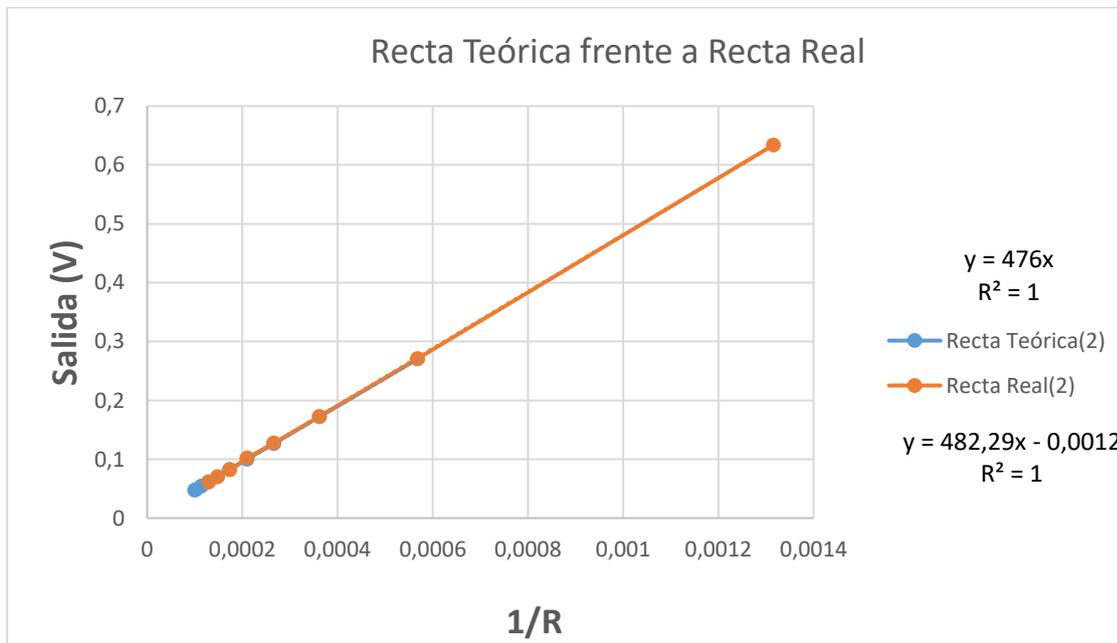


Figura 41: Recta Teórica frente a Recta Real.

R (Ω)	Error (V)	Error (%)	Error (%) Medio
7760	0,0003402	0,5546218	0,638780981
6760	0,0004142	0,5882353	
5760	0,0006389	0,7731092	
4760	0,002	2	
3760	0,0009043	0,7142857	
2760	0,0005362	0,3109244	
1760	0,0005455	0,2016807	
760	0,0076842	1,2268908	

Figura 42: Error en cada punto.

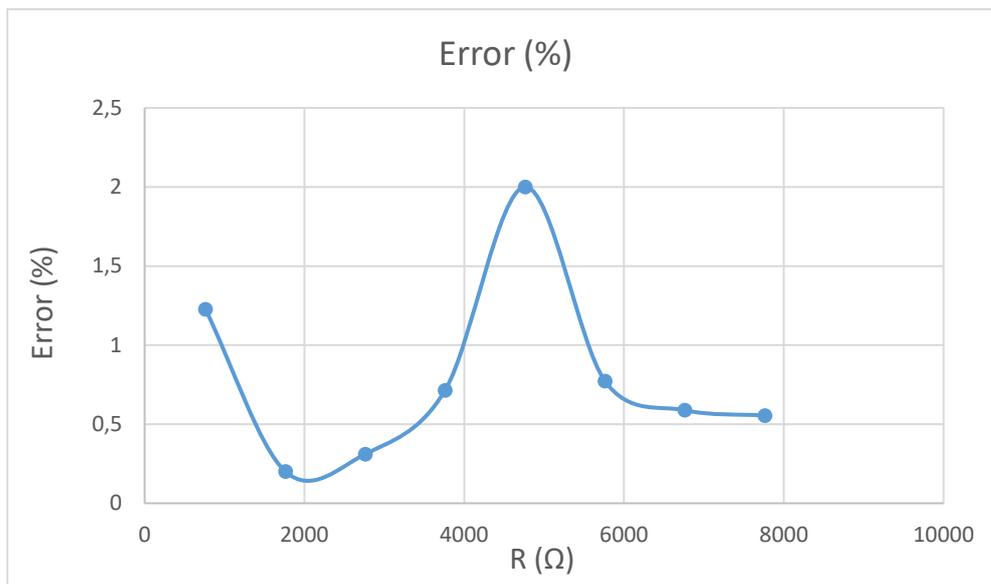


Figura 43: Error relativo en cada punto.

6. EQUIPO UTILIZADO PARA REALIZAR LOS ENSAYOS

Para realizar los ensayos y calibraciones se ha utilizado el circuito amplificador antes descrito, su salida está conectada a una tarjeta DAQ NI-6000 para enviar la lectura por usb a un ordenador, el procesamiento de los datos se realiza con el programa labview. El circuito amplificador está conectado a una fuente de alimentación de laboratorio.



Figura 44: Equipo utilizado en los ensayos.

Los ensayos se han realizado en una máquina de ensayos provista de una célula de carga U93/1KN en la que la fuerza es ejercida manualmente, a célula de carga está conectada al ordenador mediante una tarjeta NI-9237. Máquina de ensayos:

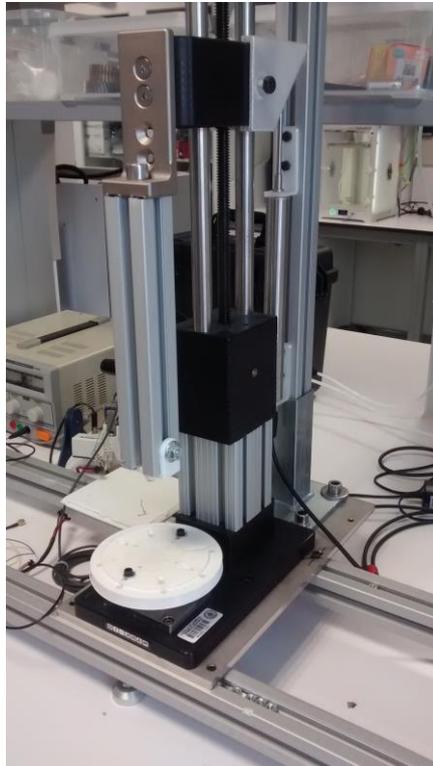


Figura 45: Máquina de ensayos.

7. ENSAYOS REALIZADOS CON LOS SENSORES FSR

Se han realizado una serie de ensayos combinando las distintas variables (espesor espumas, configuración, fuerzas etc.). Los ensayos se han realizado en un rango de fuerza de 0 a 20 N. Los ensayos efectuados han sido de tipo estático, con una aplicación de la carga de aproximadamente 0,52 mm/s. La resistencia de realimentación del circuito amplificador se ha modificado para realizar las medidas con los tres tipos de fabricantes. Con los sensores de Interlink se ha utilizado una resistencia de 100 Ω , con Sensitronics 1 k Ω , con Tekscan 50 k Ω . Los ensayos realizados se han guardado en archivos Excel. En las siguientes tablas se muestran los ensayos realizados:

Tabla de variables con una parte de los ensayos realizados con Interlink:

Variables									Rango Fuerza	Aplicación Fuerza
Nº Verificación	Espesor Piel	Espesor Espuma	Curvatura	Fuerza cortante	Puck	Tecnología	Posición sensor	Fabricante		
Verificación 1	1,20 mm (Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 2	1,20 mm (Cabeza)	6mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Salto_2N_20s
Verificación 3	1,20 mm (Cabeza)	6mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 4	1,20 mm (Cabeza)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 5	1,20 mm (Cabeza)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Salto_2N_20s
Verificación 6	1,20 mm (Cabeza)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 7	1,20 mm (Cabeza)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Salto_2N_20s
Verificación 8	5mm (Torax)	6 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 9	5mm (Torax)	6mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 10	5mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 11	5mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Salto_2N_20s
Verificación 12	5mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 13	5mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Salto_2N_20s
Verificación 14	10mm (Torax)	6 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 15	10mm (Torax)	6 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Salto_2N_20s
Verificación 16	10mm (Torax)	6mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 17	10mm (Torax)	6mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Salto_2N_20s
Verificación 18	10mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 19	10mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-20 N	Salto_2N_20s
Verificación 20	10mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-10N	2min-10N
Verificación 21	10mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Inf	Interlink	0-10N	5min-10N
Verificación 22	10mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Continuo hasta 20N
Verificación 23	10mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-20 N	Salto_2N_20s
Verificación 24	10mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-10N	2min-10N
Verificación 25	10mm (Torax)	10 mm	Plano	No	No	FSR Puntual (402)	Configuración.Sup	Interlink	0-10N	5min-10N

Ensayos realizados con los sensores del fabricante Tekscan:

Variables									Rango Fuerza	Aplicación Fuerza
Nº Verificación	Espesor Piel	Espesor Espuma	Curvatura	Fuerza cortante	Puck	Tecnología	Posición sensor	Fabricante		
Verificación 1	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-20N	Continuo hasta 20 N
Verificación 3	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-20 N	Histéresis 0-20 N
Verificación 5	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-10N	Drift 10 N_2min
Verificación 6	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-10N	Drift 10 N_5min
Verificación 7	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-20 N	Carga 15 N Descarga 6 N
Verificación 9	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	Si	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-20 N	F.Normal 10N_F.cortante 4,2N
Verificación 10	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	Si	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-6 N	F.Normal 6N_F.cortante 2,1N
Verificación 11	Sin piel	Sin espuma	Plano	No	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-20 N	Creep_material_sensor
Verificación 12	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-20N	5_10_20(N)_30s
Verificación 13	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual(A201)	C.Superior	Tekscan	0-20N	5_10_20(N)_1min

Ensayos realizados con los sensores del fabricante Sensitronics:

Variables									Rango Fuerza	Aplicación Fuerza
Nº Verificación	Espesor Piel	Espesor Espuma	Curvatura	Fuerza cortante	Puck	Tecnología	Posición sensor	Fabricante		
Verificación 1	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-20N	Continuo hasta 20 N
Verificación 3	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-20 N	Histéresis 0-20 N
Verificación 5	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-10N	Drift 10 N_2min
Verificación 6	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-10N	Drift 10 N_5min
Verificación 9	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	Si	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-20 N	F.Normal 20N_F.cortante 4,2N
Verificación 10	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	Si	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-6 N	F.Normal 6N_F.cortante 2,1N
Verificación 11	Sin piel	Sin espuma	Plano	No	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-20 N	Creep_material_sensor
Verificación 12	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-20N	5_10_20(N)_30s
Verificación 13	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	No	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-20N	5_10_20(N)_1min
Verificación 14	1,2 mm(Cabeza)	6 mm	Plano	Si	No	FSR puntual_Sensitronics	C.Superior	Sensitronics	0-20 N	F.Normal 10N_F.cortante 4,2N

7.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON EL SENSOR FSR402(1) DE INTERLINK.

A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos en los primeros ensayos realizados con el sensor FSR402 de Interlink, se ha estudiado la respuesta del sensor (voltaje de salida) para distintos niveles de carga e intervalos de tiempo. Se han realizado los ensayos con dos configuraciones distintas mostradas en los siguientes esquemas para comprobar si hay diferencias significativas entre ambas.

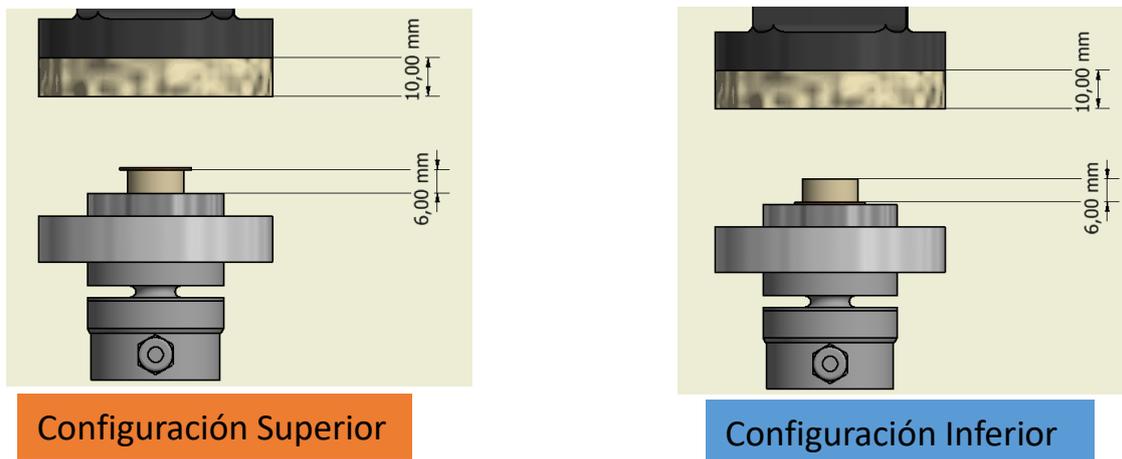


Figura 46: Esquemas de las dos configuraciones elegidas.

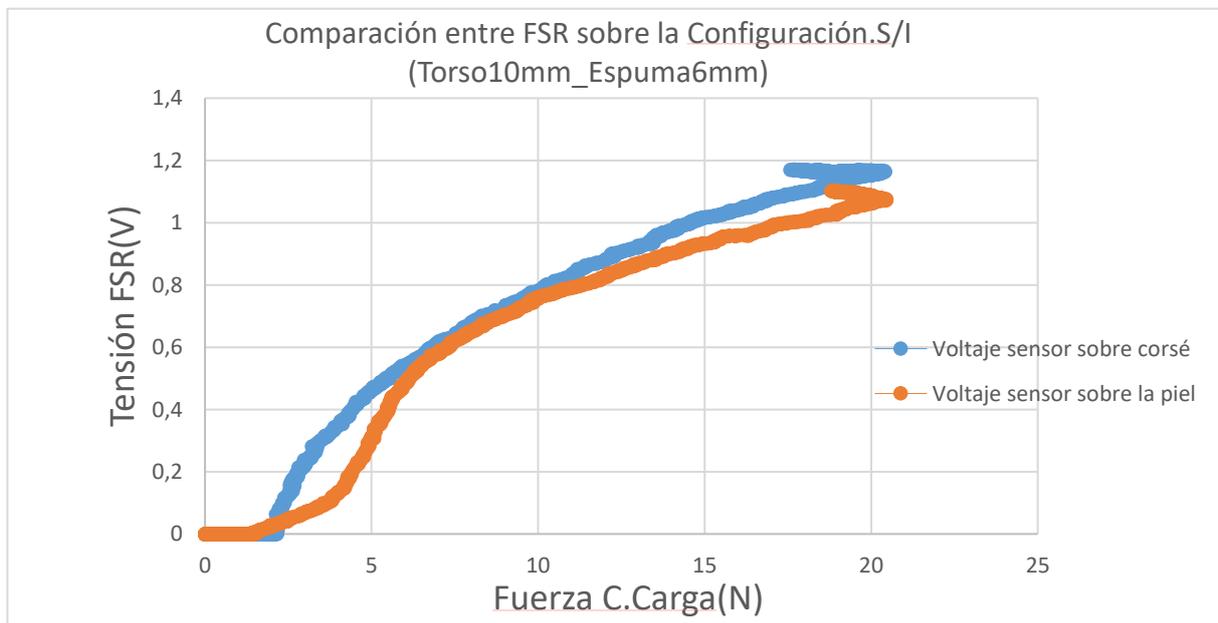


Figura 47: Resultados del ensayo para las dos configuraciones.

En el ensayo anterior se muestra la salida de voltaje del sensor para las dos configuraciones en función de la fuerza ejercida. Se ha ejercido la fuerza en un intervalo de tiempo corto (0,5 mm/s) hasta llegar a los 20 N. los sensores inicialmente presentan un comportamiento no

lineal hasta aproximadamente los 7,5 N, a partir de los cuales presentan un comportamiento similar.

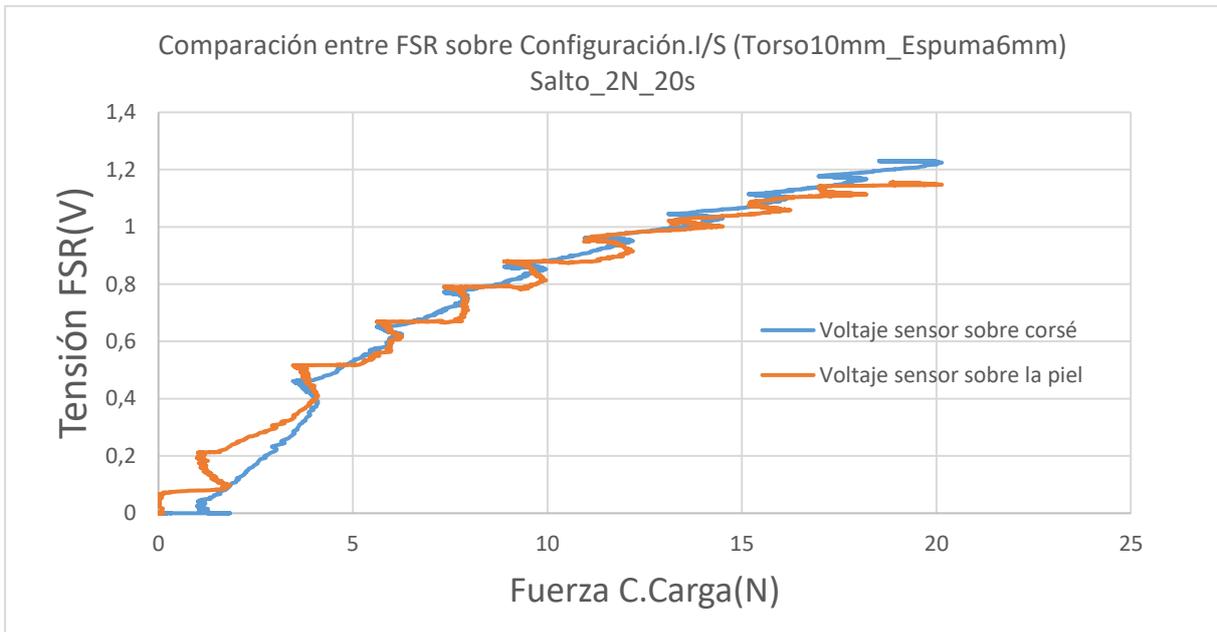


Figura 48: Comparación de las dos configuraciones en saltos de 2 N e intervalos de 20 s.

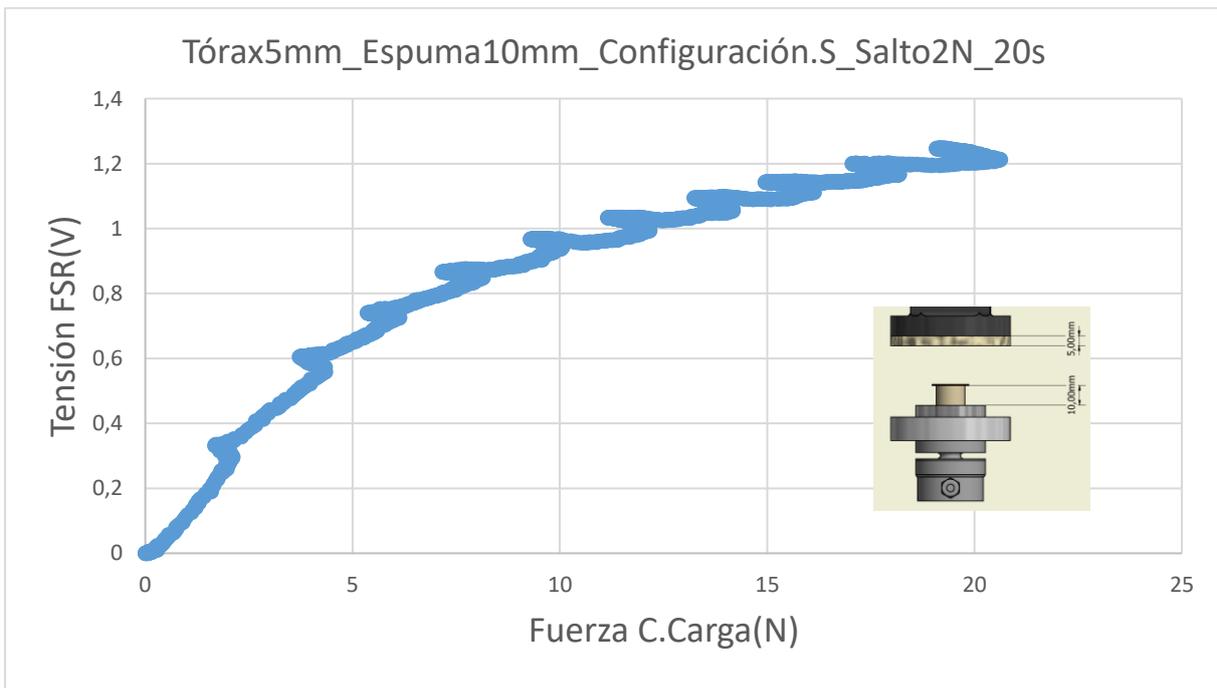


Figura 49: Tórax 5mm Espuma10mm Configuración Superior Salto 2 N 20 s.

En las gráficas mostradas anteriormente no se observa una diferencia significativa entre las dos configuraciones.

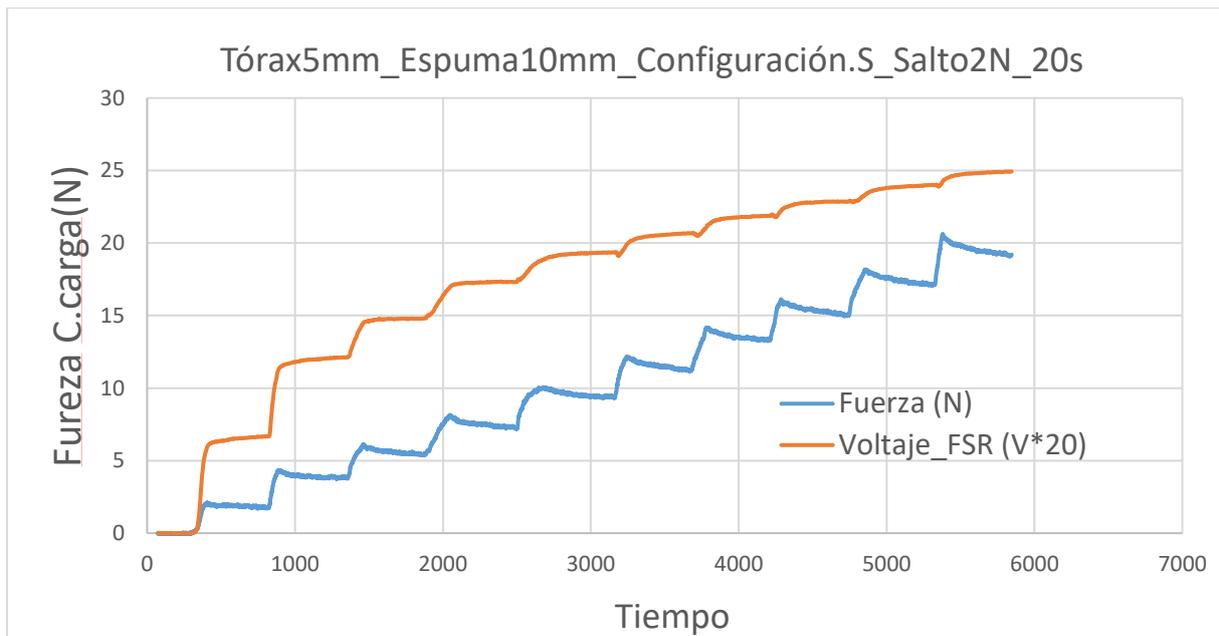


Figura 50: Tórax 5mm Espuma 10 mm Configuración.S Salto 2 N 20 s, escalado del voltaje.

En las gráficas anteriores se aprecia como se incrementa el voltaje de salida del sensor mientras que la espuma se relaja, este fenómeno puede deberse a varios factores como son : deriva o drift del sensor, es decir un aumento del voltaje de salida en el tiempo cuando se ejerce una carga sobre el sensor, también este incremento del voltaje de salida puede deberse a las fuerzas cortantes que la espuma ejerce sobre la superficie del sensor cuando se deforma transversalmente, las fuerzas cortantes ejercidas sobre el sensor deforman el material piezorresistivo del sensor disminuyendo su sección, es decir que disminuye la resistencia que ofrece el material al paso de la corriente, por lo que la tensión de salida del sensor se incrementa.

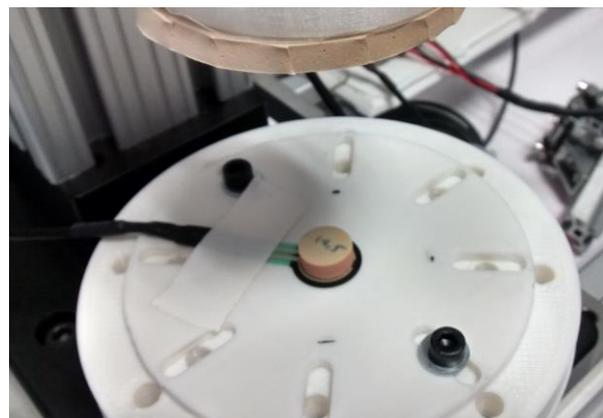


Figura 51: Imágenes de las dos configuraciones durante los ensayos.

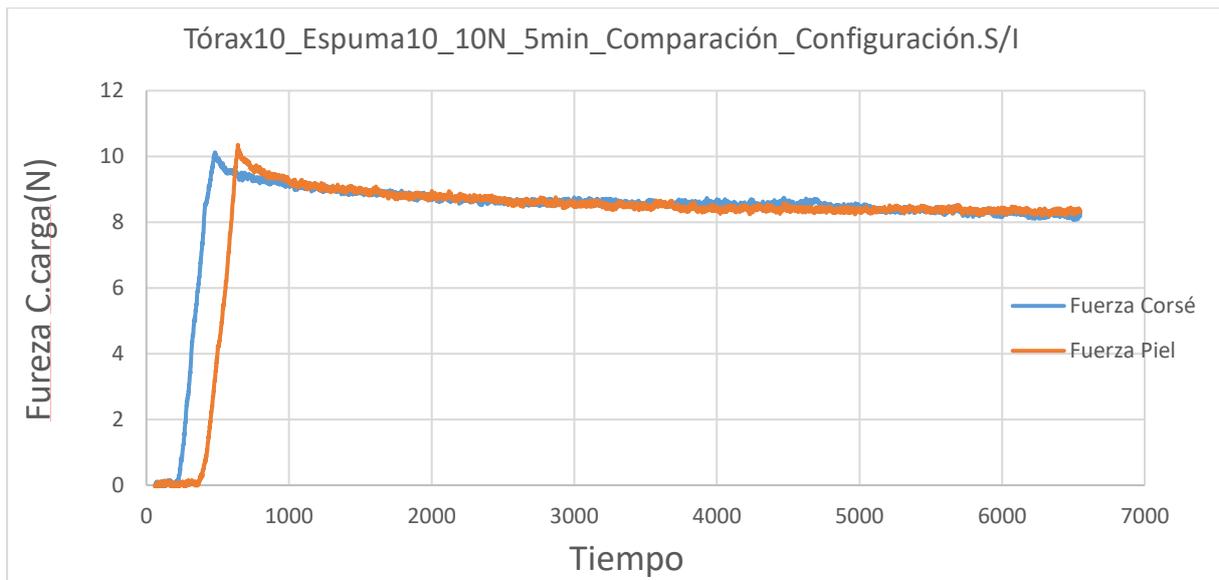


Figura 52: Comparación de las dos configuraciones, relajación de las espumas en 5 min para una fuerza de 10 N.

En la gráfica anterior se observa la relajación o creep de las dos configuraciones resultando un creep del 17,2 %. La gráfica siguiente se corresponde exactamente con el mismo ensayo, se muestra la respuesta del sensor (salida voltaje) para las dos configuraciones. La configuración Superior (Voltaje piel) presenta una deriva del 7,37 %, y la configuración inferior una deriva del 8,14 %.

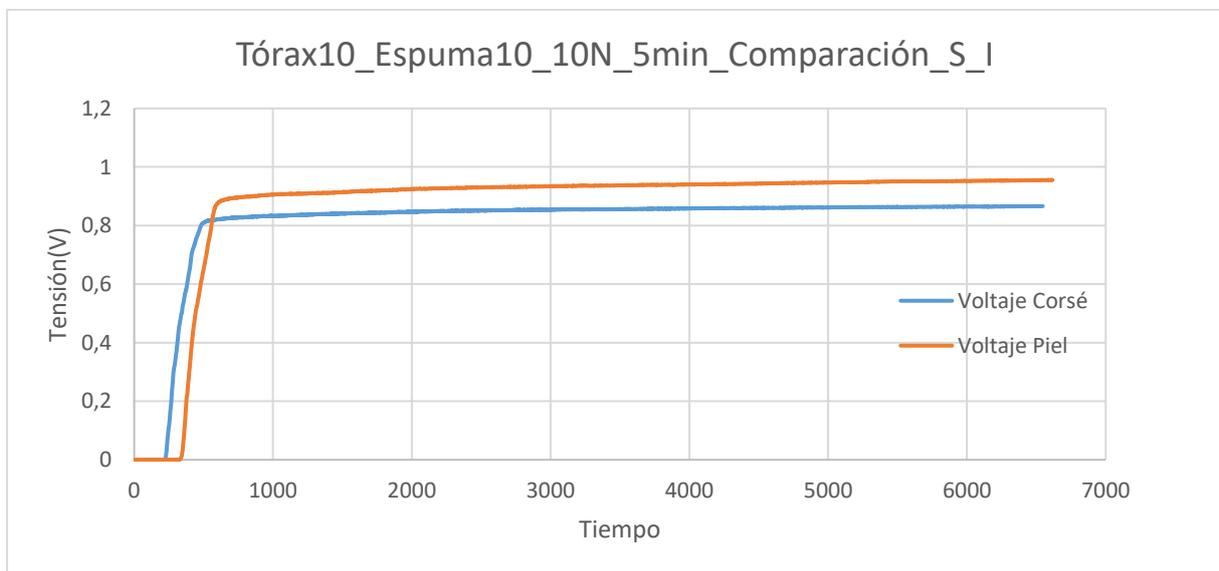


Figura 53: Comparación de las dos configuraciones, respuesta del sensor en 5 min para una fuerza de 10 N.

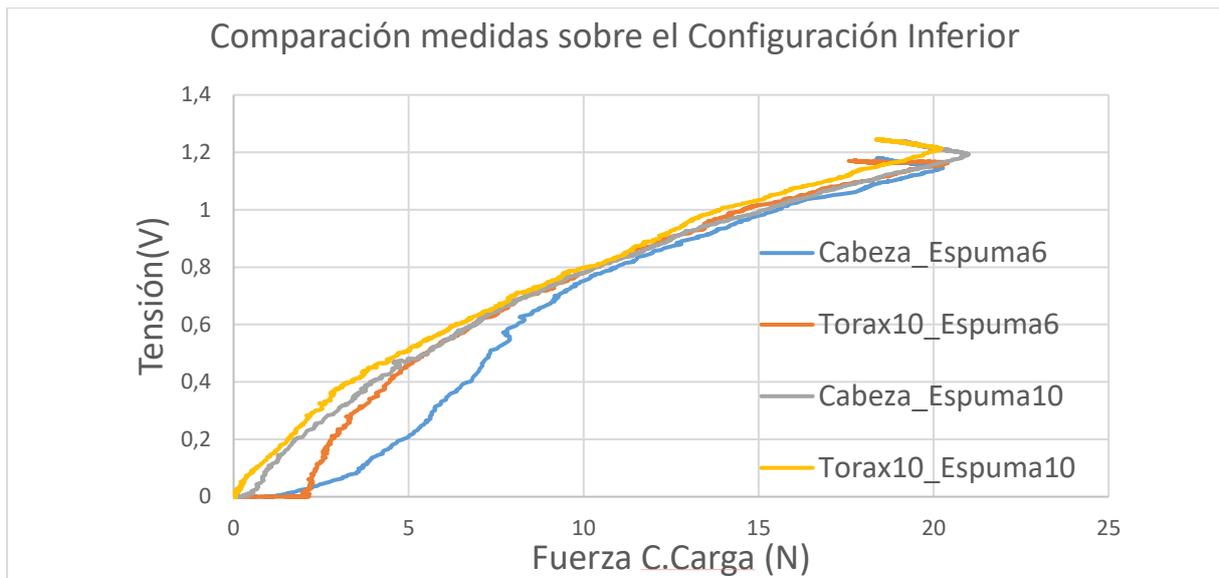


Figura 54: Comparación entre distintos espesores de espumas para la configuración inferior.

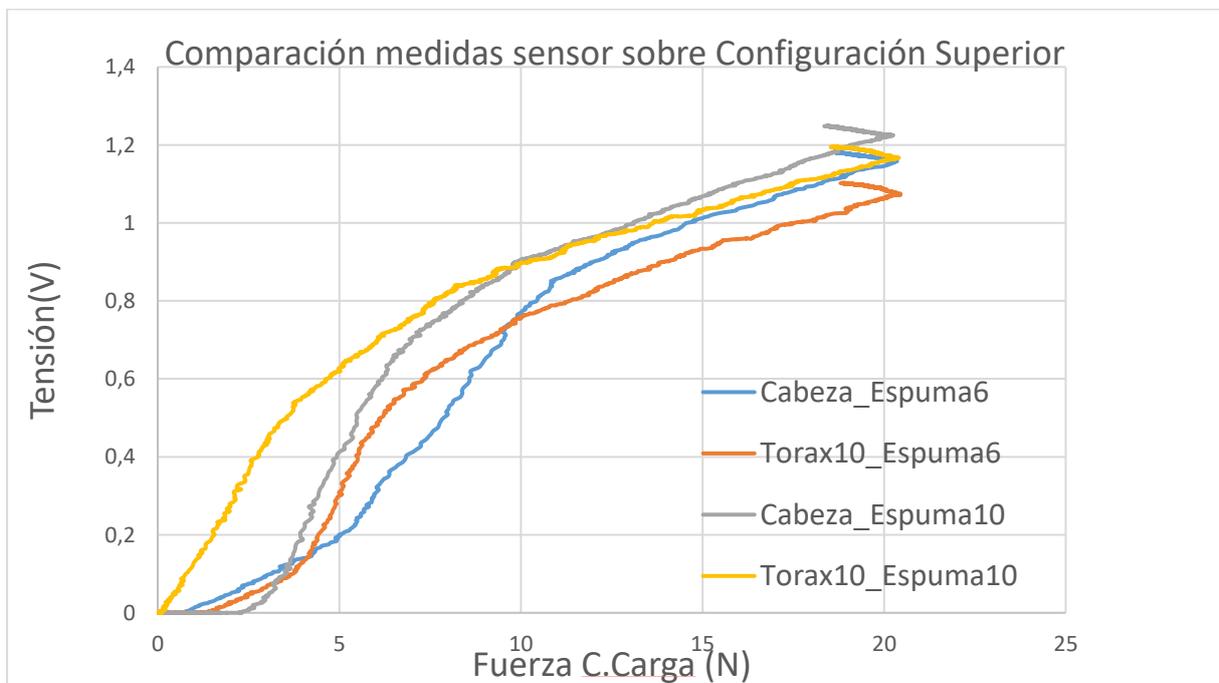


Figura 55: Comparación entre distintos espesores de espumas para la configuración superior.

En los ensayos anteriores se han comparado como afectan los distintos espesores de las espumas para cada configuración. Las mayores diferencias se observan en la configuración superior, ya que el sensor se encuentra sobre una de las espumas, en comparación con la configuración inferior, en la que se encuentra sobre una superficie plana y rígida, por lo que sufre menores deformaciones y su comportamiento es más estable. En estos ensayos la fuerza ha sido ejercida a una velocidad de unos 0,5 mm/s, se ha ejercido la fuerza en un intervalo de tiempo corto hasta llegar a los 20 N. Como en los primeros ensayos mostrados, los sensores inicialmente presentan un comportamiento no lineal hasta aproximadamente los 10 N en el

caso de la configuración superior, en la configuración inferior se puede ver un comportamiento algo más lineal en la zona de 5 a 10 N.

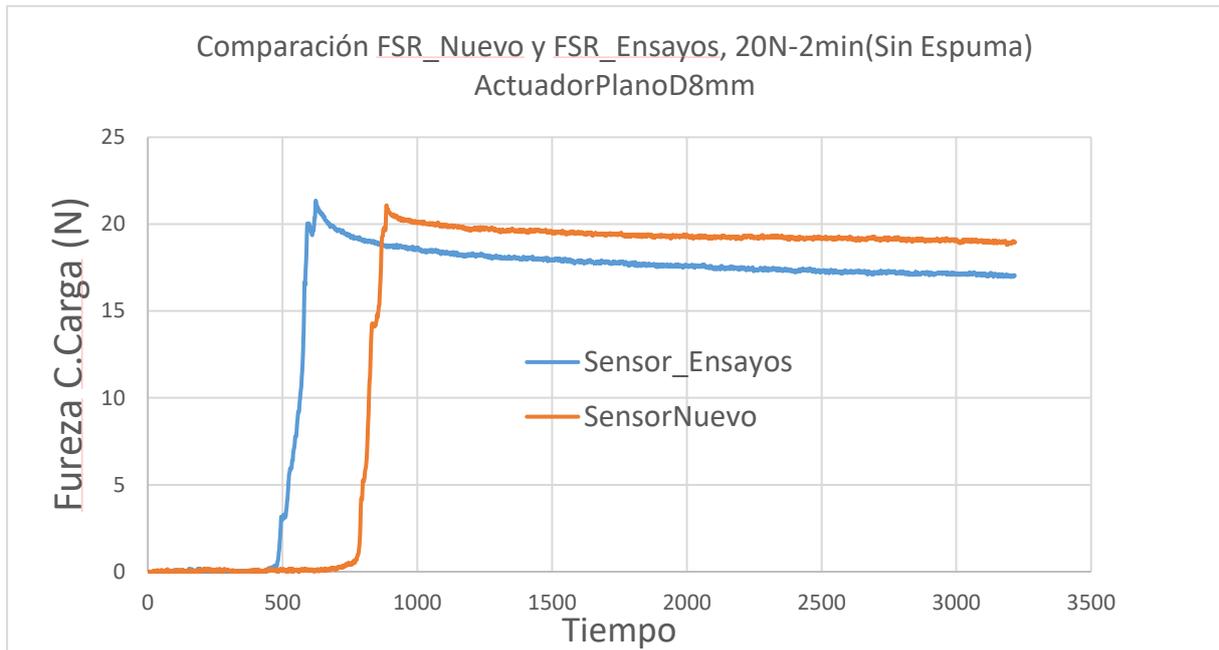


Figura 56 : Comparación de la relajación del material de los sensores, nuevo y ensayado.

En el ensayo anterior se ha comprobado la relajación o creep del material de los sensores, comparando uno totalmente nuevo con el sensor ya sometido a fuerzas en otros ensayos. Se ha utilizado un actuador plano de 8mm de diámetro a 20 N durante 2 minutos. El sensor nuevo presenta un creep del 6,5 % y el sensor utilizado de un 16 %, por lo que se observa una diferencia considerable.

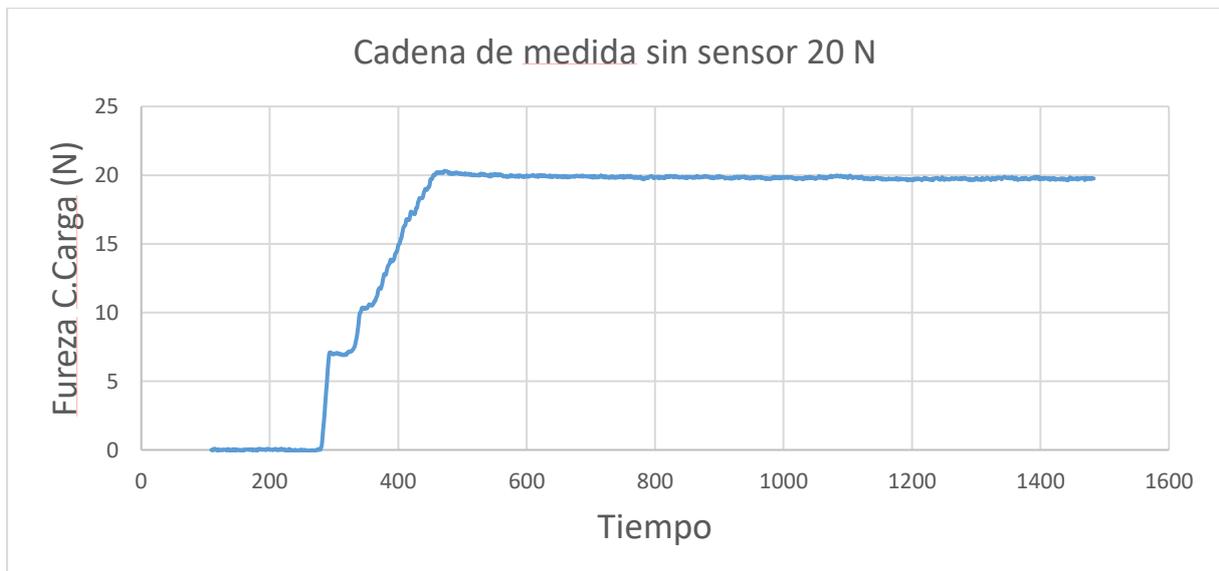


Figura 57: Comprobación de la cadena de medida.

En el ensayo anterior se ha comprobado la cadena de medida, es decir se ha ejercido una fuerza de 20 N sin espumas ni sensor para comprobar que se mantiene constante.

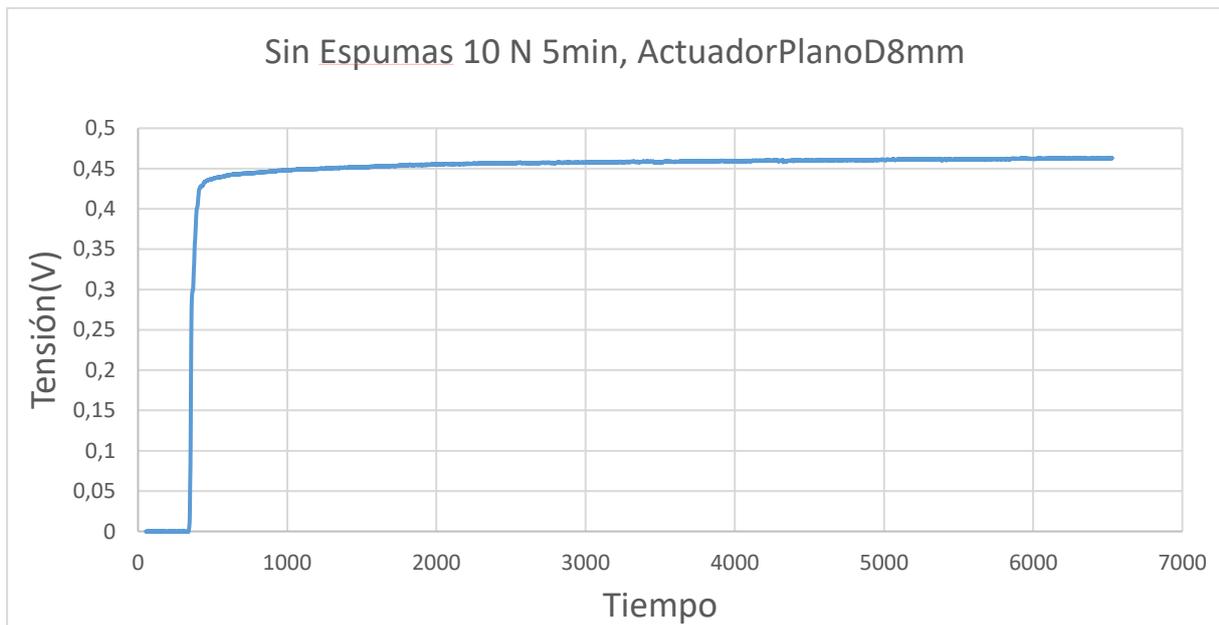


Figura 58: Drift o deriva del sensor sin espumas para 5 minutos.

En este ensayo se ha eliminado la acción de los esfuerzos cortantes que ejercen las espumas sobre el sensor, para ello se ha ejercido una fuerza de 10 N durante 5 minutos con un actuador plano de 8 mm. Se ha comprobado que el sensor presenta drift o deriva igualmente, anteriormente se ha observado que el material del sensor también presenta creep o relajación sin espumas, por lo que el sensor también se está deformando, y por lo tanto variando su resistencia al paso de la corriente eléctrica. La deriva o drift en este ensayo ha sido del 5,8 %, algo menor que en los ensayos con espumas.

8. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE TRES FABRICANTES DE SENSORES

Características a comparar

- Linealidad.
- Histéresis.
- Drift/deriva.
- Fuerzas Cortantes

Todos los sensores se han calibrado en un rango de 0 a 20N.

Se ha utilizado la siguiente configuración:

- Cabeza.
- Espuma 6mm.
- Plano
- Configuración superior.

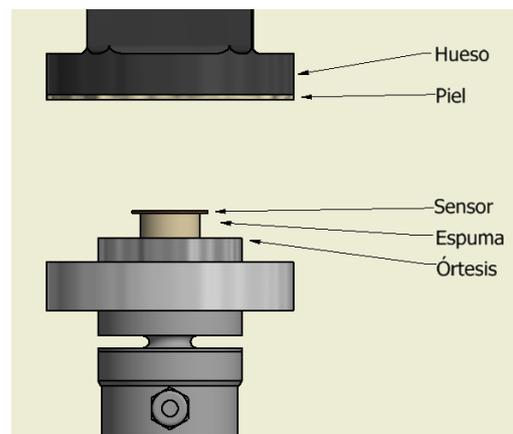


Figura 59 : Esquema configuración estudio comparativo.

Sensores:

- Flexiforce A201 de Tekscan.
- 1" Truemode de Sensitronics.
- FSR402 y FSR406 de Interlink.



Medida de la fuerza mediante sensores de tipo film



Figura 60 : Sensores por orden: Tekscan, Sensitronics, Interlink FSR402 y FSR406.

8.1. LINEALIDAD

Para realizar los ensayos de linealidad se ha ejercido una fuerza a 0,5 mm/s hasta llegar a 20 N.

8.1.1. LINEALIDAD DEL SENSOR FSR402.

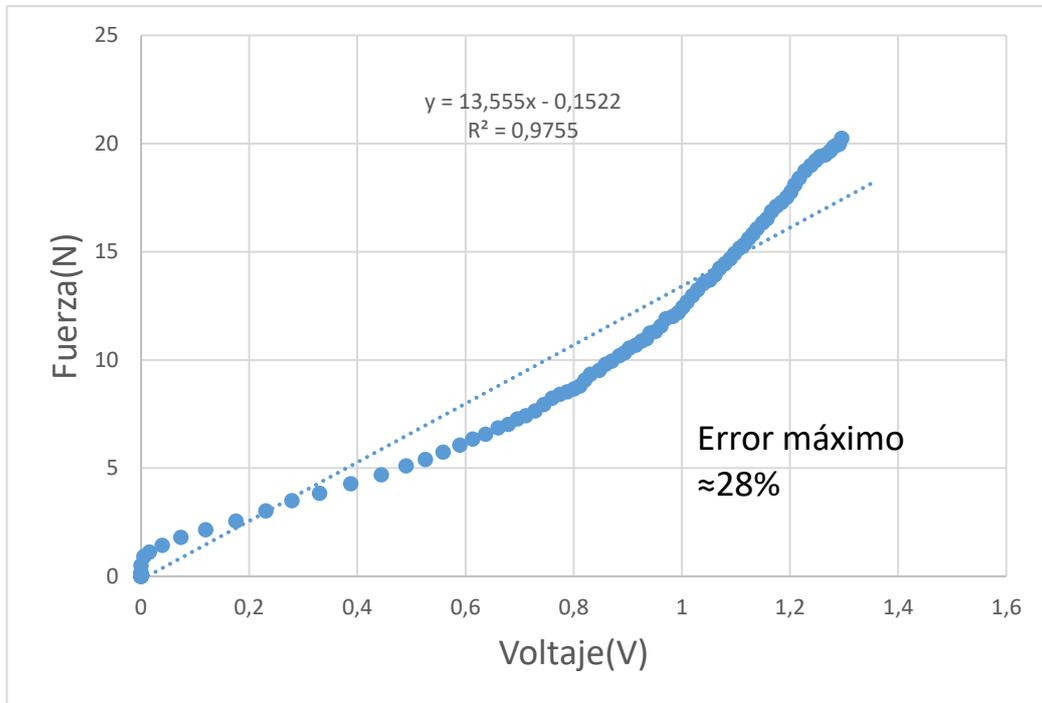


Figura 61: Linealidad del sensor FSR402.

8.1.2. LINEALIDAD DEL SENSOR FSR406

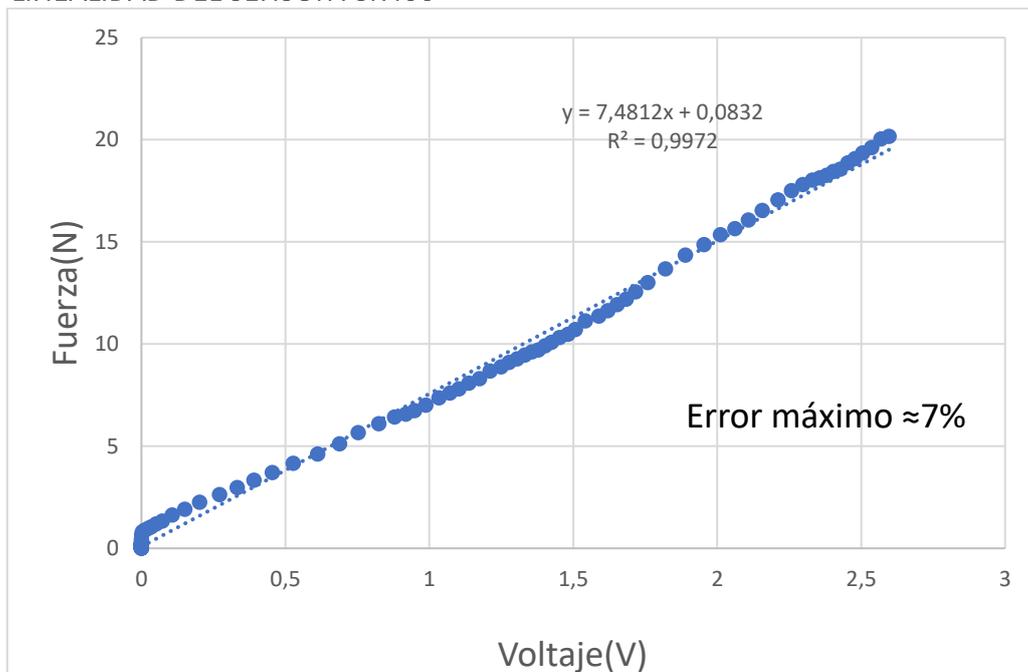


Figura 62: Linealidad del sensor FSR406.

8.1.3. LINEALIDAD DEL SENSOR SENSITRONICS 1"

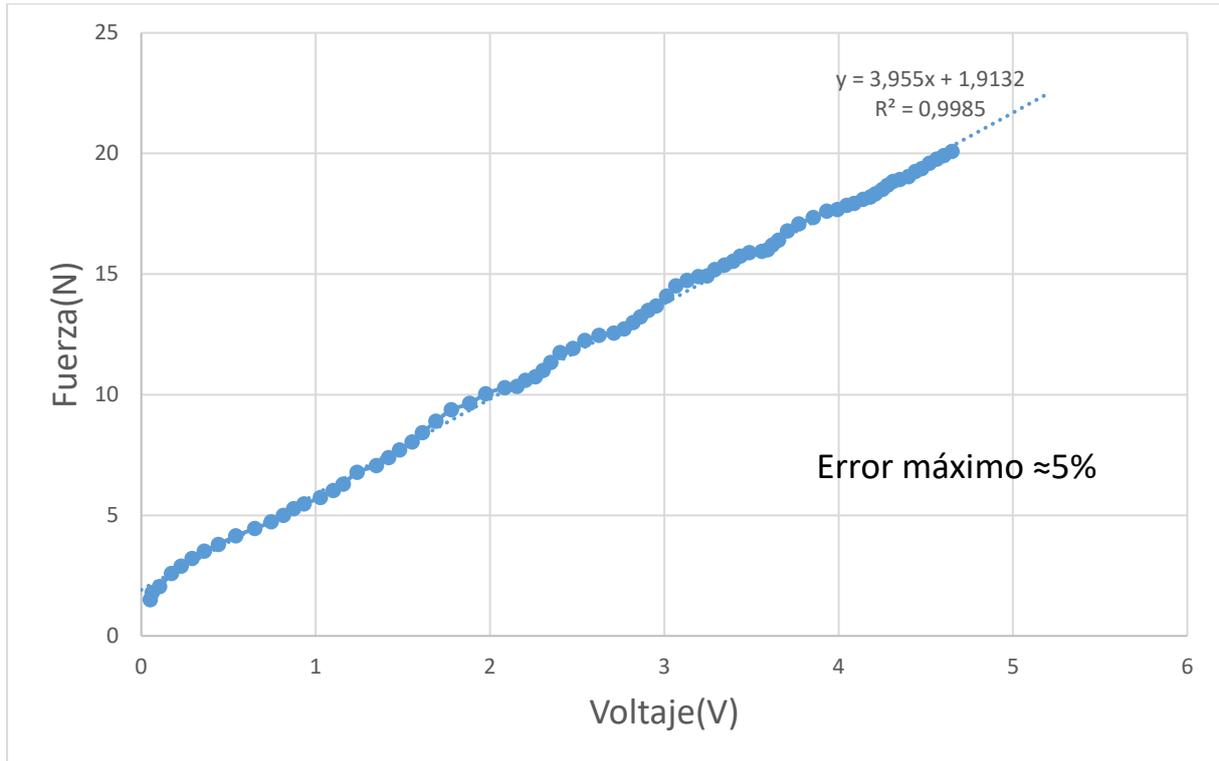


Figura 63 : Linealidad del sensor de Sensitronics 1".

8.1.4. LINEALIDAD DEL SENSOR FLEXIFORCE A201

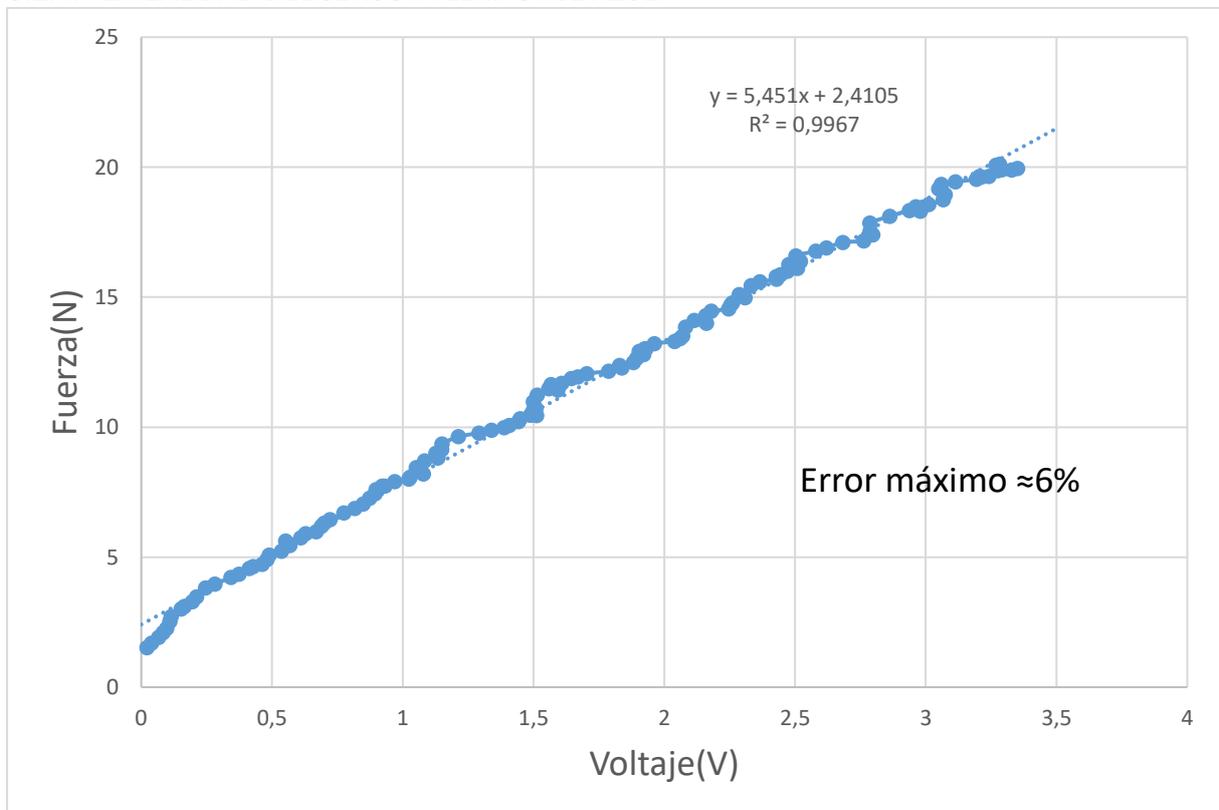


Figura 64: Linealidad del sensor Flexiforce A201.

8.2. HISTÉRESIS

En el ensayo de histéresis se ha aplicado una fuerza a una velocidad de 0,5 mm/s hasta llegar a los 20 N, y una vez alcanzado este punto se ha realizado una descarga a la misma velocidad hasta llegar a los 0 N.

8.2.1. HISTÉRESIS DEL SENSOR FSR402 Y FSR406

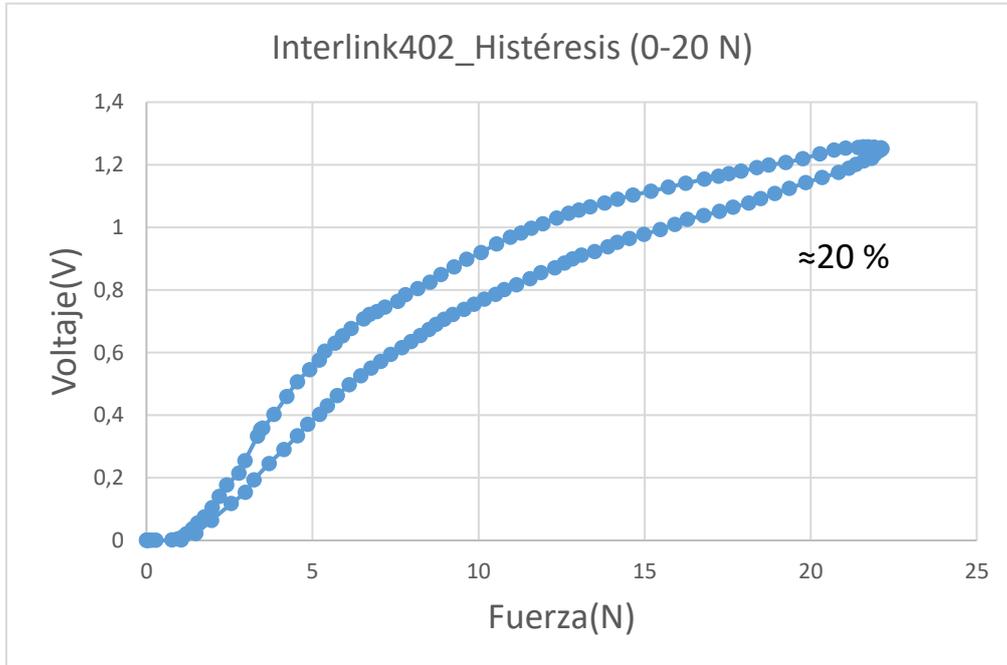


Figura 66: Histéresis del sensor FSR402.

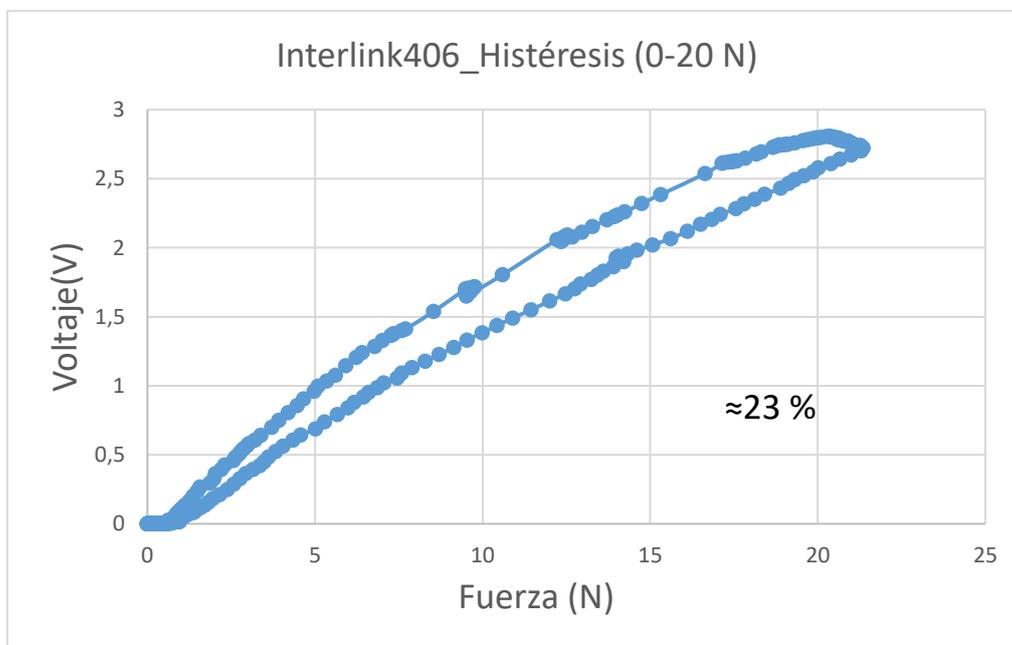


Figura 65: Histéresis del sensor FSR406.

8.2.2. HISTÉRESIS DEL SENSOR SENSITRONICS 1"

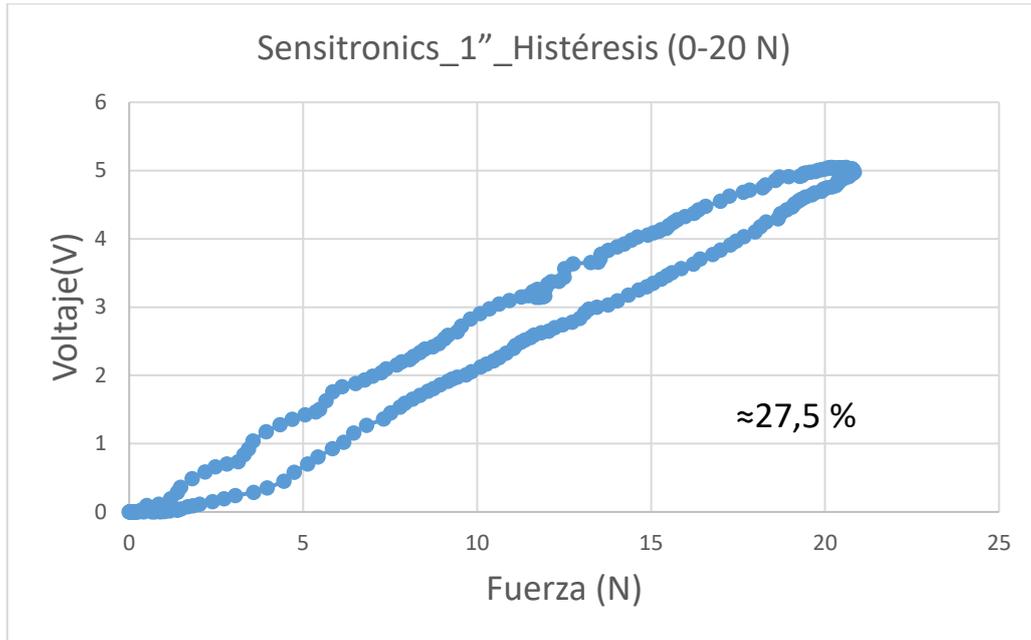


Figura 67: Histéresis del sensor Sensitronics 1".

8.2.3. HISTÉRESIS DEL SENSOR FLEXIFORCE A201 DE TEKSCAN

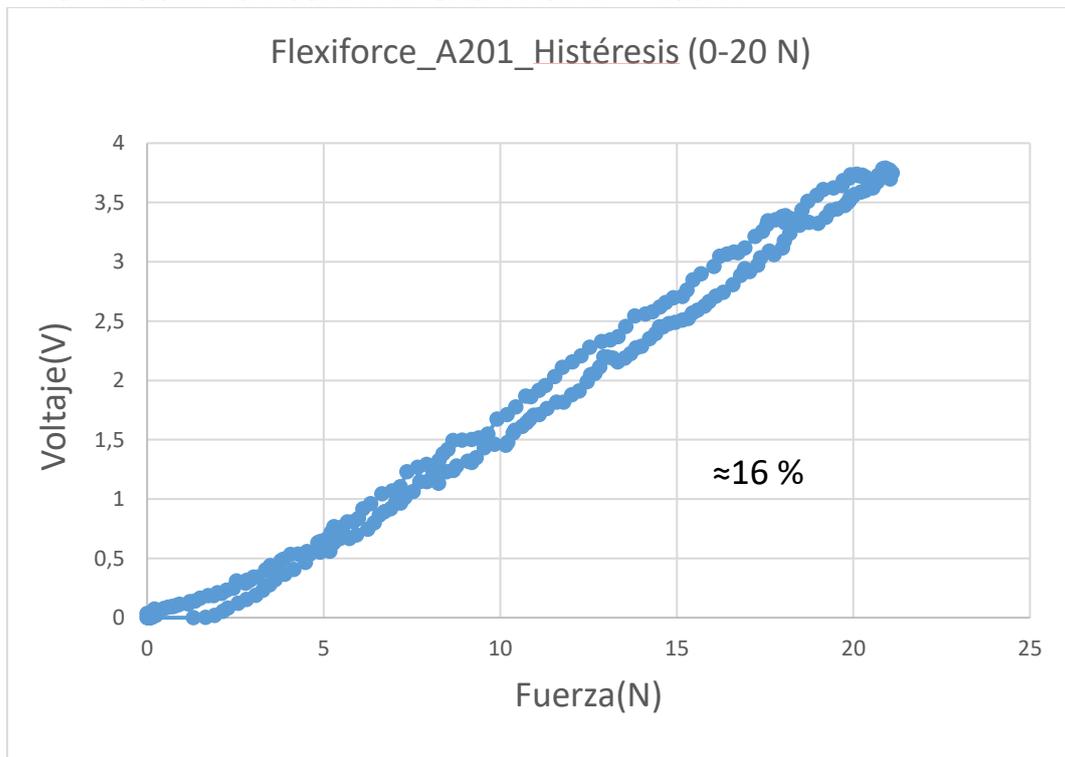


Figura 68: Histéresis del sensor Flexiforce A201.

8.3. DRIFT/DERIVA, RESPUESTA DE LOS SENSORES EN EL TIEMPO

En estos ensayos se ha estudiado la respuesta de los sensores (Salida de voltaje), cargando los sensores hasta llegar a 10 N y recogiendo la salida de los sensores durante cinco minutos. En este caso no se muestran los resultados del sensor FSR406, pues son similares a los del sensor FSR402. En las gráficas siguientes se muestra también la fuerza medida por la célula de carga (donde se aprecia la relajación o creep de la espuma) y se compara en la misma gráfica con la fuerza medida por los sensores FSR calibrados con las rectas mostradas en los ensayos de linealidad.

8.3.1. RESPUESTA DE LOS SENSORES FSR402

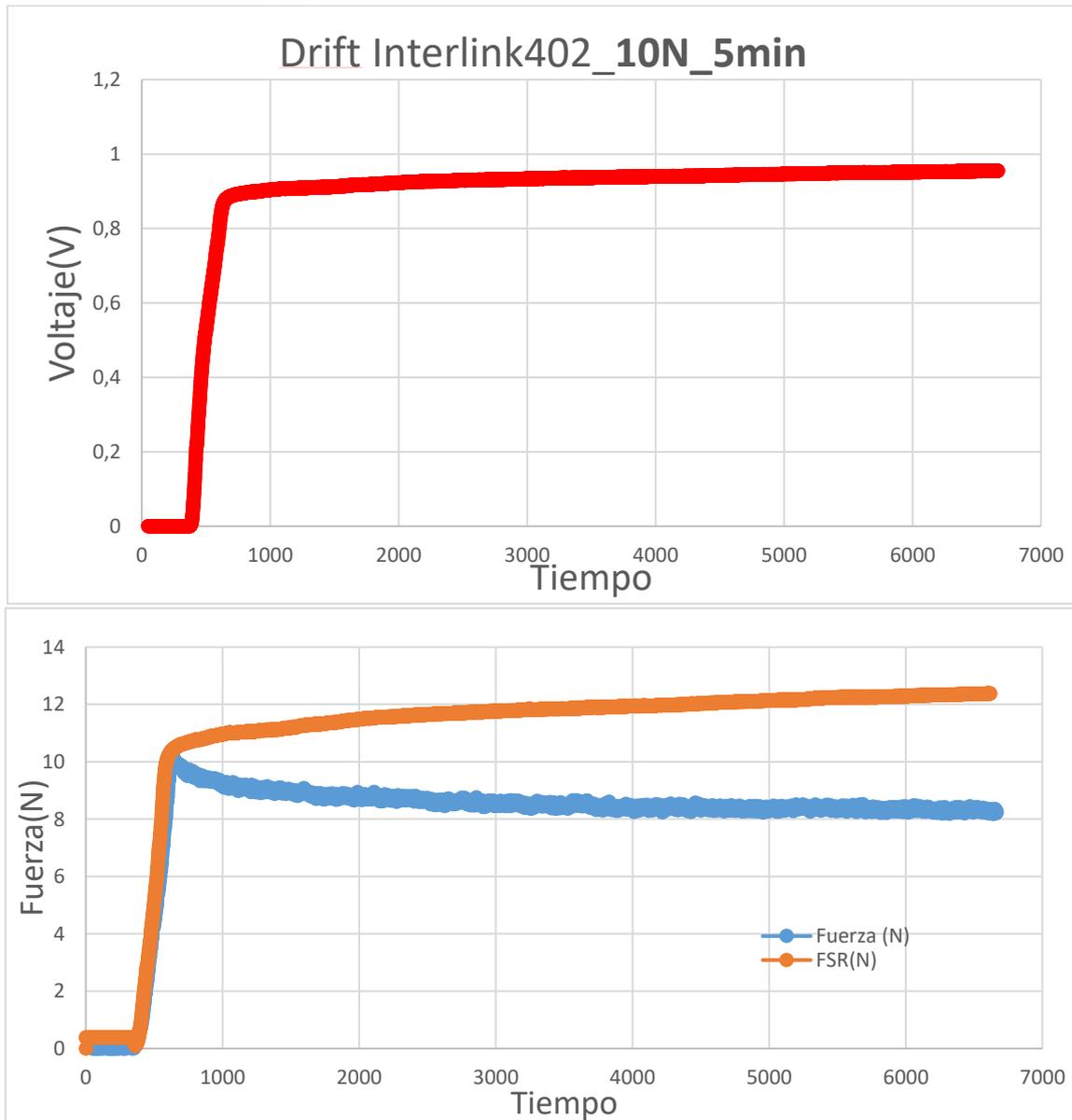


Figura 69: Respuesta de los sensores FSR402.

8.3.2. RESPUESTA DE LOS SENSORES SENSITRONICS 1"

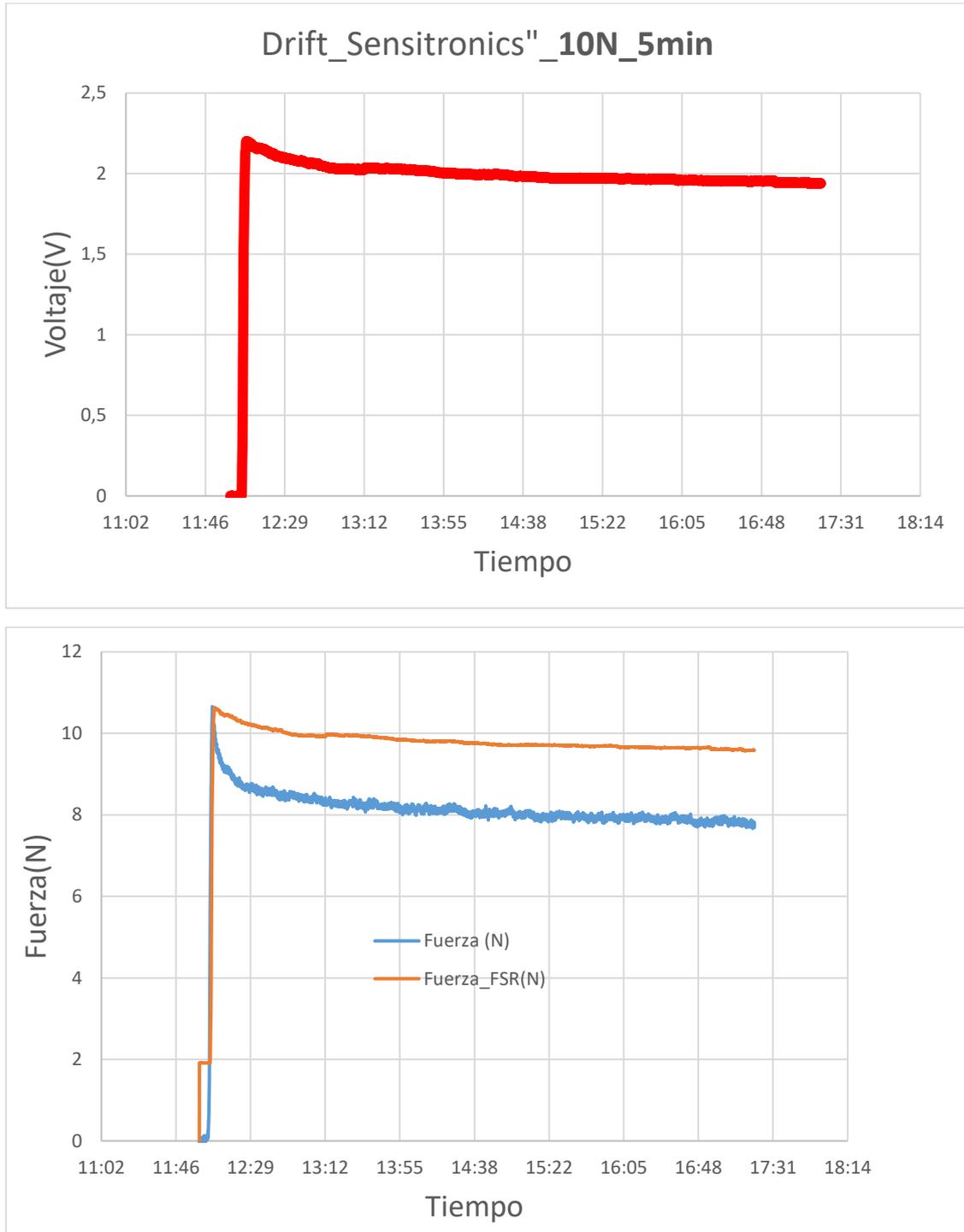


Figura 70: Respuesta de los sensores Sensitronics 1".

8.3.3. RESPUESTA DE LOS SENSORES FLEXIFORCE A201 DE TEKSCAN

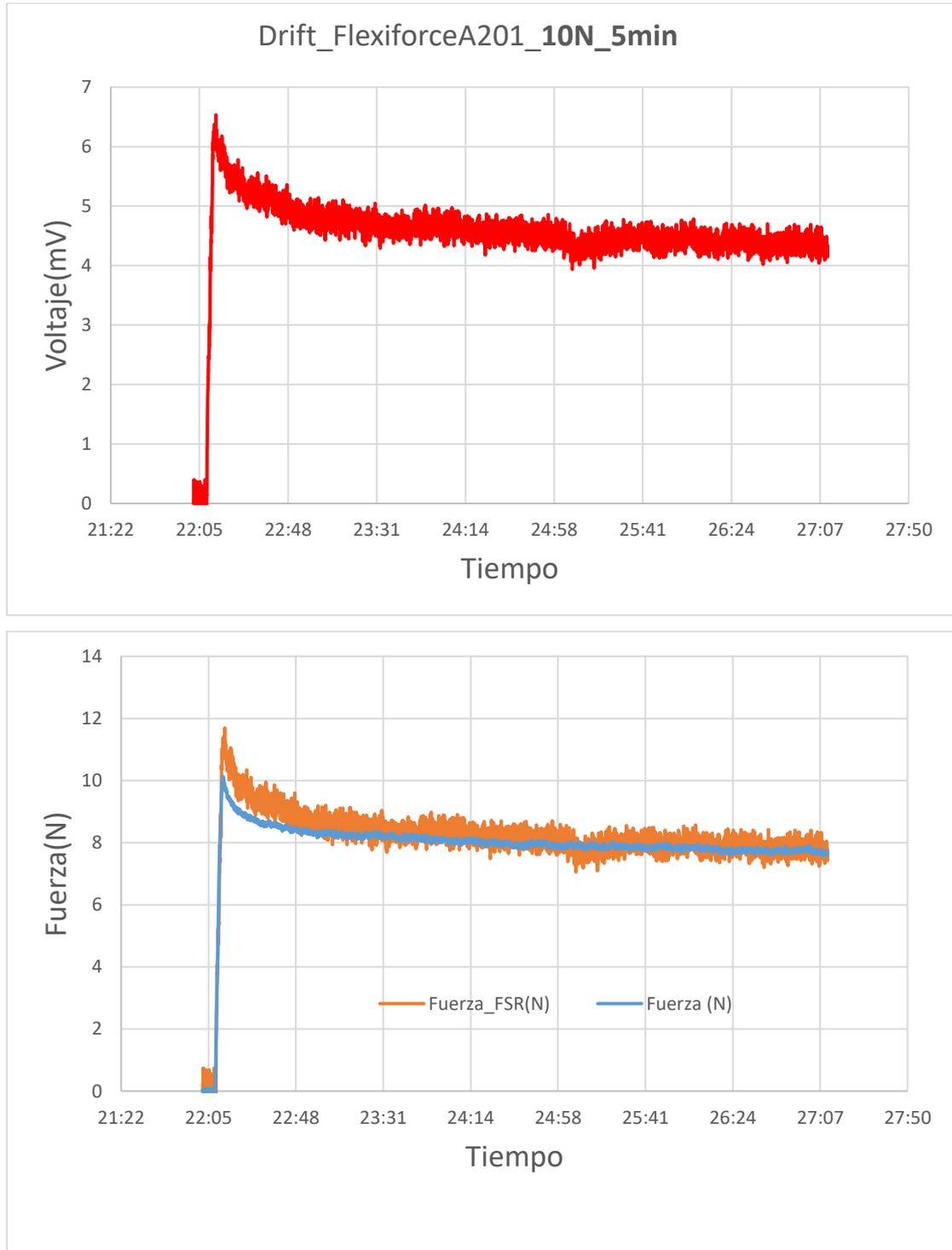


Figura 71: Respuesta de los sensores Flexiforce A201.

En estos ensayos se aprecia que los sensores de Interlink de tecnología shuntmode son los que peor siguen la evolución de la fuerza medida por la célula de carga con un error de aproximadamente del 20 %, debido a los posibles motivos explicados en los resultados que se obtuvieron de los primeros ensayos. Los sensores sensitronics 1" siguen a la fuerza medida

por la célula de carga con un error de aproximadamente del 10 %. Los sensores flexiforce de Tekscan son los que mejor se ajustan a la fuerza medida por la célula de carga.

8.3.4. ENSAYOS CON CARGA NORMAL Y CORTANTE.

Se ha diseñado un utillaje para ejercer sobre los sensores una fuerza cortante adicional para comprobar su efecto sobre la medida de los sensores. Se sigue manteniendo la misma configuración utilizada para los ensayos anteriores, en este ensayo para el fabricante Interlink se ha utilizado el sensor FSR406 de Interlink en vez del sensor FSR402.

El utillaje consiste en un perfil con un carril consistente en un mecanismo cola de milano, y un utillaje impreso en 3D para adaptar los sensores al carril. La fuerza cortante se ejerce mediante unas pesas calibradas de 2,1 N conectadas al utillaje mediante una cuerda, las pesas mediante gravedad y colocadas sobre un perfil de la máquina de ensayos ejercen la fuerza cortante, sobre el perfil se ha colocado un pequeño rodillo de acero sobre un soporte impreso en 3D para reducir el rozamiento de la cuerda y así obtener una fuerza cortante lo más precisa.

El objetivo de utilizar este mecanismo es el de ejercer una fuerza cortante solo a la superficie del sensor y evitar transmitir esta fuerza a la célula de carga debido a que es posible dañar esta si se ejerce una fuerza cortante.

En los ensayos primero se ha ejercido la fuerza normal para evitar que el carrito se desplace y a continuación a aproximadamente treinta segundos se ha introducido la fuerza cortante colgando las pesas calibradas.

En la siguiente imagen se muestra el utillaje:



Figura 72: Carrito, utillaje impreso en 3D y pesas.

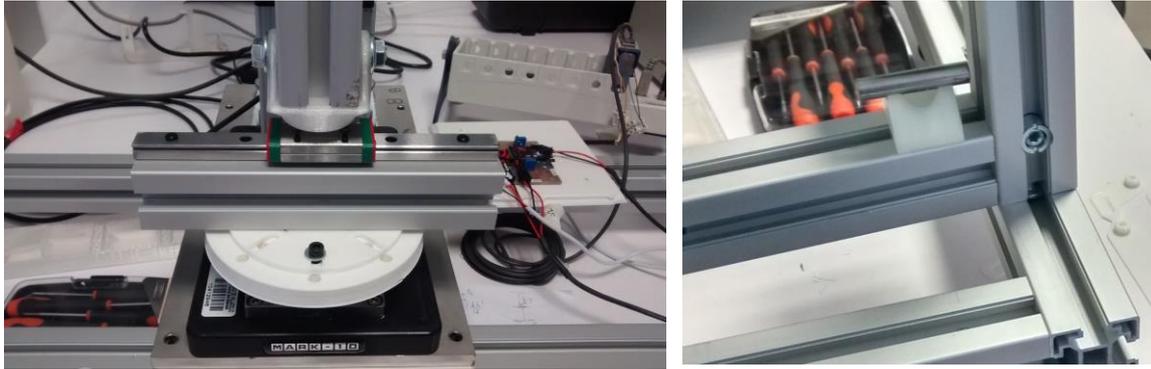


Figura 73: Montaje del carrito en la máquina de ensayos y un pequeño rodillo en la imagen de la izquierda para guiar la cuerda y reducir su rozamiento.

8.3.5. ENSAYOS CON FUERZA CORTANTE REALIZADOS

Los ensayos han consistido en ejercer primero una fuerza normal de 6 N, y a continuación a los 30 s se introduce una fuerza de 2,1 N mediante una pesa. Se ha comprobado la salida de voltaje del sensor y la evolución de la fuerza medida por la célula de carga respecto al tiempo.

Interlink FSR406:

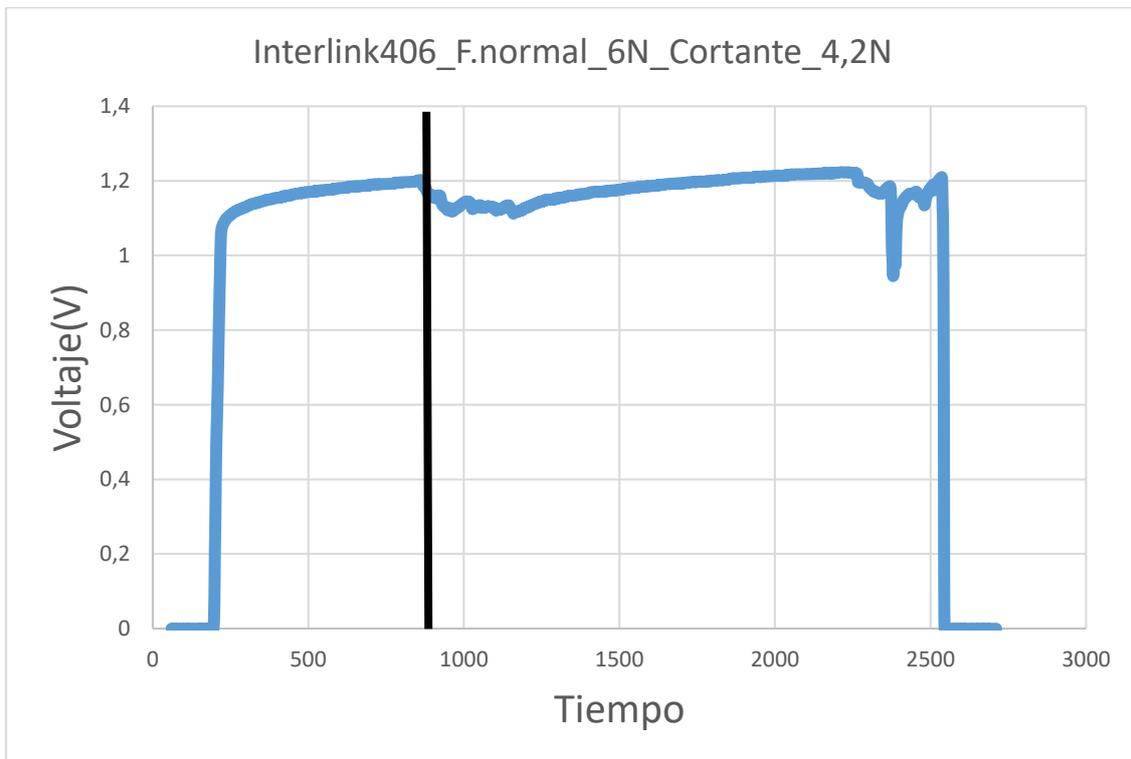


Figura 74 : Evolución del voltaje del sensor FSR406 con la introducción de una fuerza cortante.

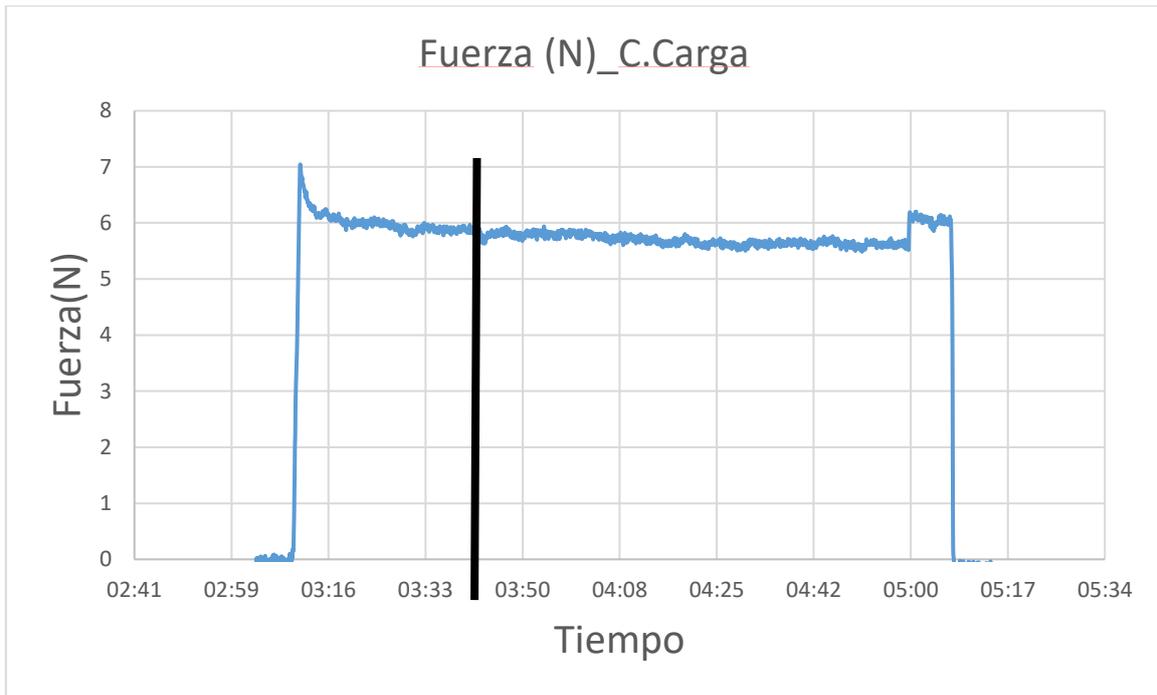


Figura 75: Evolución de la fuerza medida por la C.Carga con la introducción de una fuerza cortante.

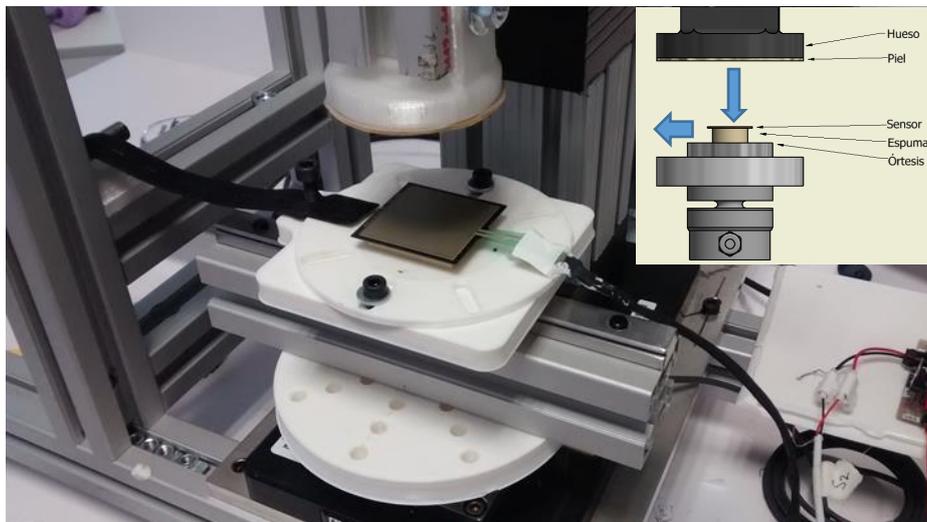


Figura 76: Ensayo de fuerzas cortantes con el sensor FSR406.

Sensitronics 1":

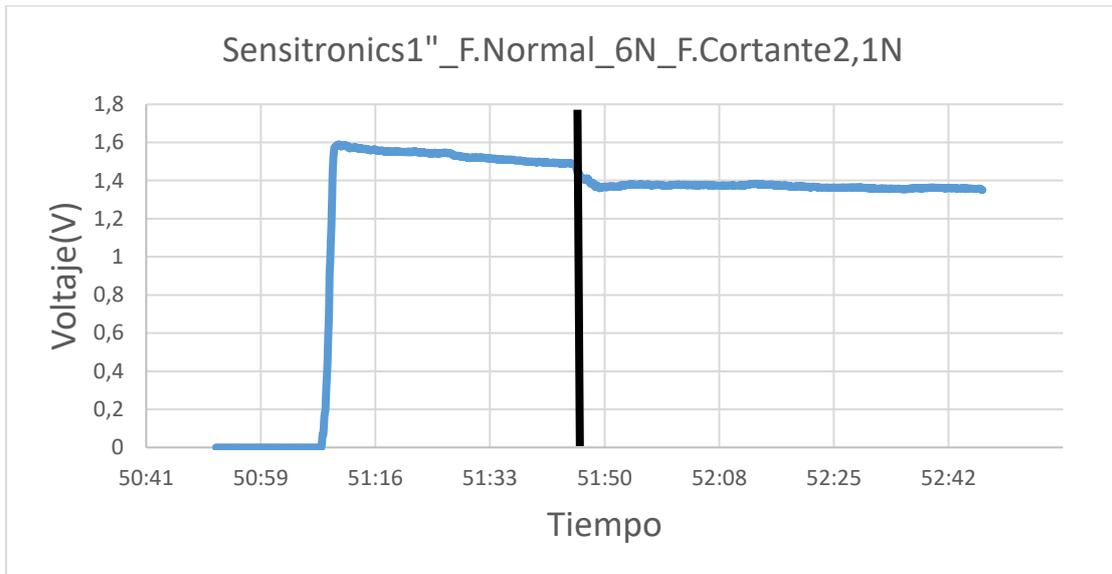


Figura 77: Evolución del voltaje del sensor Sensitronics con la introducción de una fuerza cortante.

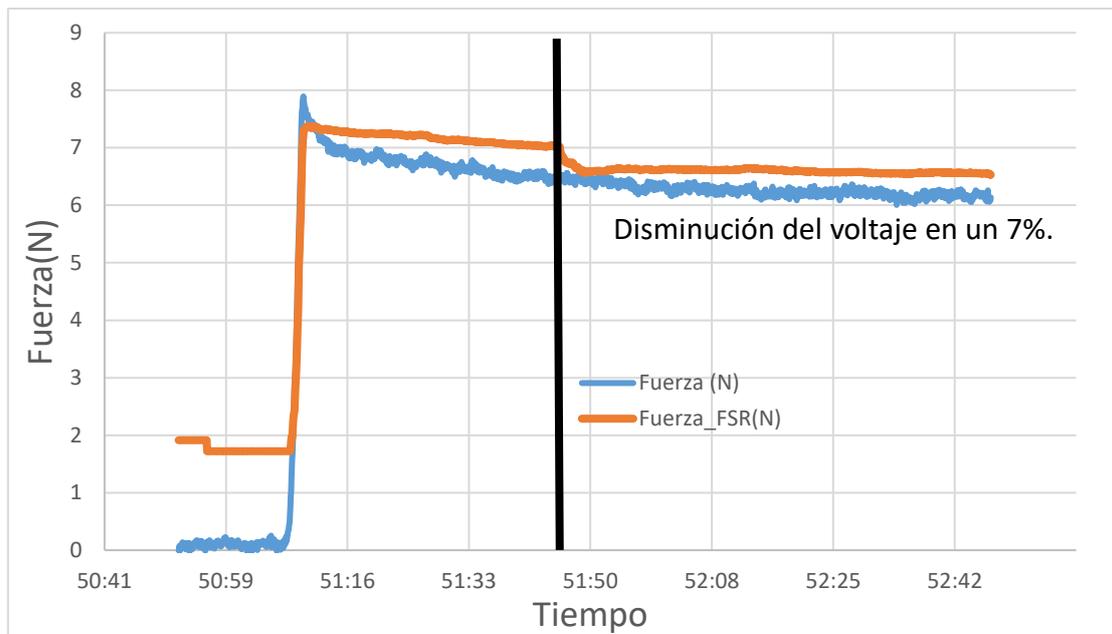


Figura 78: Evolución de la fuerza medida por la C.Carga con la introducción de una fuerza cortante.

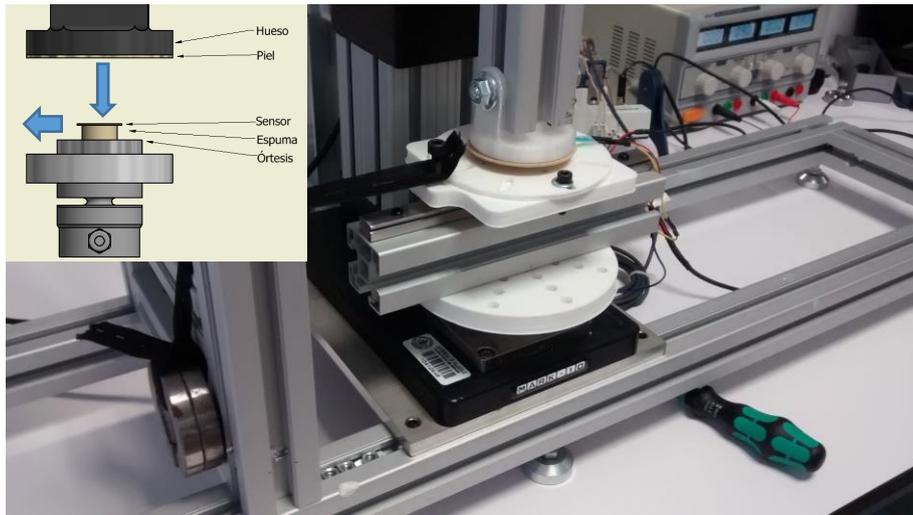


Figura 79: Ensayo fuerzas cortantes del sensor Sensitronics 1".

Flexiforce A201:

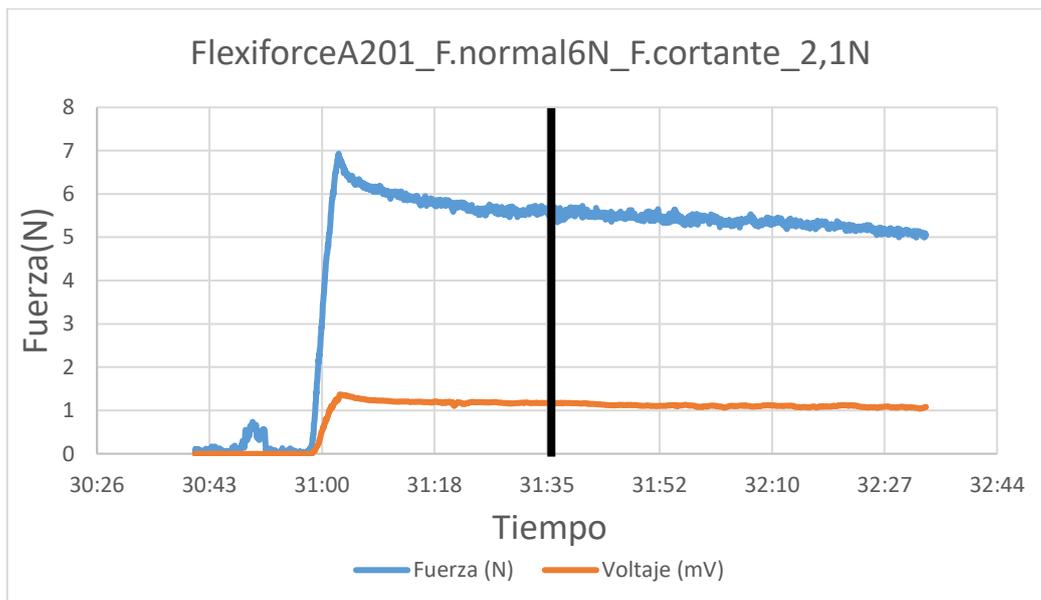


Figura 80: Evolución del voltaje del sensor Flexiforce A201 con la introducción de una fuerza cortante.

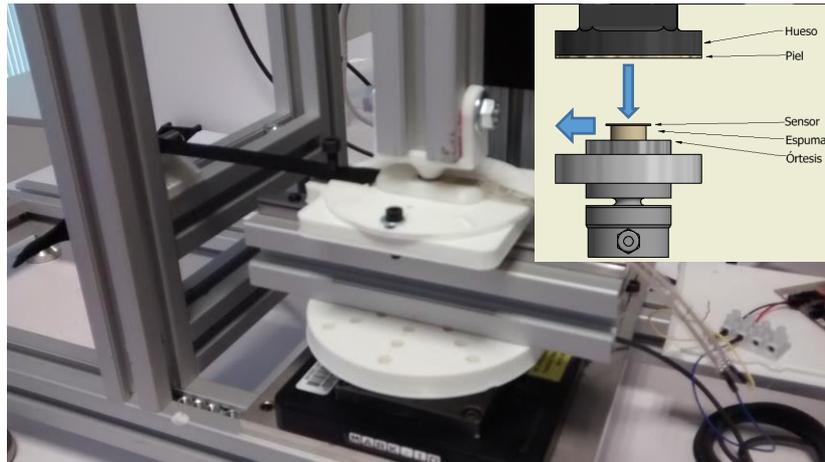


Figura 81: Ensayo de fuerza cortante con el sensor Flexiforce A201.

El sensor de Sensitronics es el que presenta una mayor sensibilidad a fuerzas cortantes, con una disminución de su voltaje de salida de un 7 %. El sensor de Interlink sí es sensible en el momento de la introducción de la fuerza, pero recupera su voltaje segundos más tarde. En sensor de Tekscan no se aprecia una variación debido seguramente a su pequeño tamaño y las deformaciones a las que ya está sometido sin fuerzas cortantes. La fuerza cortante en esta configuración no es tan importante debido a que las espumas ya ejercen una fuerza cortante sobre los sensores.

8.4. ENSAYOS ADICIONALES

8.4.1. ENSAYO SUPERFICIE CURVA CON EL SENSOR FSR406 DE INTERLINK

Se ha realizado un ensayo con un utillaje y esférico con la misma configuración utilizada en los ensayos anteriores. Este ensayo simula la colocación del sensor entre un casco ortopédico una cabeza humana. El actuador y utillaje esféricos tienen un diámetro de 80 mm.

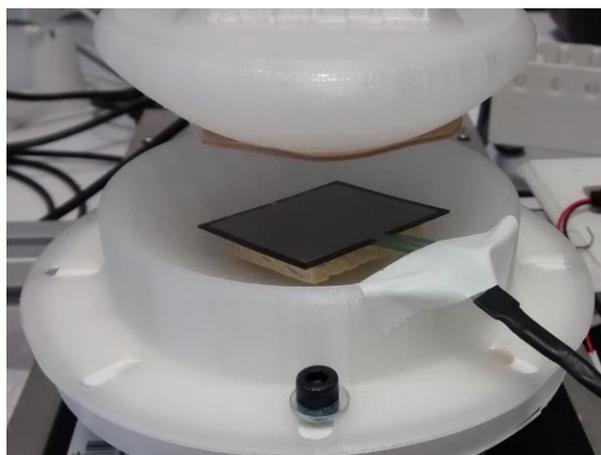


Figura 82: Ensayo con una configuración esferica del sensor FSR406.

Ensayo linealidad del sensor FSR406 en configuración esférica:

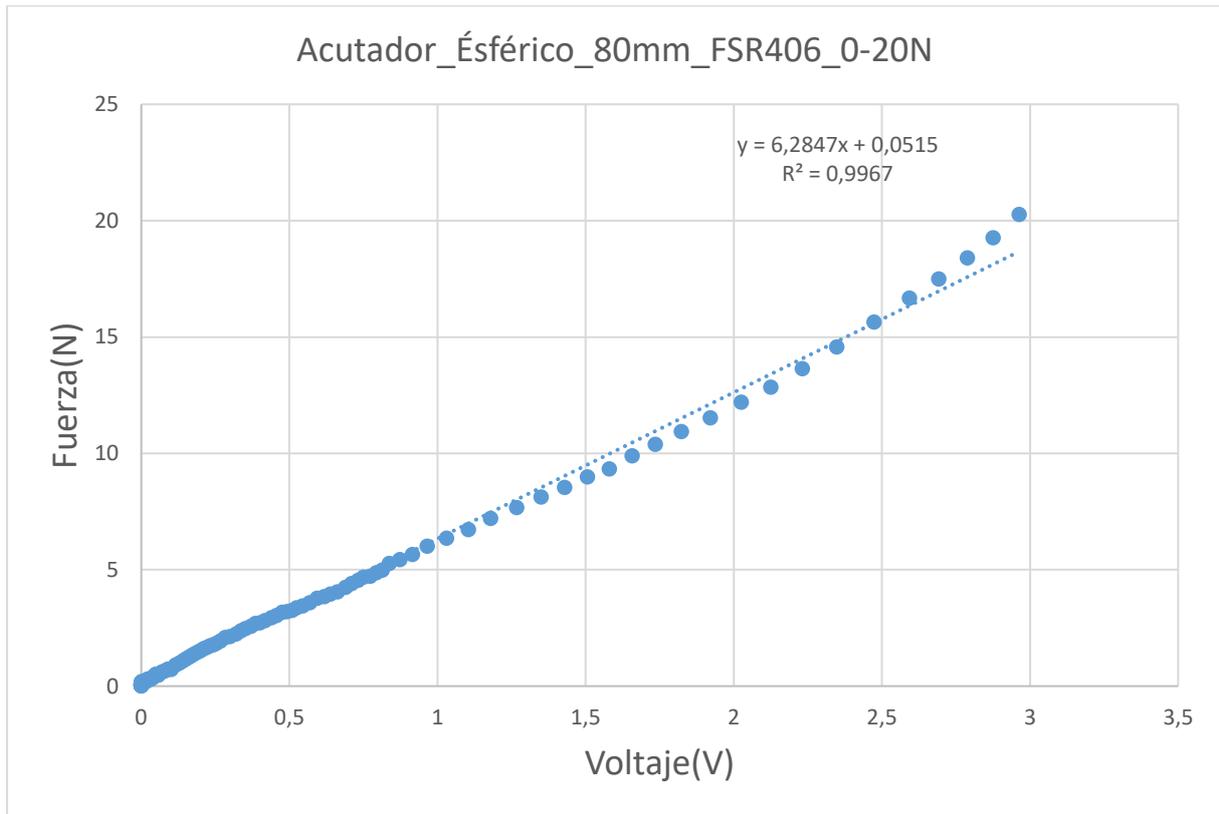


Figura 83: Ensayo de linealidad del sensor FSR406.

Ensayo de histéresis del sensor FSR406

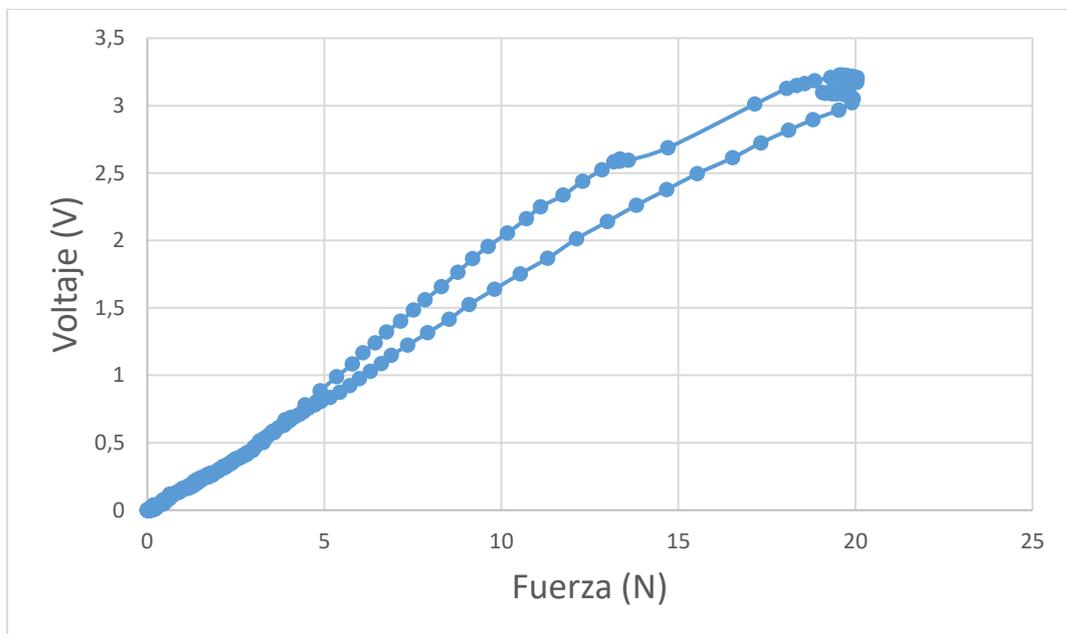


Figura 84: Ensayo de histéresis del sensor FSR406 con una configuración esférica.

9. CALIBRACIÓN PROPUESTA PARA CADA SENSOR

Para calibrar los sensores se ha utilizado la misma configuración que en los ensayos anteriores y un rango de fuerza de 0 a 20 N. Se ha elegido una calibración específica para los sensores, es decir, se han calibrado con las condiciones de geometría, materiales, tiempo y rango de fuerza similares a la aplicación real en la que serán aplicados, en este caso un casco ortopédico con espumas de 6 mm. Se ha utilizado una geometría plana ya que el tamaño de los sensores no es demasiado grande como para que afecte la curvatura del casco en la medida. Se ha utilizado un rango de tiempo de aplicación de la fuerza en torno a 5 minutos.

9.1. CALIBRACIÓN DEL SENSOR INTERLINK FSR402

Para la calibración de este sensor se han realizado varias curvas de calibración (fuerza-voltaje), para construir estas curvas, se han cogido 3 puntos de calibración a 5, 10 y 20 N, es decir, para obtener la curva de calibración a 30 segundos, se ha ejercido una fuerza de 5 N y se ha esperado 30 segundos, pasados 30 segundos se ejerce una fuerza de 10 N y de forma repetida 20 N. Con los resultados obtenidos en este ensayo, se seleccionan los puntos obtenidos a 30 segundos, la medida de la fuerza de la célula de carga y la salida de voltaje del sensor FSR, en total se obtienen tres puntos para obtener una curva. Se realiza de esta forma debido a la relajación de las espumas (variación de la fuerza medida por la célula de carga) y el drift o deriva del sensor a lo largo del tiempo. Para el sensor FSR402 se han realizado las siguientes curvas: 30 s, 1 min, 2 min, 5min y 7 min:

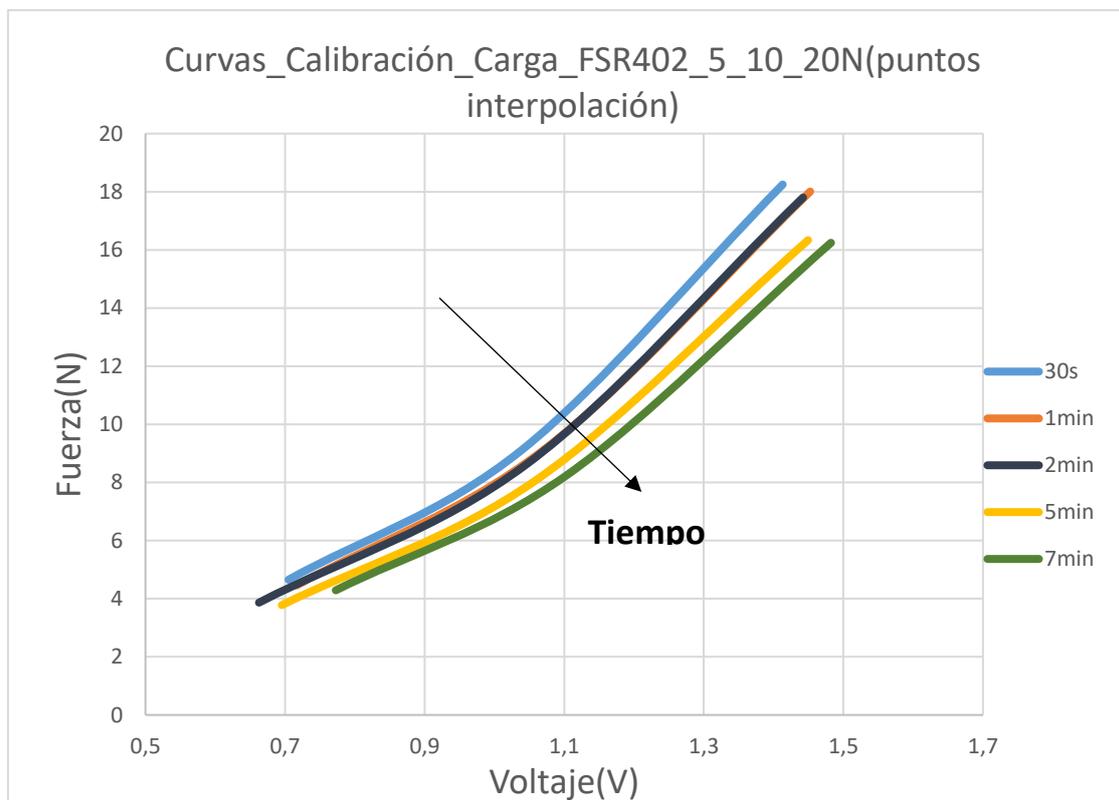


Figura 85: Curvas de calibración (Carga) del sensor FSR402 para distintos tiempos.

Se puede observar que el sensor presenta diferentes curvas de calibración dependiendo del tiempo en el que se ejerce la fuerza.

Mediante el lenguaje de programación Python se han interpolado los puntos obtenidos de voltaje, fuerza y tiempo, la ecuación resultante es la siguiente:

$$F(t, V) = (2,49E - 06)t^2 + 8,88V^2 + (-5,55E - 03)tV + (-5,25E - 04)t - 0,12864717V + 0,205623751$$

Donde:

- F : Fuerza predicha en N.
- t : tiempo transcurrido en segundos.
- V : Voltaje de salida medido.

Esta ecuación de calibración implementada en labview permite predecir la fuerza medida por el sensor.

En la siguiente gráfica se muestra ecuación de calibración representada mediante una superficie en tres dimensiones:

Superficie calibración FSR402 de Interlink

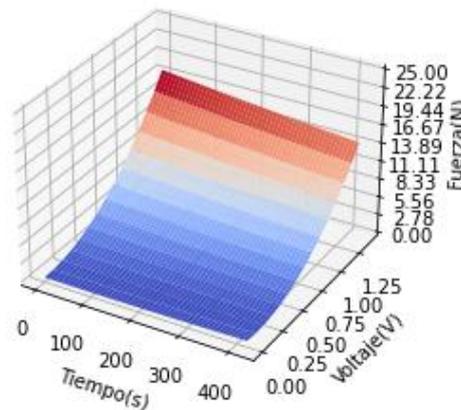


Figura 86: Superficie de calibración del sensor FSR402.

La calibración del sensor no está completa del todo solo con la ecuación anterior, la salida del sensor se comporta de forma diferente cuando se descarga o se realiza una descarga y a continuación se vuelve a cargar debido a la histéresis del sensor, relajación de las espumas etc.

Se ha decidido programar en labview una máquina de estados que recoja distintos estados, en este caso se han elegido cuatro: Estado inicial, Carga, Descarga y Descarga/Carga. En la siguiente imagen se muestra un esquema de la máquina de estados:

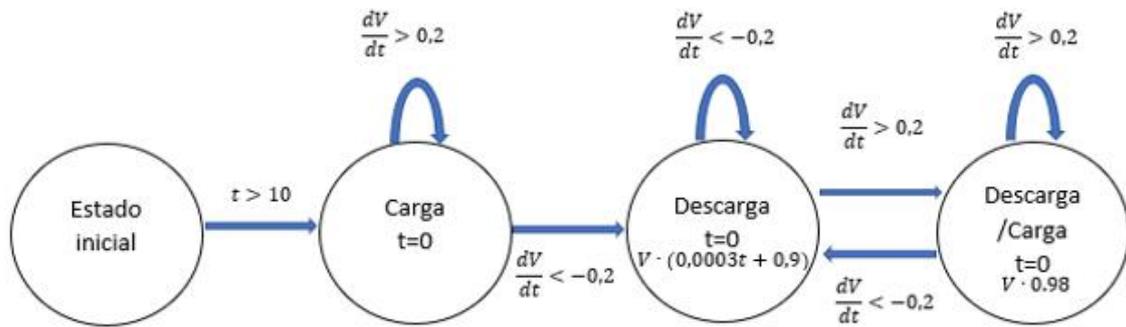


Figura 87: Máquina de estados propuesta para el sensor FSR402.

Estado Inicial: El programa espera 10 segundos para pasar al siguiente estado.

Estado Carga: En este estado el programa está realizando medidas esperando a que se produzcan dos tipos de eventos. En el caso de que se produzca un incremento de carga (Derivada del voltaje mayor que 0,2 V/s), en este caso, el programa reinicia el tiempo a 0 segundos. Cuando se detecta una descarga del sensor (Derivada del voltaje menor que -0,2 V/s) el programa pasa al siguiente estado.

Estado Descarga: El sensor mide un voltaje distinto cuando se produce una descarga debido a fenómenos de histéresis del sensor y relajación de las espumas, mediante experimentación se ha determinado que el sensor inicialmente en una descarga mide un 10 % más de voltaje, cuando se pasa al estado de descarga el tiempo se reinicia a 0 y se compensa el voltaje mediante una ecuación lineal dependiente del tiempo, para un tiempo de 0 segundos se reduce el voltaje medido un 10 % y se incrementa linealmente hasta que a los 5 minutos la lectura de voltaje no es compensada. En este estado, similar al anterior, cuando se vuelve a producir una descarga (Derivada del voltaje menor que -0,2 V/s) el programa reinicia el tiempo $t=0$ segundos, cuando se detecta una carga (Derivada del voltaje mayor que 0,2 V/s), el programa pasa al siguiente estado.

Estado Descarga/Carga: En el momento en el que el programa cambia a este estado el tiempo se reinicia a 0 segundos y se realiza una pequeña compensación del voltaje (se reduce la medida de voltaje en un 2%). Similar a los estados anteriores, cuando se detecta una carga (Derivada del voltaje mayor que 0,2 V/s) se reinicia el tiempo a 0 segundos, si en cambio se detecta una descarga programa vuelve al estado de Descarga.

Para comprobar la calibración realizada se ha comparado la fuerza predicha por el sensor y la fuerza medida por la célula de carga en un rango de 0 a 20 N, realizando cargas y descargas en diferentes intervalos de tiempo:

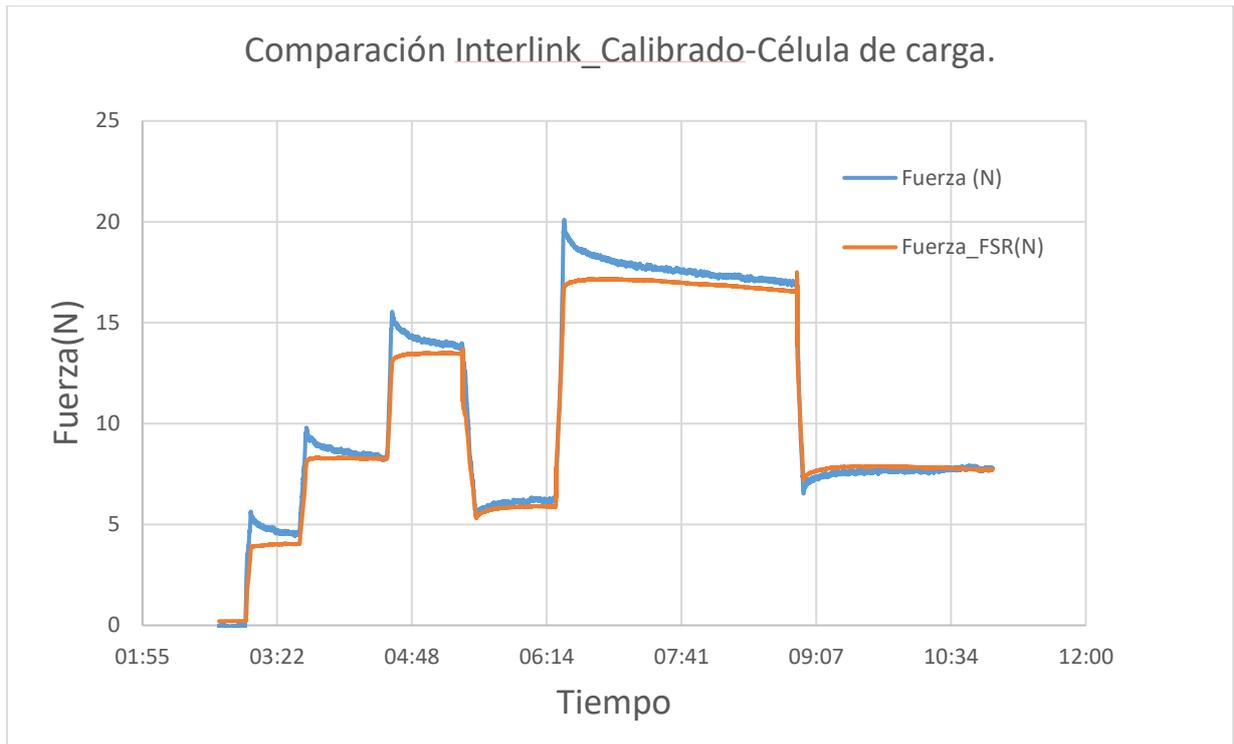


Figura 88: Ensayo de comparación entre la fuerza medida por la C.Carga y el sensor FSR402 calibrado.

Se observa que el sensor se va aproximando a la medida de la célula de carga a partir de los 30 s, que es el primer intervalo elegido para la calibración.

En la siguiente gráfica se muestra el error absoluto entre la fuerza medida por la célula de carga y el sensor:

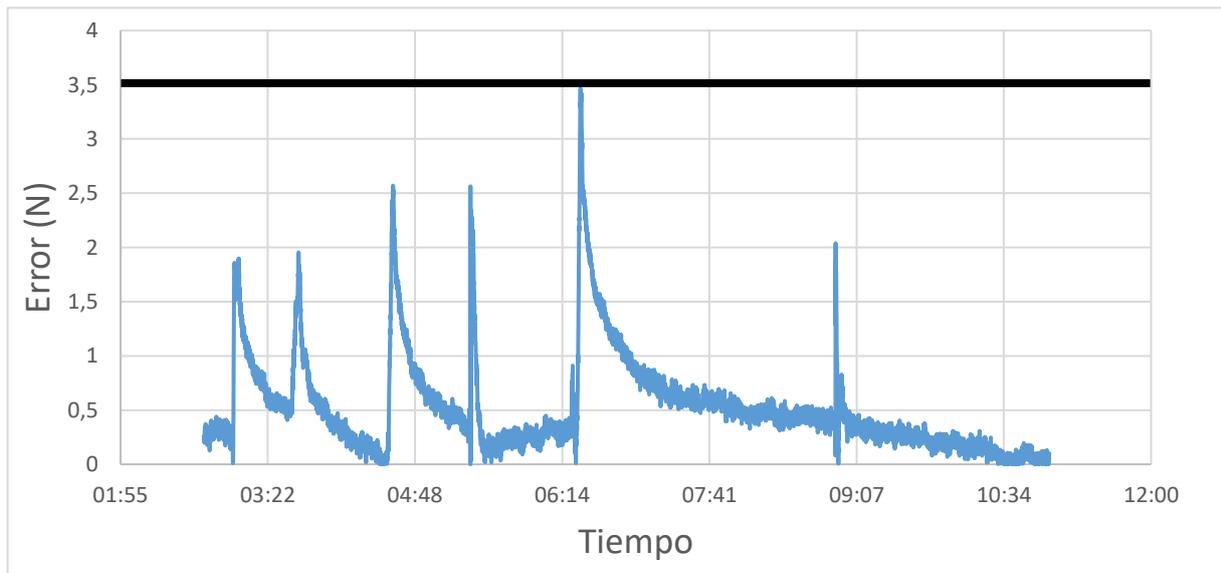


Figura 89: Error absoluto del sensor FSR402 calibrado.

Se observa que el sensor FSR402 se mantiene la mayor parte del tiempo con un error menor a 1 N. Los picos que se observan en la gráfica se producen cuando hay un cambio de fuerza ya que el algoritmo de calibración está diseñado para comenzar a medir de forma más precisa a los 30 s a partir de la detección de un cambio de voltaje debido a una carga o descarga.

9.2. CALIBRACIÓN DEL SENSOR FSR406 INTERLINK

Para este sensor no se ha realizado una máquina de estados ni los ensayos de comparación con la célula de carga, si se han realizado las curvas de calibración a 30 segundos , 1 minuto y 5 minutos para una geometría esférica, en este caso un casco ortopédico, es decir, se ha hecho una calibración sobre el mismo casco y espumas en los que los sensores van a ser colocados. Se han calibrado con cargas y descargas, es decir, para el intervalo de 30 s, se ha cargado el sensor a 5 N, pasados 30 s se incrementa la carga a 10 N, pasados otros 30 s se incrementa a 20N, para la curva de descarga, se hace el procedimiento anterior pero a la inversa hasta descargar el sensor. Los puntos para interpolar las curvas se obtienen de la lectura de la salida de voltaje y de la célula de carga a los 30s, para los demás intervalos de tiempo se ha realizado el mismo procedimiento. En las siguientes gráficas se muestran las curvas de carga y descarga para calibrar el sensor FSR406:

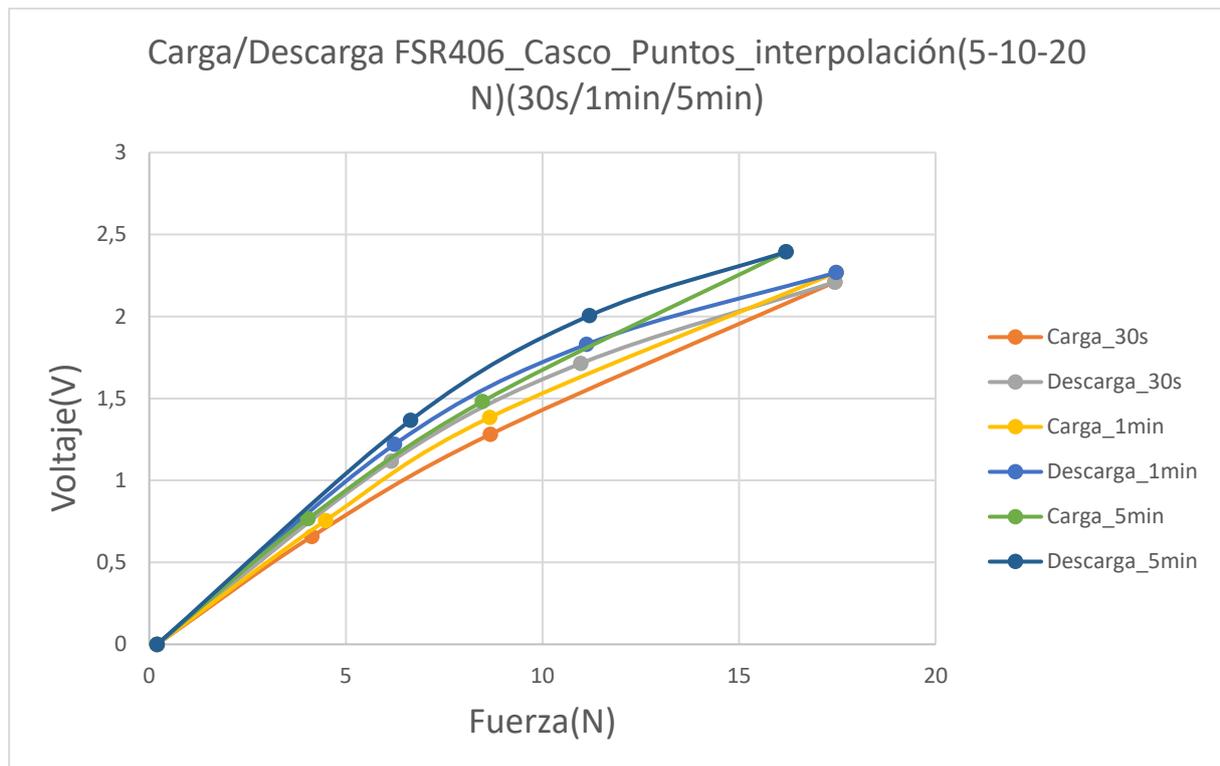


Figura 90: Curvas de calibración (carga y descarga) para el sensor FSR406.

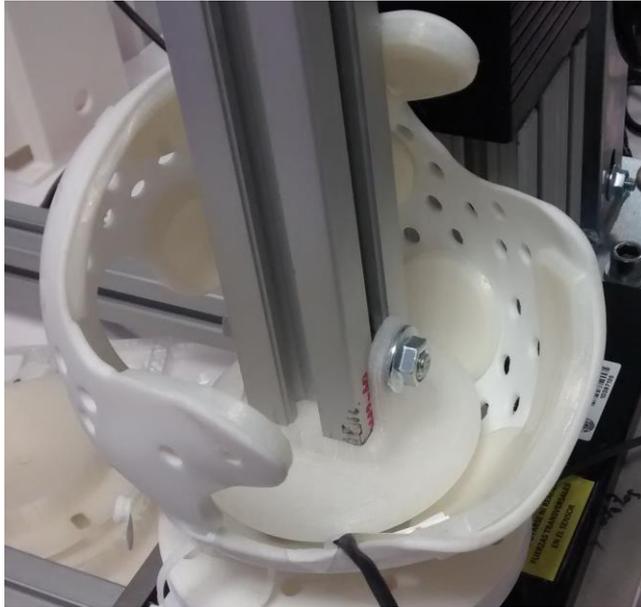


Figura 91: Casco ortopédico y actuador esférico durante la calibración específica del sensor FSR406.

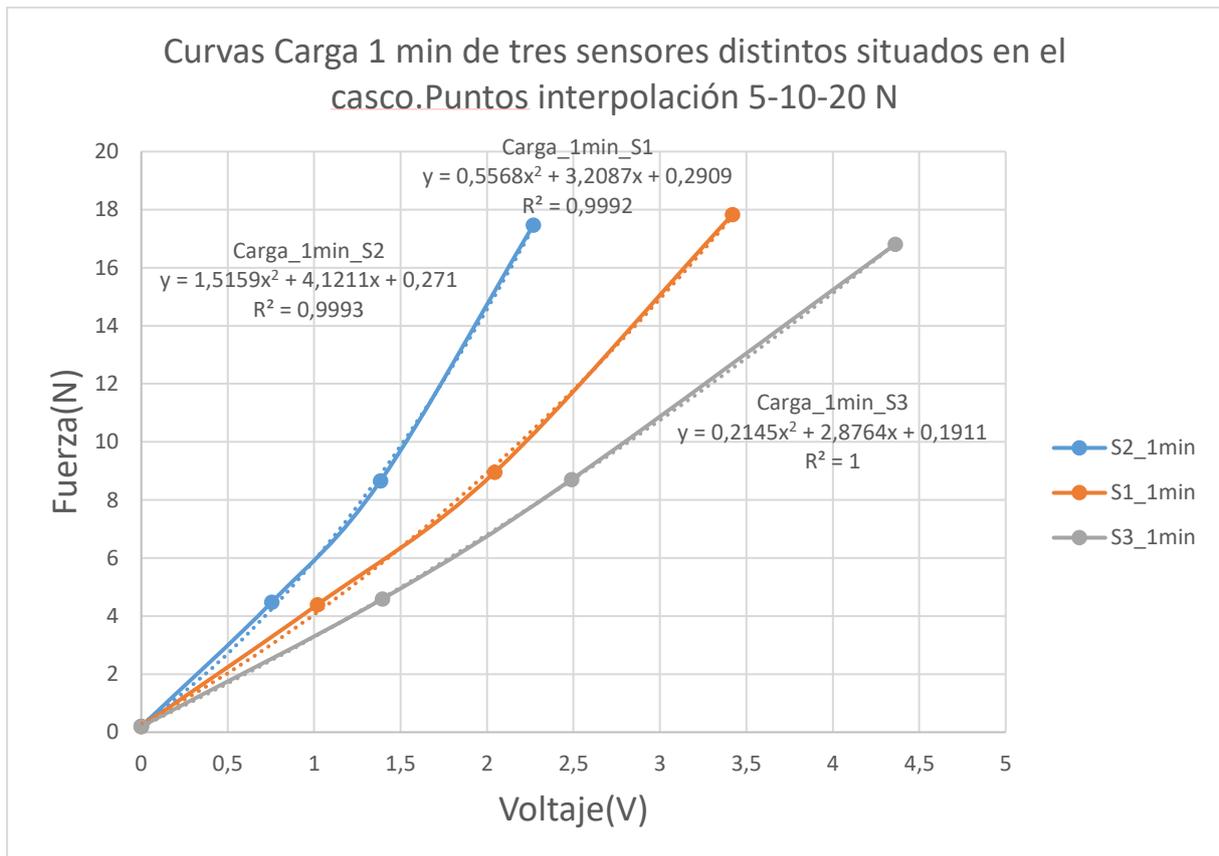


Figura 92: Curvas de calibración(Carga 1 minuto) de tres sensores FSR406 distintos.

En el ensayo mostrado en la gráfica anterior se puede comprobar que hay una diferencia significativa entre distintos sensores del mismo modelo, por lo que es aconsejable realizar una

calibración específica para cada sensor. Estos sensores han sido calibrados en un casco ortopédico.

9.3. CALIBRACIÓN DEL SENSOR SENSITRONICS 1"

Se ha calibrado este sensor de una forma más simple respecto al sensor de Interlink debido a que este sensor no presenta los mismos fenómenos tan acusados de drift o deriva. Se ha calibrado mediante la recta obtenida en los ensayos realizados:

Recta de calibración $F=f(V)$: $F = 3,955V + 1,9132$ (N)

Donde:

F: Fuerza predicha en N.

V: Voltaje de salida.

También se ha implementado en labview una máquina de estados de funcionamiento similar al descrito anteriormente para el sensor FSR402 de Interlink.

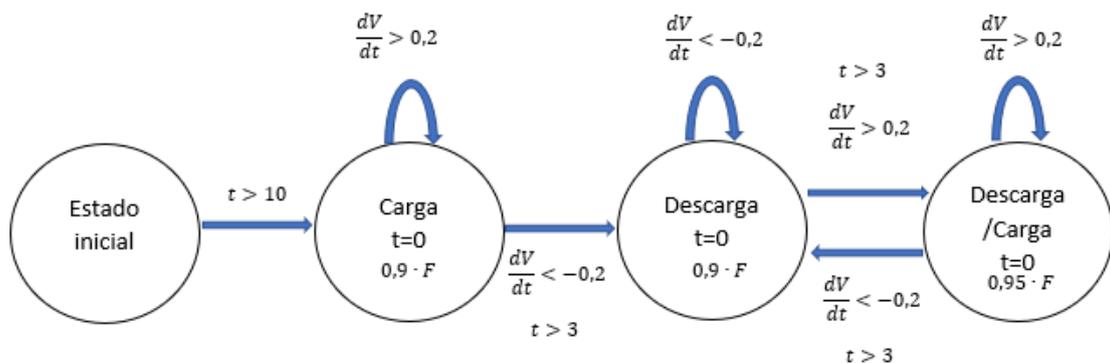


Figura 93: Máquina de estados propuesta para el sensor Sensitronics 1".

En el esquema anterior se resume el funcionamiento de la máquina de estados, para este sensor en el estado de Carga la fuerza se reduce un 10%, igual en el estado de Descarga, en el estado Descarga/Carga la fuerza predicha por el sensor se reduce un 5 %. Se ha decidido implementar estos ajustes de fuerza mediante experimentación para reducir el error de medida del sensor. También se ha añadido un tiempo de espera de 3 segundos en cada estado.

La calibración se ha comprobado de una forma similar a la realizada para el sensor de Interlink:

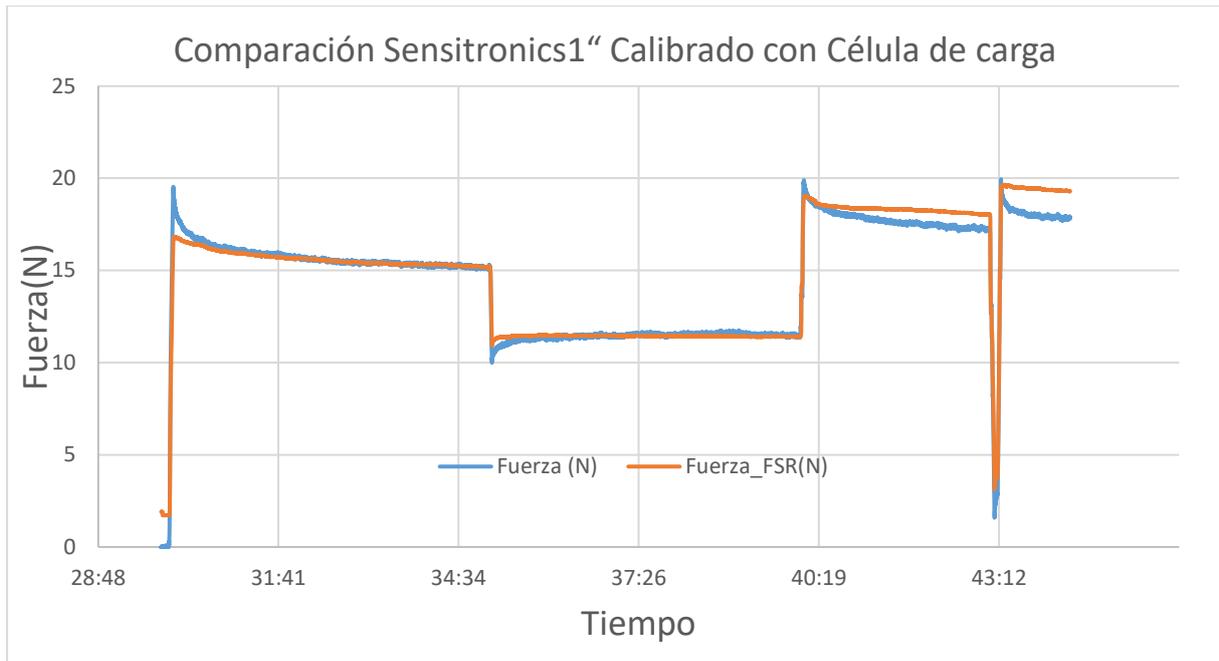


Figura 94: Ensayo de comparación entre la fuerza medida por la C.Carga y el sensor Sensitronics 1" calibrado.

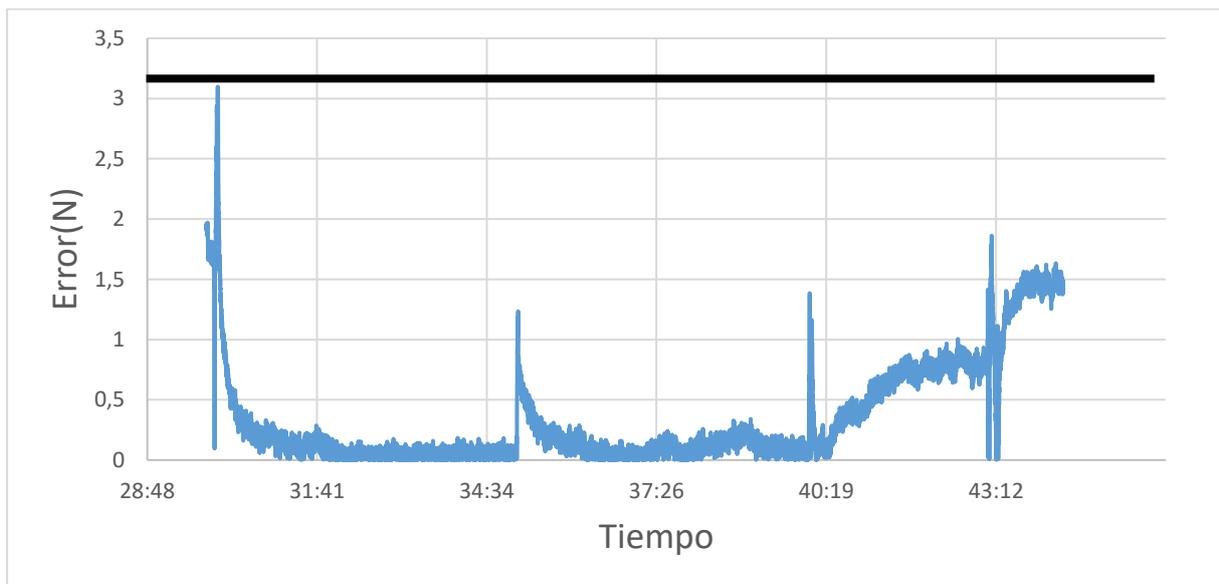


Figura 95: Error absoluto del sensor Sensitronics 1".

El error en este sensor se ha mantenido por debajo de 0,5 N la mayor parte del tiempo, exceptuando la rápida descarga y carga efectuada al final del ensayo que ha incrementado el error a unos 1,5 N. Se observa que el error se incrementa en las cargas y descargas detectadas por el algoritmo ya que el algoritmo comienza a medir con más precisión a partir de los 30 s.

9.4. CALIBRACIÓN DEL SENSOR FLEXIFORCE A201 DE TEKSCAN

Este sensor se ha calibrado de una forma prácticamente igual al sensor de Sensitronics.

Recta de calibración: $F = 5,451V + 2,4105 \text{ (N)}$

Donde:

F: Fuerza predicha en N.

V: Voltaje de salida.

Se ha implementado una máquina de estados en labview similar a las anteriores:

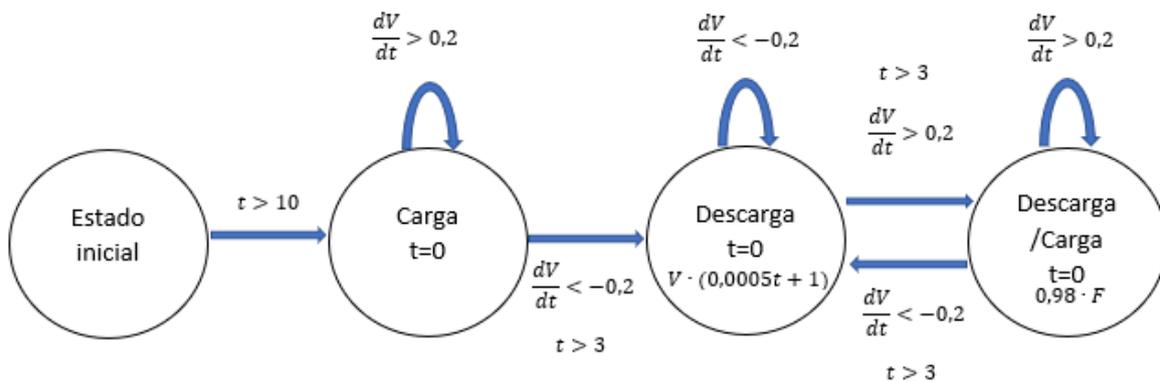


Figura 96: Máquina de estados propuesta para el sensor Flexiforce A201 de Tekscan.

Para el estado de Descarga se ha introducido una ecuación lineal para compensar la lectura de voltaje con el tiempo debido a fenómenos de histéresis, inicialmente el voltaje no se modifica, se incrementa de forma lineal un 10% a los 5 minutos. El ensayo de comparación entre la célula de carga y el sensor calibrado se ha seguido la misma metodología que en los ensayos mostrados anteriormente.

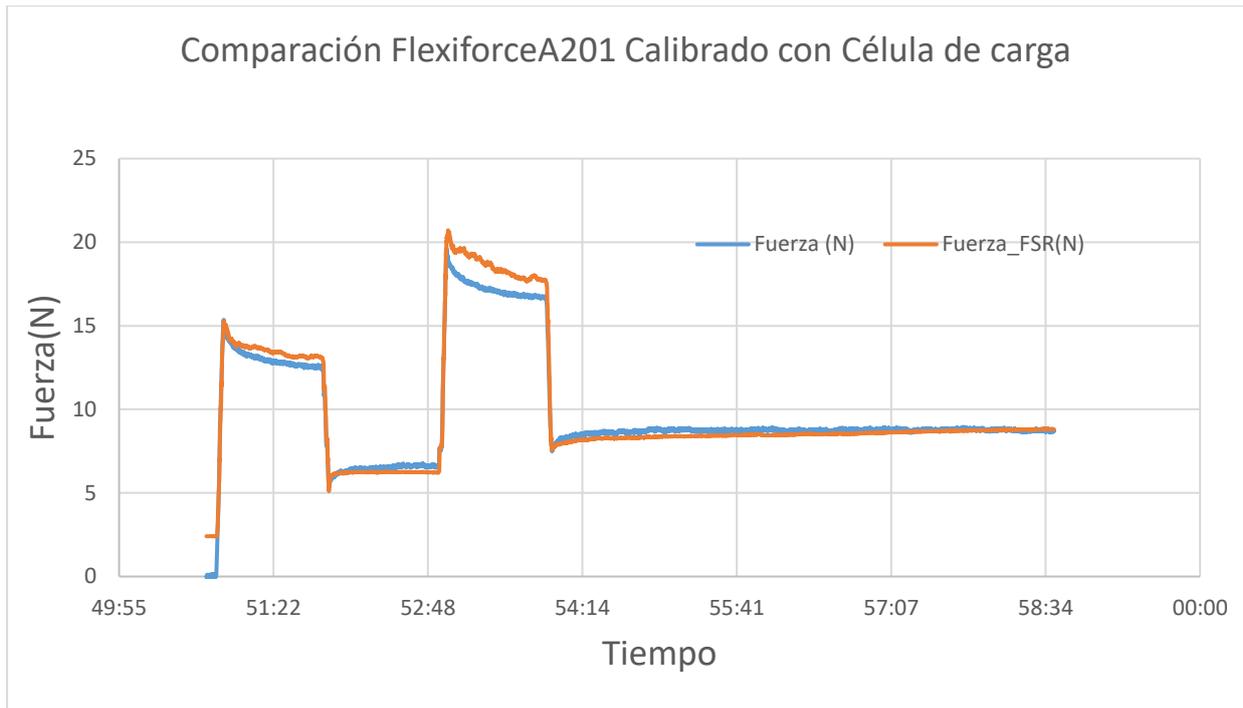


Figura 97: Ensayo de comparación entre la fuerza medida por la C.carga y el sensor Flexiforce A201 calibrado.

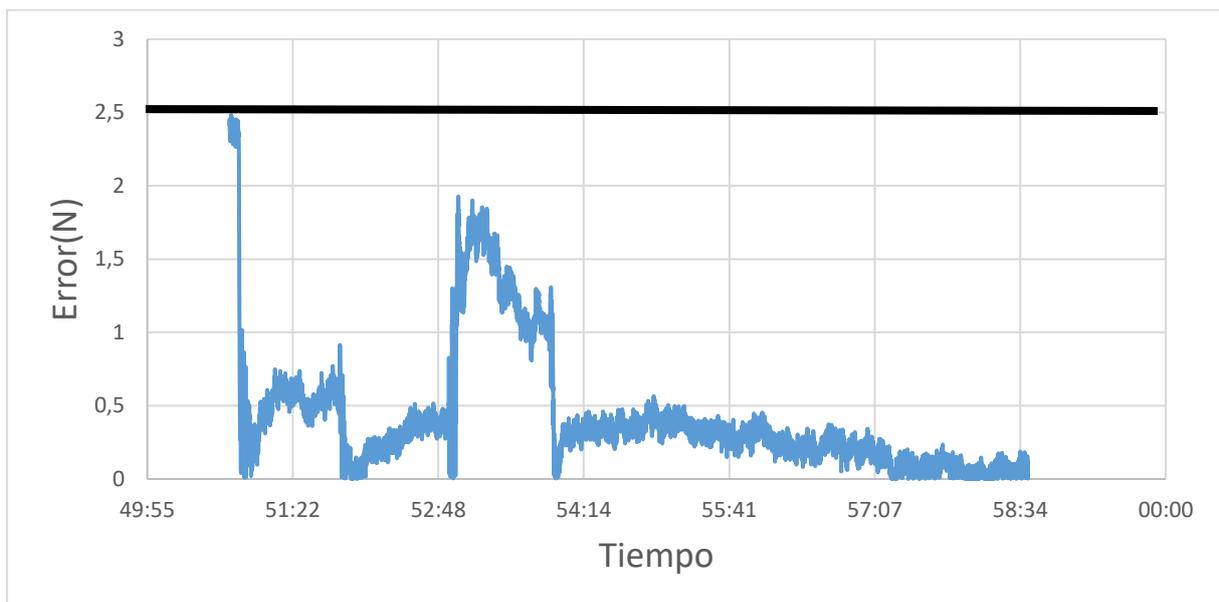


Figura 98: Error absoluto del sensor Flexiforce A201.

El sensor Flexiforce A201 se mantiene la mayor parte del tiempo con un error en torno a 0,5 N, exceptuando la carga realizada tras una descarga en el que el error asciende hasta alrededor de 1,5 N.

Los resultados obtenidos anteriormente dependen en gran medida de la calibración específica realizada para cada sensor y del algoritmo diseñado. Los sensores Trumode (Sensitronics y Tekscan) se muestran algo más precisos que los sensores de tipo shuntmode de Interlink, que además son más complejos de calibrar para aplicaciones donde el tiempo es importante. Se ha observado que el error se incrementa cuando una vez producida una descarga, se vuelve a cargar el sensor. Este error podría ser minimizado con la mejora del algoritmo y el estudio de los sensores bajo este comportamiento.

10. APLICACIÓN REAL CORSÉ ORTOPÉDICO

Para la verificación de los sensores se ha diseñado un ensayo que simule la colocación de los sensores entre un corsé ortopédico y un torso humano. Para simular el corsé se ha diseñado y construido con impresión 3D una sección de este con unos nervios de refuerzo para simular un reparto de fuerza de forma regular por la superficie, se ha pegado sobre la sección del corsé una goma eva de 10 mm de espesor. El torso, también construido mediante impresión 3D, se ha diseñado cogiendo una la misma sección del corsé, obteniendo su negativo, para simular la piel humana se ha seleccionado una goma eva de 5mm. Se ha añadido a la sección del torso una base y refuerzos para su adaptación un banco de ensayo cuyo esquema se describe más adelante. A continuación, se muestran los cad de las piezas diseñadas.

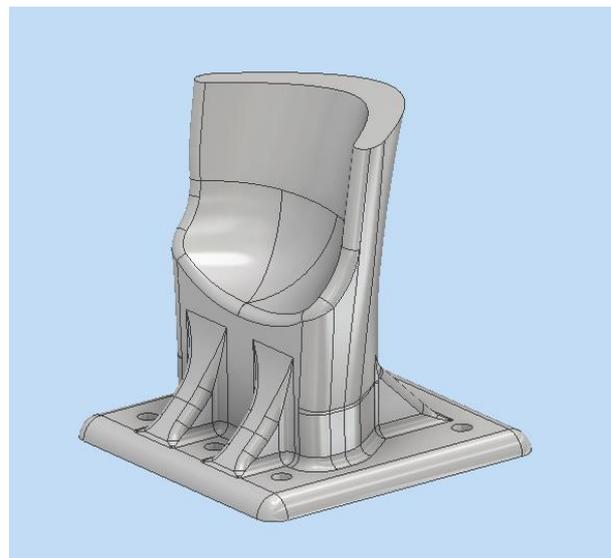
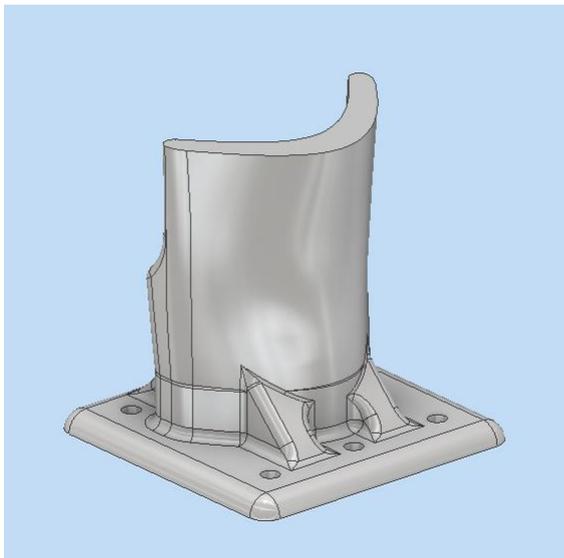
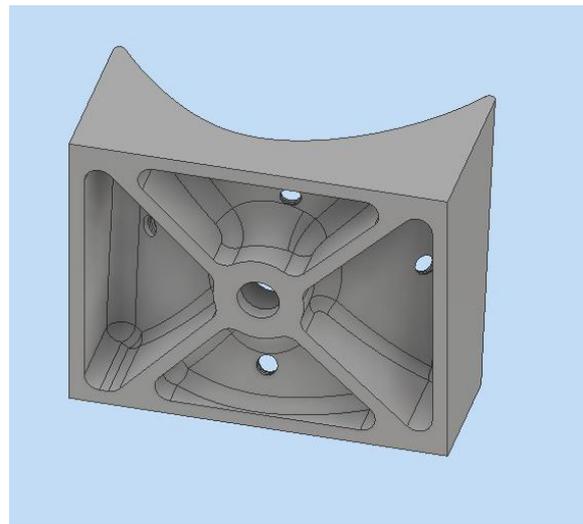
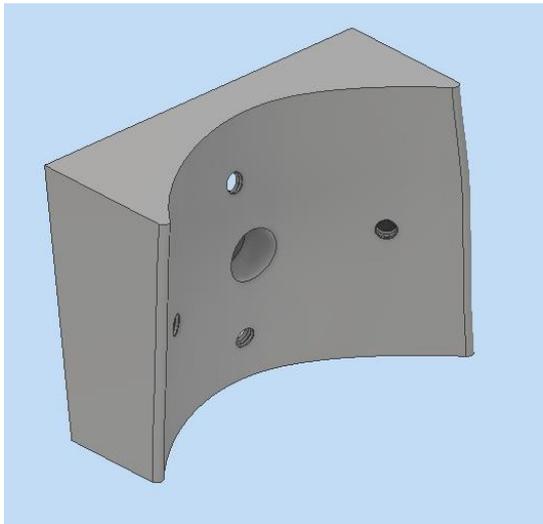


Figura 99: Cad de los utillajes diseñados, en la zona superior el actuador que simula el corsé, y en la zona inferior el soporte que simula el cuerpo humano.

10.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Para la realización de los ensayos se han seleccionado cuatro sensores del fabricante Sensitronics, debido que tienen una mayor área sensible que los sensores del fabricante Tekscan y son más precisos y que los sensores del fabricante Interlink. El ensayo ha consistido en la colocación de los cuatro sensores sobre el utillaje que simula la sección de cuerpo humano.

El banco de ensayos (Trabajo de Fin de Grado de Guillermo Santos), dispone de un actuador lineal para ejercer una fuerza en una dirección, una célula de carga para poder medir esta fuerza, también se dispone de un encoder para la medición del desplazamiento y distintos soportes para seleccionar las posiciones del ensayo. El control y la adquisición de datos de los ensayos se realiza mediante el programa Labview. En la siguiente imagen se muestra el esquema cad del banco con el utillaje fabricado para el ensayo:

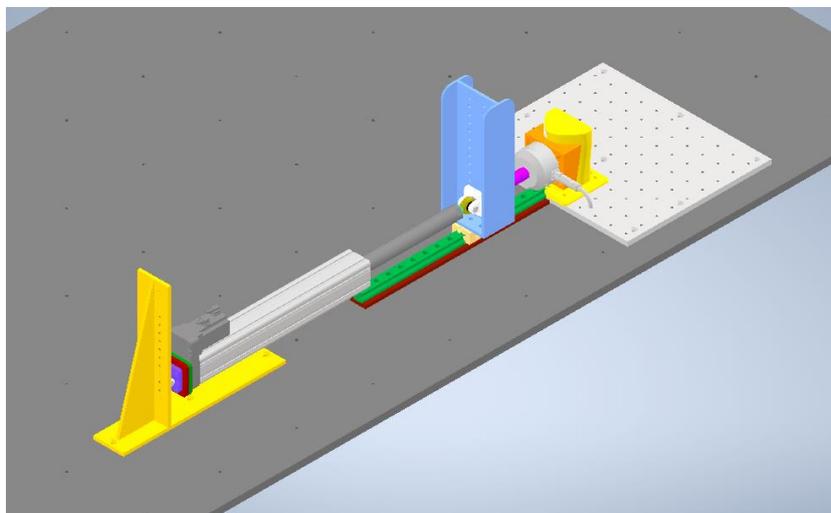


Figura 100: Esquema cad del banco de ensayos (Trabajo de Fin de Grado de Guillermo Santos), compuesto principalmente por un actuador lineal, célula de carga, soportes y utillaje.

La electrónica utilizada es similar a la descrita anteriormente, pero con la posibilidad de medir con cuatro sensores simultáneamente y como fuente de alimentación se dispone de una batería de 11 V. Para validar los sensores se va a calcular la fuerza total que miden los sensores sobre el área de contacto entre el cuerpo y el actuador que simula el corsé, mediante una interpolación realizada en labview.

Cada sensor ha sido calibrado individualmente en la máquina de ensayos antes descrita en un rango de fuerza de 0 a 50 N, en los ensayos se ha ejercido una fuerza máxima de 250 N. Los sensores han sido calibrados en unas condiciones similares a las del ensayo, con el mismo espesor de las espumas y una configuración plana, ya que la curvatura del corsé no es muy pronunciada en las zonas de colocación de los sensores.

Las rectas de calibración obtenidas para cada sensor se han introducido en un programa de labview creado para controlar el banco de ensayos y realizar mediciones. El algoritmo para medir la fuerza en este programa es la misma máquina de estados descrita anteriormente. En este caso se ha calculado la presión medida por cada sensor en vez de la fuerza, con el promedio de las presiones medidas por los cuatro sensores y el área de contacto entre cuerpo y corsé se ha calculado la fuerza total predicha por los sensores y se ha comparado con la fuerza medida por la célula de carga, y así poder hacer una validación de los sensores en la configuración del ensayo. A continuación, se muestran las imágenes de la colocación de los sensores, el equipo electrónico y el banco de ensayos:

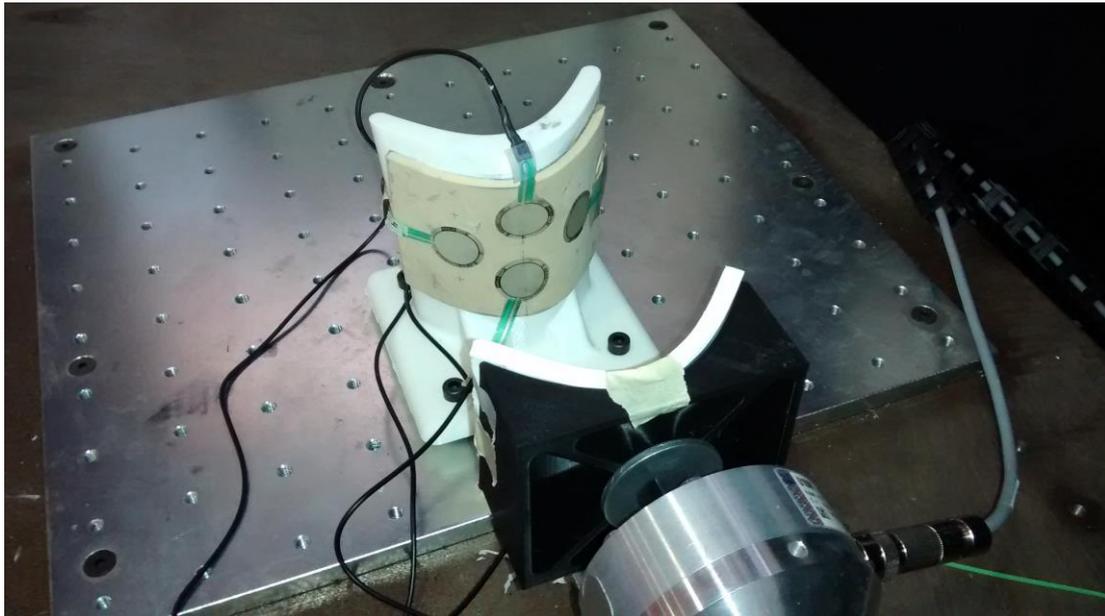


Figura 101: Posicionamiento de los sensores sobre la espuma en el ensayo, se puede observar el actuador con su espuma y la célula de carga.

Los sensores se han colocado sobre el utillaje que simula el cuerpo humano, pegados sobre la goma eva de 5 mm (simula la piel), de forma simétrica como muestra la imagen, dos sensores en la línea vertical central separados cada uno a 25 mm respecto al punto central de la espuma, y los otros dos sensores sobre la línea horizontal central cada uno a una distancia de 35 mm del punto central de la espuma.

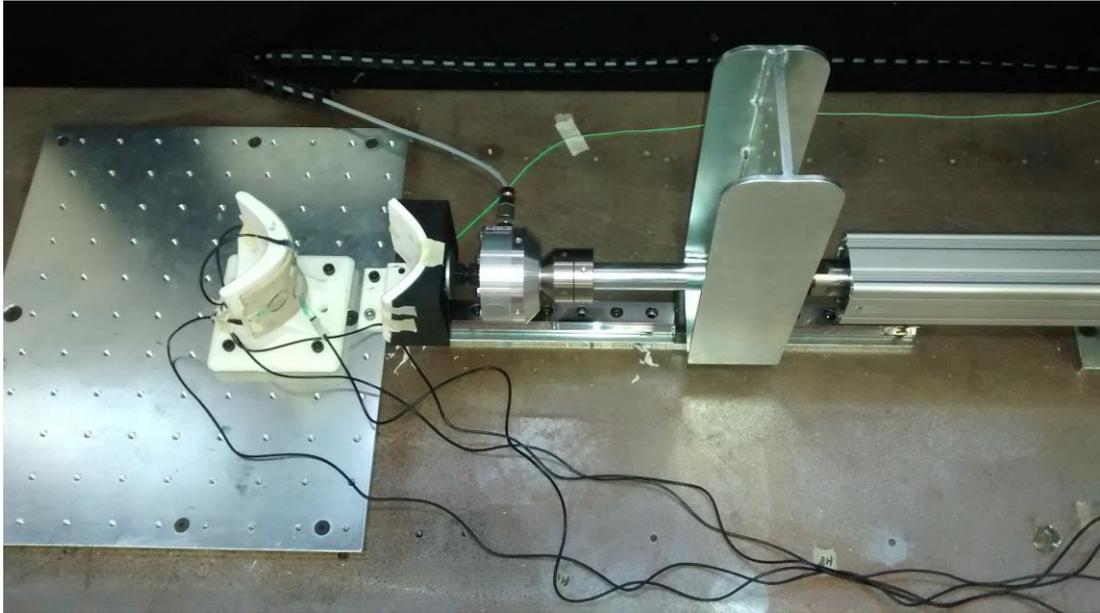


Figura 102: Imagen del ensayo con los utillajes célula de carga, actuador y soportes.

En los primeros ensayos realizados se ha medido el área de contacto de las dos superficies ya que se ha comprobado durante la medición de fuerzas que un sensor estaba menos solicitado que los otros. La superficie de contacto no es simétrica, y sumado a las espumas, geometría, posicionamiento de los utillajes etc., se ha procedido a medir el área de contacto mediante la colocación de un folio de papel con una espuma cubierta con tinta. Se ha realizado para distintas fuerzas, pues el área de contacto entre las superficies aumenta con la fuerza ejercida, a continuación, se muestran imágenes de los folios obtenidos para el cálculo del área de contacto aproximada:

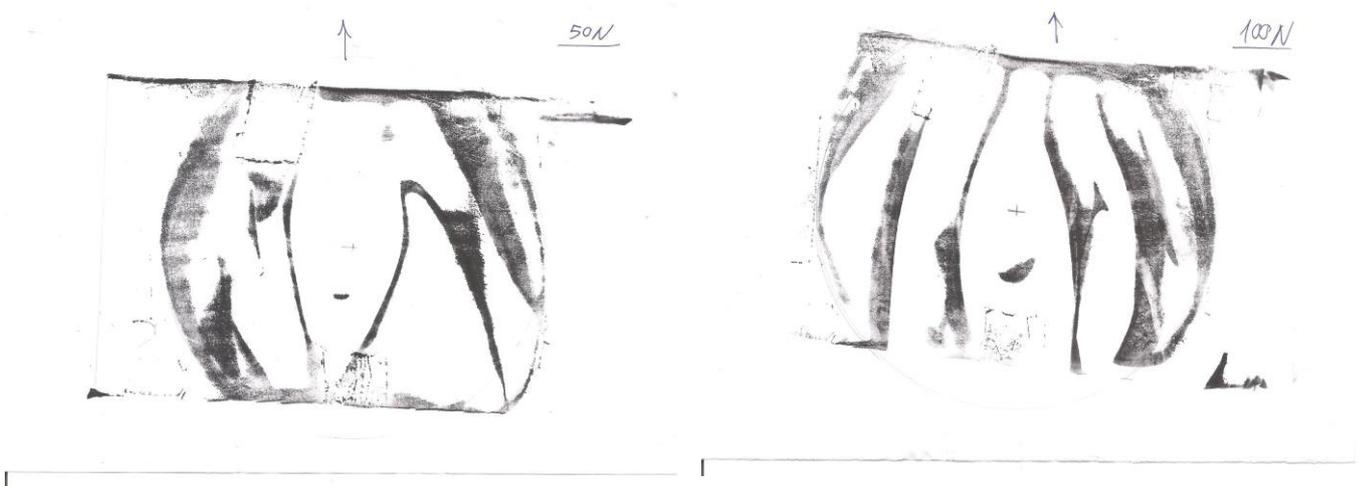




Figura 103: Algunos de los folios utilizados para medir el área de contacto para diferentes fuerzas, por orden, 50, 100 y 200 N.

En las imágenes anteriores puede observarse como el contorno del área de contacto para cada nivel de fuerza es cada vez mayor, para simplificar los cálculos se ha elegido un área promedio a partir de las áreas obtenidas para cada caso, también se ha multiplicado esta área por un factor de 0.75, ya que se ha observado durante los ensayos que una zona aproximadamente igual a un cuadrante casi no entra en contacto para los niveles de fuerza elegidos, para comprobar esto se ha utilizado una espuma en vez de folios de papel para comprobar el área de las zonas menos solicitadas, tras realizar los cálculos se ha obtenido un área de $8056,5 \text{ mm}^2$ que por tiempo y simplicidad se ha utilizado para todos los ensayos. A continuación, se muestra la espuma utilizada para comprobar las zonas con menor presión:

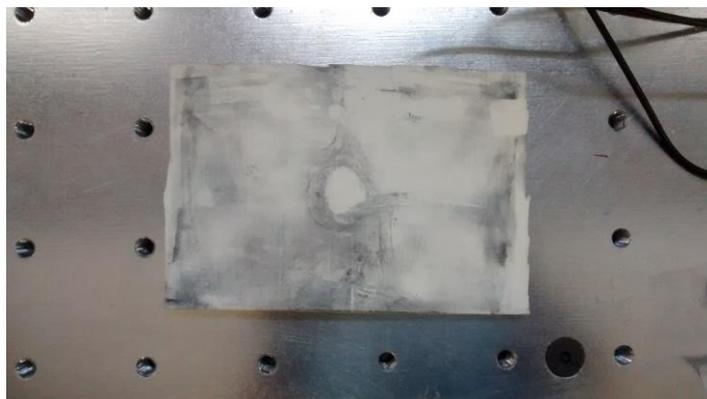


Figura 104: Espuma con tinta para comprobar las zonas de contacto menos solicitadas.

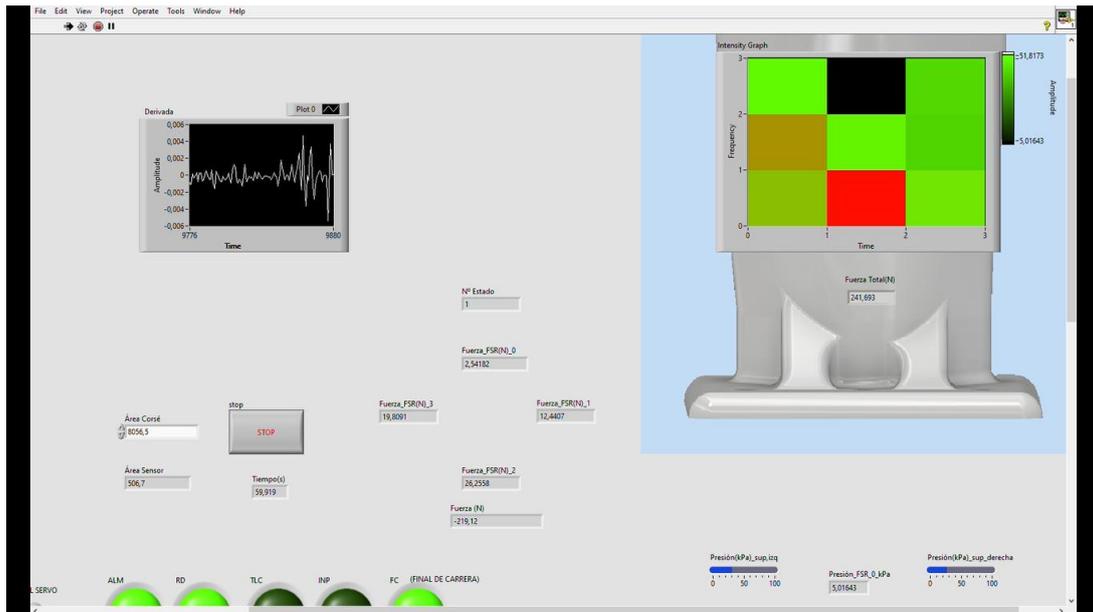


Figura 105: Imagen del panel frontal del programa labview, se puede ver un sencillo gráfico de presiones en color donde se muestra la presión leída por los cuatro sensores, y otros cinco puntos de interpolación, zona central y los cuatro cuadrantes situados en las esquinas del gráfico.

10.2. RESULTADOS DEL ENSAYO CORSÉ ORTOPÉDICO

Los ensayos se han realizado con cinco niveles de fuerza: 50, 100, 150, 200 y 250 N. Para cada nivel de fuerza, el actuador ha llegado a la fuerza requerida y se ha mantenido durante 2 minutos para observar la evolución de las fuerzas. En las siguientes gráficas se muestra la evolución de la fuerza medida por la célula de carga y la predicha por los sensores respecto al tiempo, también se muestra la evolución del error absoluto para cada caso.

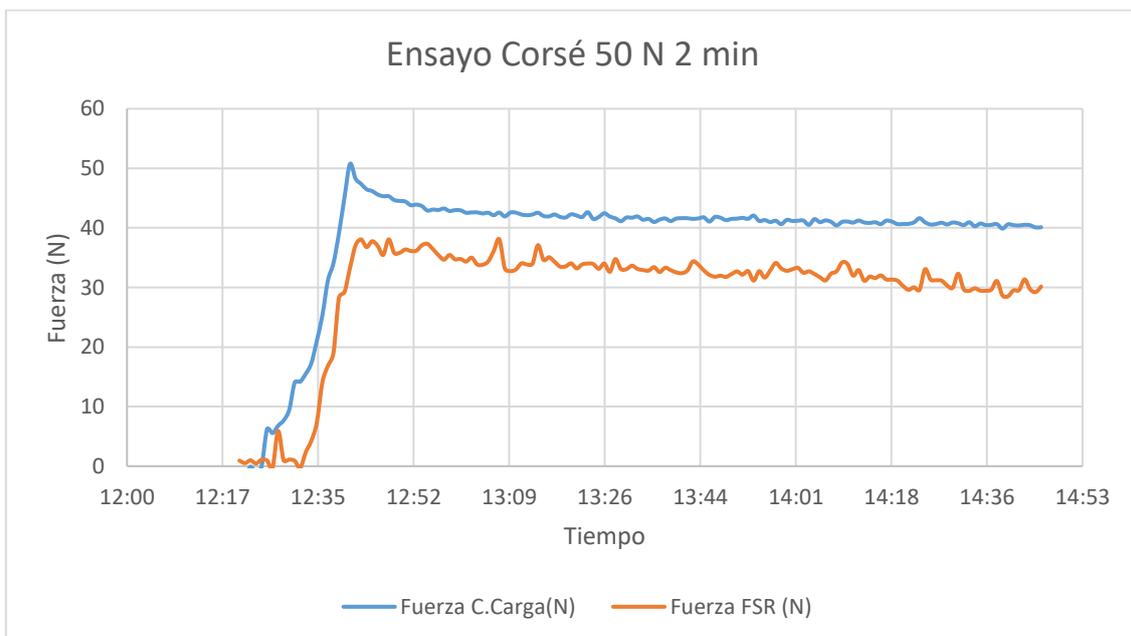


Figura 106: Comparación de la fuerza medida por la célula de carga y la fuerza total medida por los sensores para una carga de 50 N durante 2 minutos. 78

Medida de la fuerza mediante sensores de tipo film

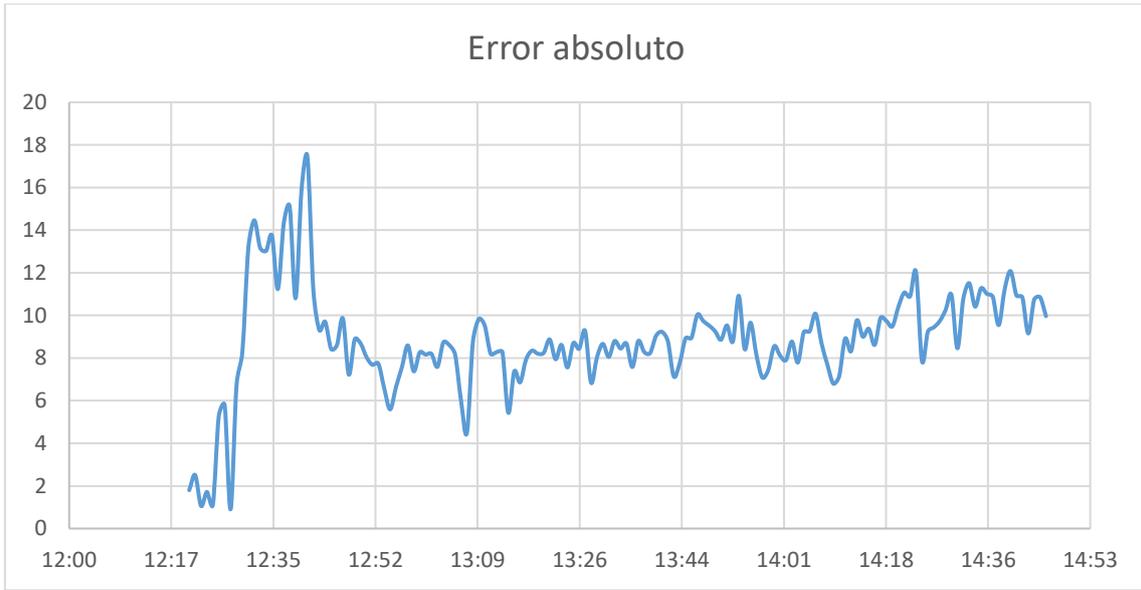


Figura 107: Error absoluto del ensayo a 50 N.

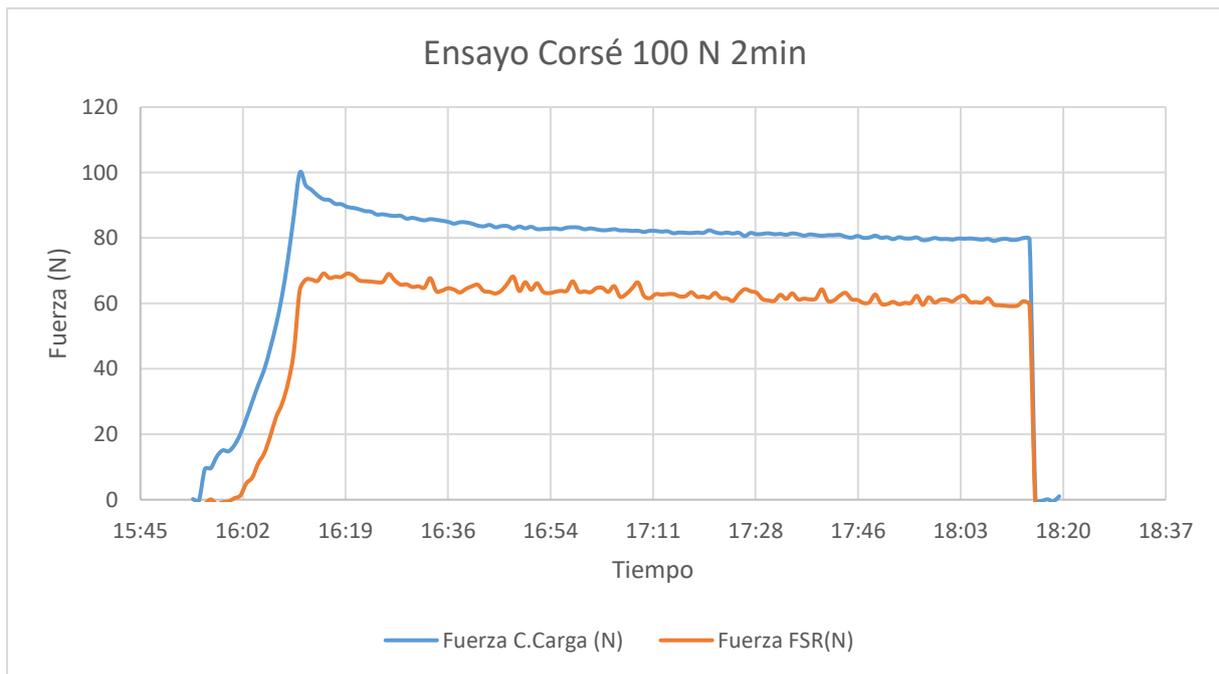


Figura 108: Comparación de la fuerza medida por la célula de carga y la fuerza total medida por los sensores para una carga de 100 N durante 2 minutos.

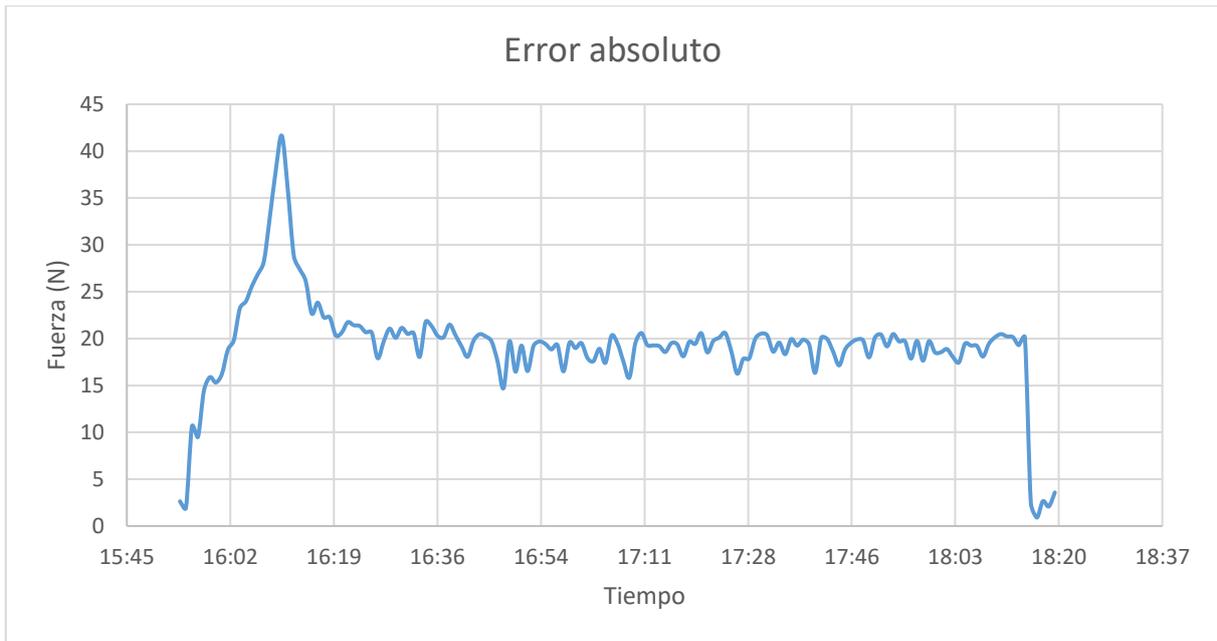


Figura 109: Error absoluto del ensayo a 100N.

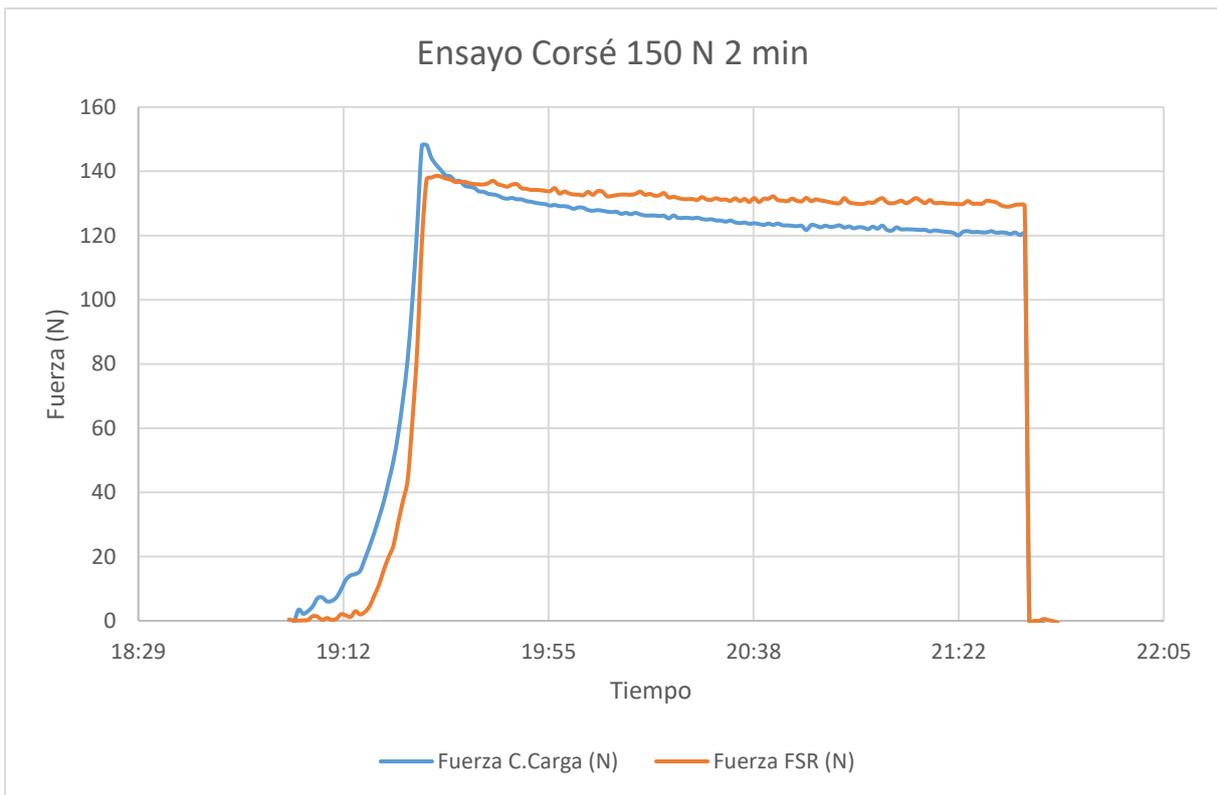


Figura 110: Comparación de la fuerza medida por la célula de carga y la fuerza total medida por los sensores para una carga de 150 N durante 2 minutos.

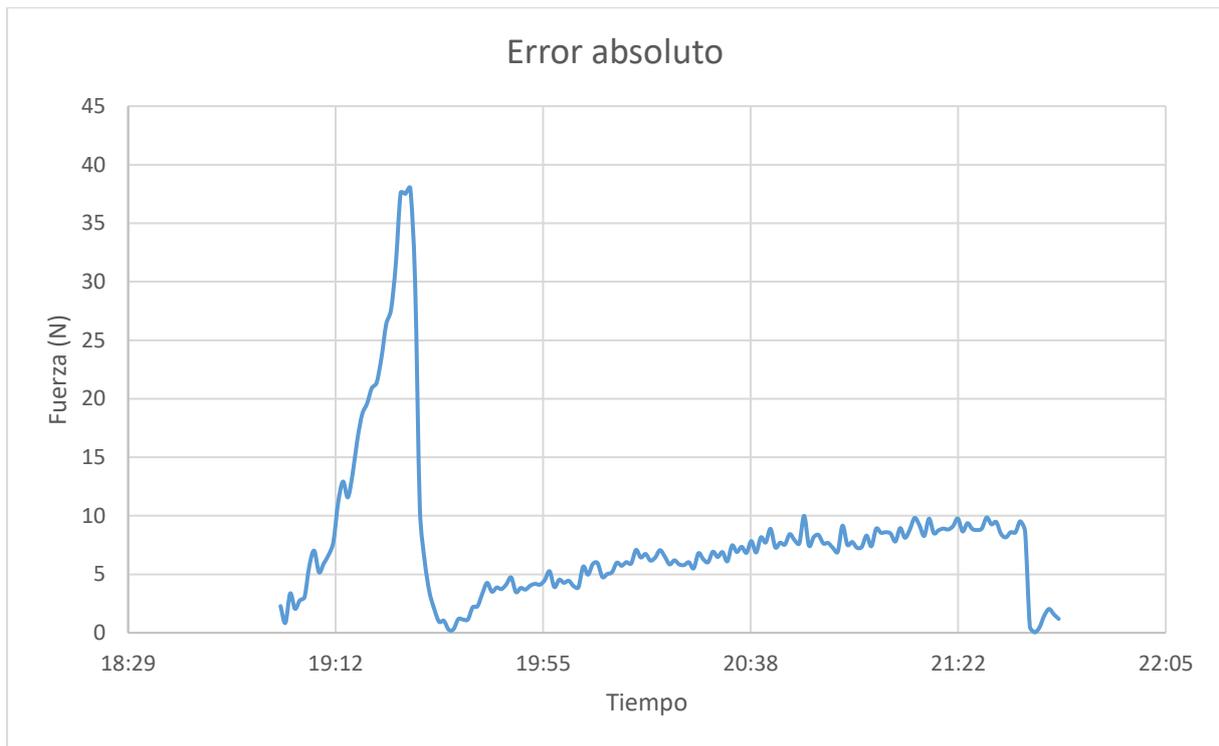


Figura 111: Error absoluto del ensayo a 150 N.

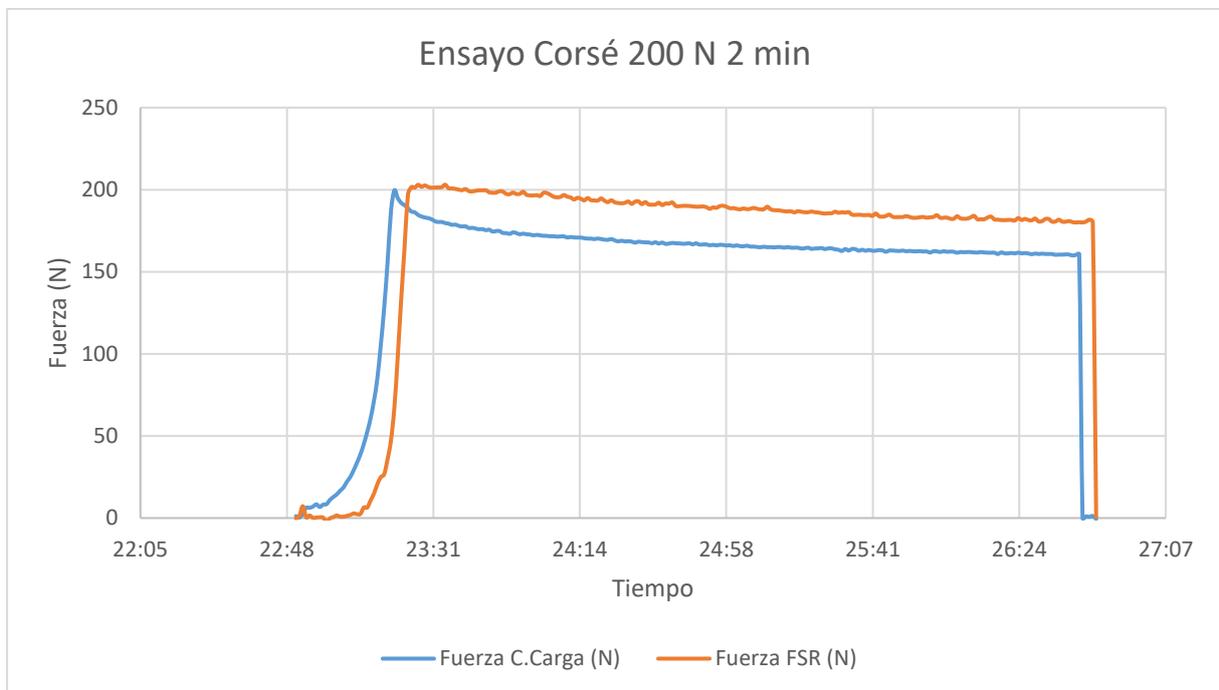


Figura 112: Comparación de la fuerza medida por la célula de carga y la fuerza total medida por los sensores para una carga de 200 N durante 2 minutos.



Figura 113: Error absoluto para el ensayo anterior.

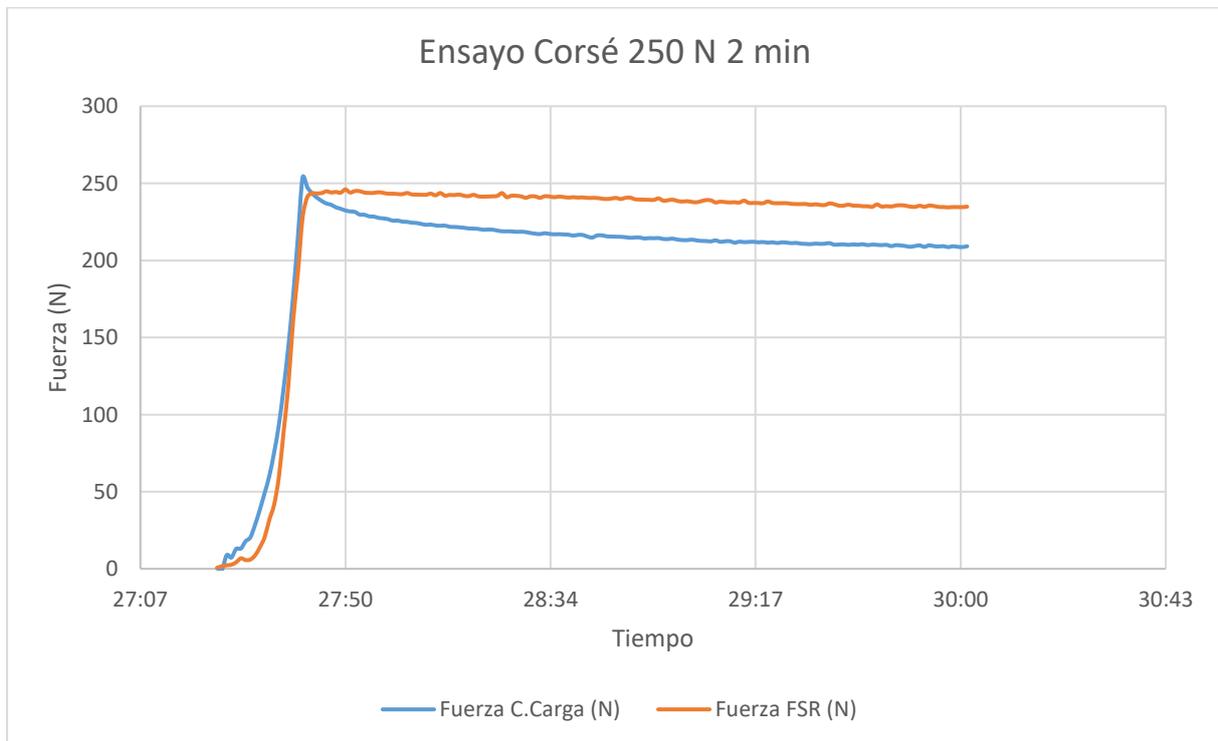


Figura 114: Comparación de la fuerza medida por la célula de carga y la fuerza total medida por los sensores para una carga de 250 N durante 2 minutos.

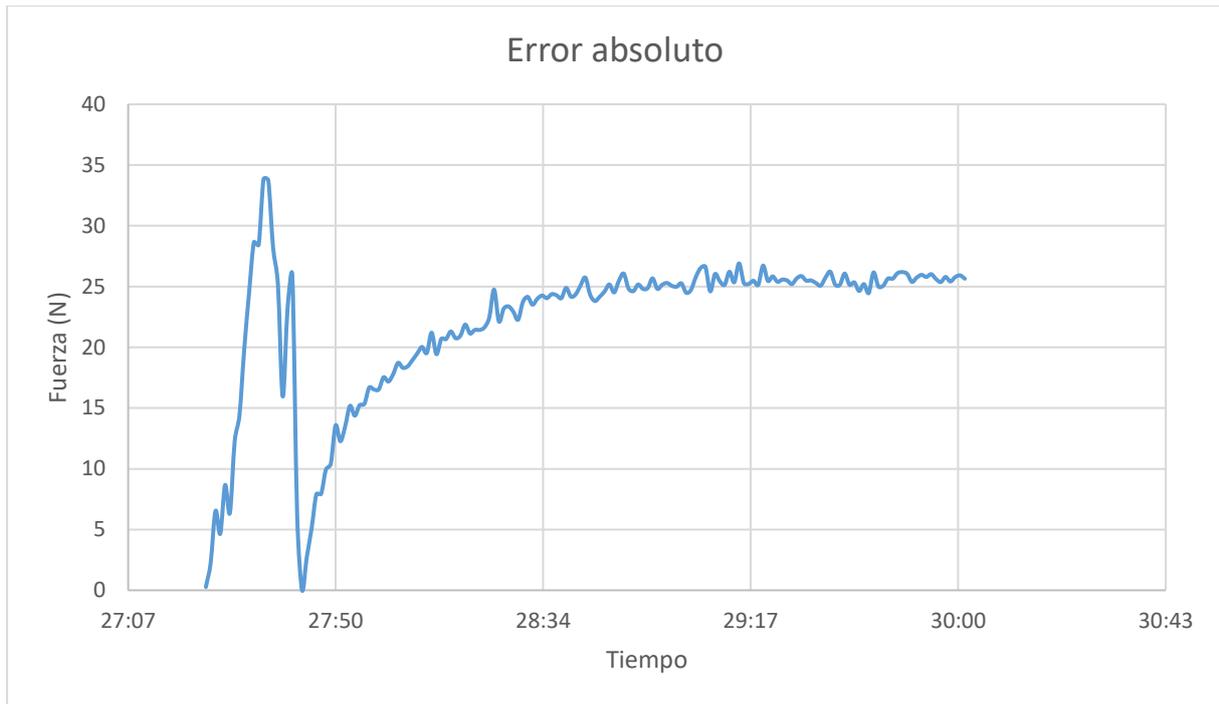


Figura 115: Error absoluto del ensayo a 250 N.

Se observa que el error relativo es mayor para los casos de 50 y 100 N, en el ensayo a 150 N se obtiene el mínimo error relativo de todos los ensayos, esto puede deberse a que por simplicidad se ha elegido un área promedio de contacto, es decir, para 50 N el área de contacto es algo menor al promedio por lo que la fuerza que se obtendría seleccionando el área adecuada sería mayor, y se podría minimizar el error. Estos resultados dependen en gran medida de los siguientes factores: el algoritmo utilizado en el programa para calcular la fuerza predicha por los sensores, de su calibración específica, del cálculo del área de contacto entre actuador y cuerpo, geometría de las superficies, posicionamiento, etc.

Como puntos positivos, se puede observar que los sensores son sensibles a los cambios de fuerza y siguen en parte la relajación de las espumas. En estos ensayos también se puede comprobar que áreas están más solicitadas, es decir, aunque la precisión de la medida de los sensores no es elevada se puede obtener la distribución de presiones aproximada entre las superficies de contacto.

11. ENSAYO 4 SENSORES SENSITRONICS CON GEOMETRÍA PLANA

En el ensayo de simulación del corsé, se ha tenido la dificultad de calcular el área de contacto entre el actuador y el cuerpo debido a las variables geométricas involucradas, se ha decidido realizar un ensayo con una geometría plana y con un área de contacto conocida, para así poder realizar una validación de los sensores más correcta.

Los ensayos se han realizado con los mismos cuatro sensores del fabricante sensitronics con rectas de calibración de 0 a 50 N. Los sensores se han colocado agrupados juntos formando un cuadrado sobre una goma eva circular de área 4417 mm².

En este ensayo se simula la colocación de los sensores entre el cuerpo (hueso+piel) y una órtesis (espuma + plástico). La piel y la espuma de la órtesis se han simulado con goma eva de 5 mm de espesor. Se ha utilizado la misma máquina de ensayos descrita anteriormente. Los utillajes y el actuador que simula el corsé han sido fabricados en PLA mediante impresión 3D.

En este ensayo también se ha aprovechado la posibilidad de comparar las medidas de los sensores con puck (toda la fuerza aplicada sobre los sensores pasa por sus áreas sensible) o sin puck (la fuerza se transmite por un área mayor al área sensible de los sensores).

Los ensayos han consistido en la carga y descarga de los sensores para distintos rangos de fuerza y distintos intervalos de tiempo. La validación de los sensores se ha realizado mediante la comparación de la fuerza medida por la célula de carga y la medida por los sensores FSR, que es calculada mediante un algoritmo implementado en labview.

El programa de labview utilizado es similar a los descritos anteriormente, consistente principalmente en una máquina de estados para calcular la fuerza en distintos estados de carga y descarga. En el caso de los sensores sin puck, la fuerza se calcula en el programa mediante el promedio de la presión medida por los sensores dividida por el área total. En el caso de los sensores con puck la fuerza total se calcula mediante la suma de las fuerzas medidas por cada sensor. A continuación, se muestran las dos configuraciones utilizadas, sin puck y con puck.

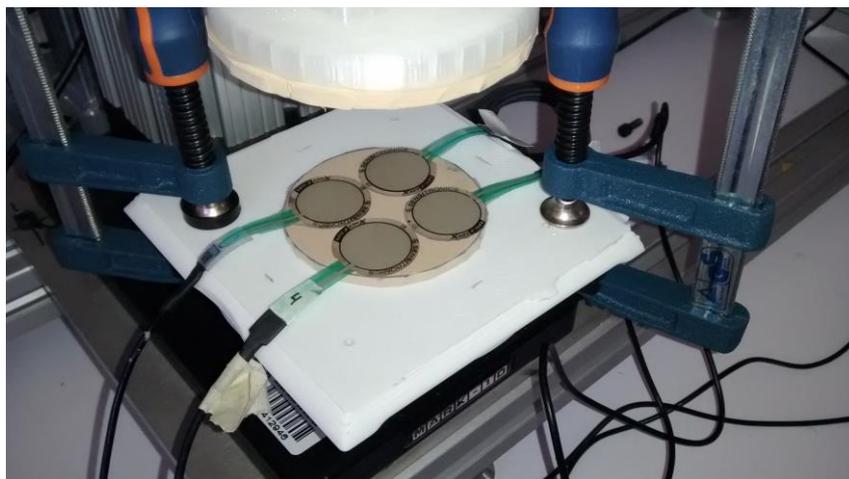


Figura 116: Imagen de los sensores en el ensayo plano sin puck.



Figura 117: Imagen de los sensores en el ensayo plano con puck.

11.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CON CUATRO SENSOSES SENSITRONICS Y GEOMETRÍA PLANA

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos para las dos configuraciones, se compara la fuerza medida por la célula de carga con la fuerza predicha por los sensores FSR. Los ensayos han consistido en cargas y descargas de fuerza en un rango de fuerza aproximado de 0 a 200 N, en intervalos de tiempo de aproximadamente dos minutos. También se muestra una gráfica con la evolución del error absoluto para cada configuración.

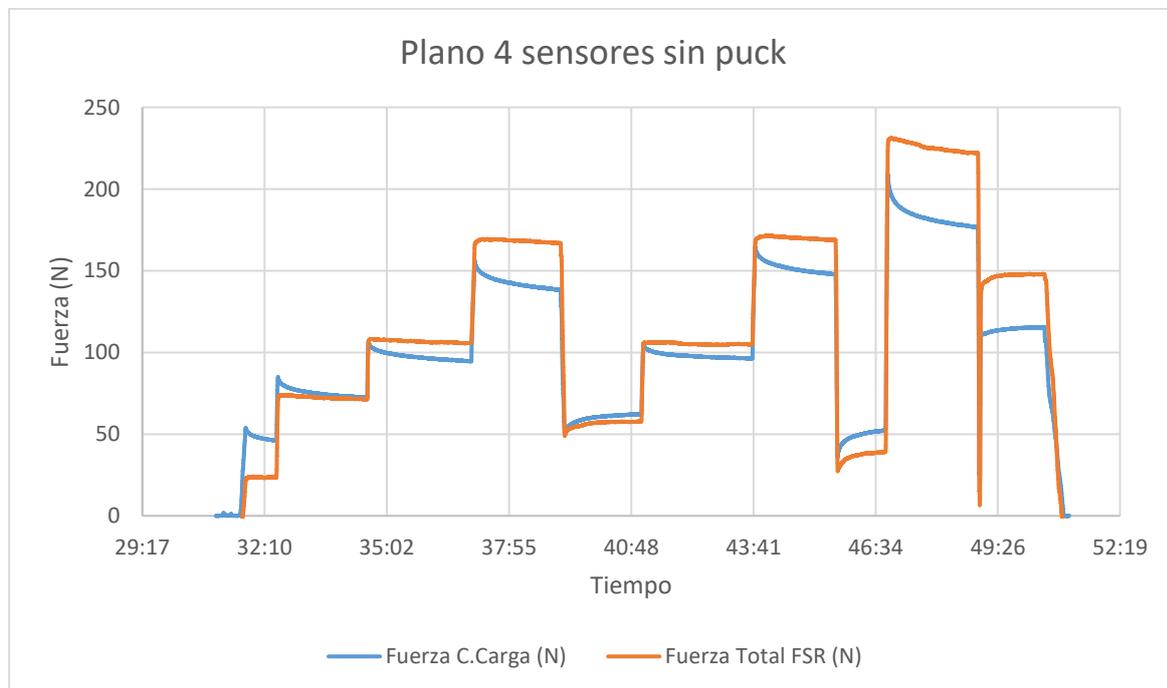


Figura 118: Comparación de la fuerza medida por la célula de carga y la fuerza total medida por los sensores en el ensayo plano sin puck.

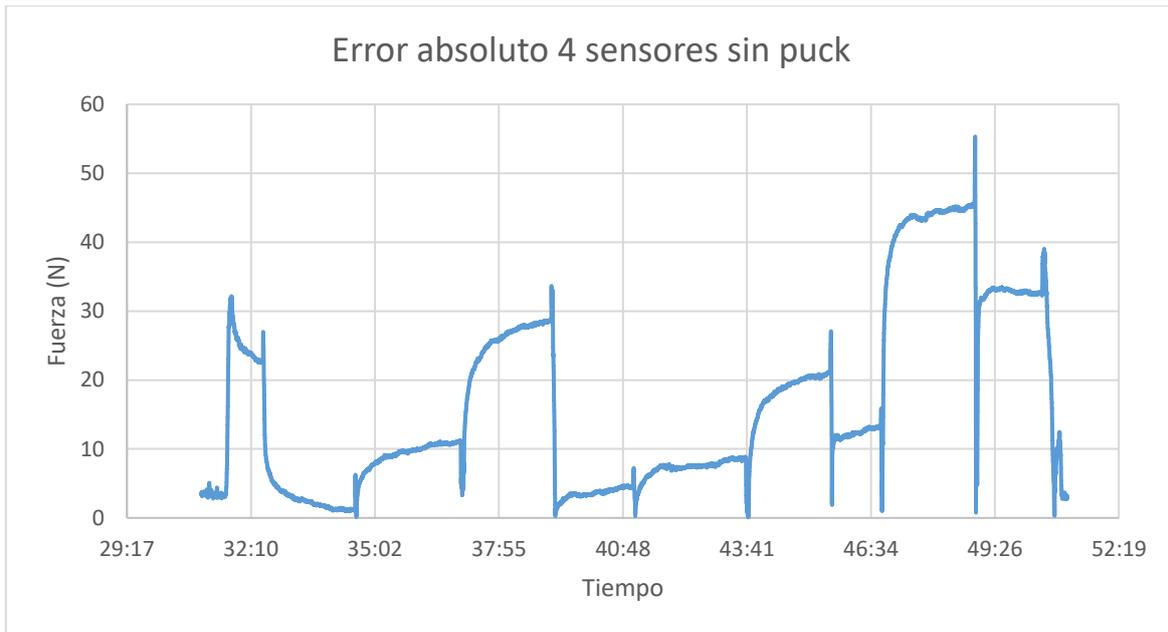


Figura 119: Error absoluto del ensayo con cuatro sensores sin puck.

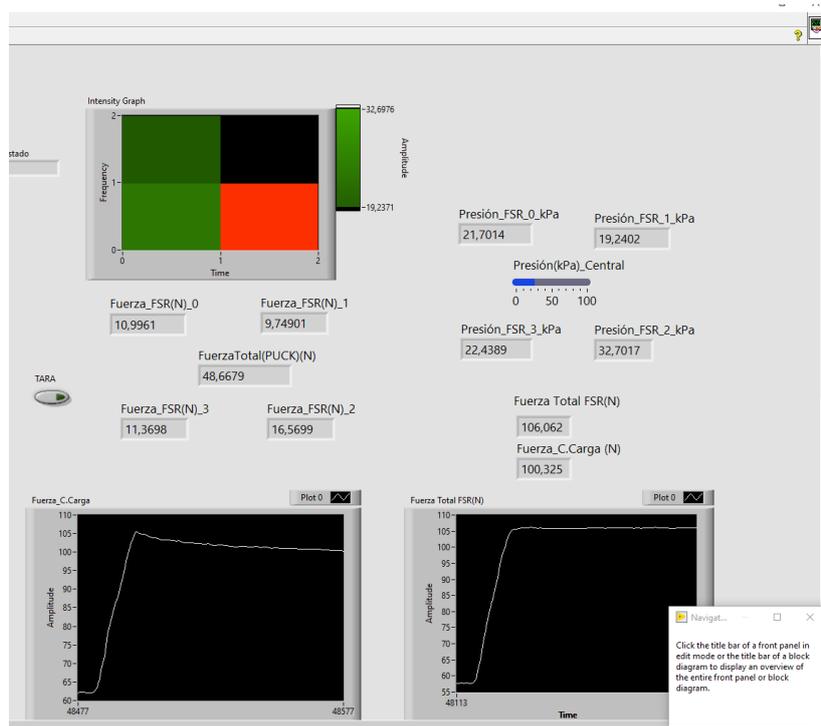


Figura 120: Imagen frontal del programa en labview, se pueden ver las fuerzas y presiones medidas por los sensores durante el ensayo.

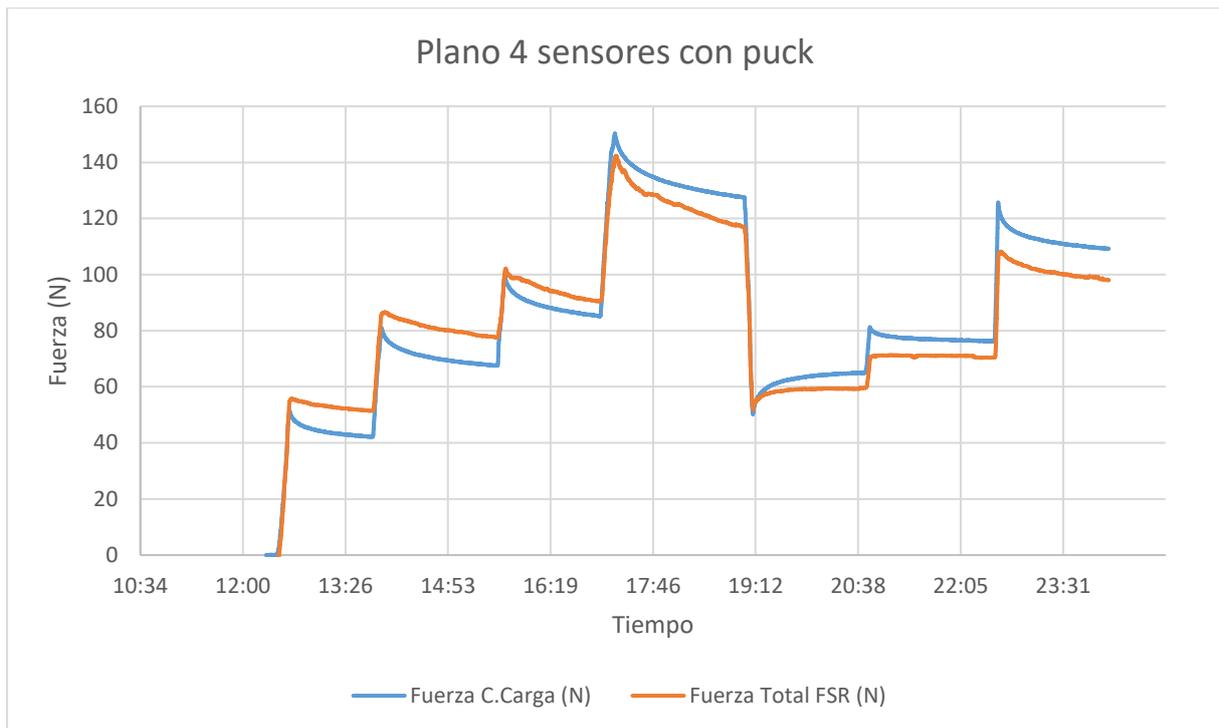


Figura 121: Comparación de la fuerza medida por la célula de carga y la fuerza total medida por los sensores en el ensayo plano con puck.



Figura 122: Error absoluto del ensayo con cuatro sensores y con puck.

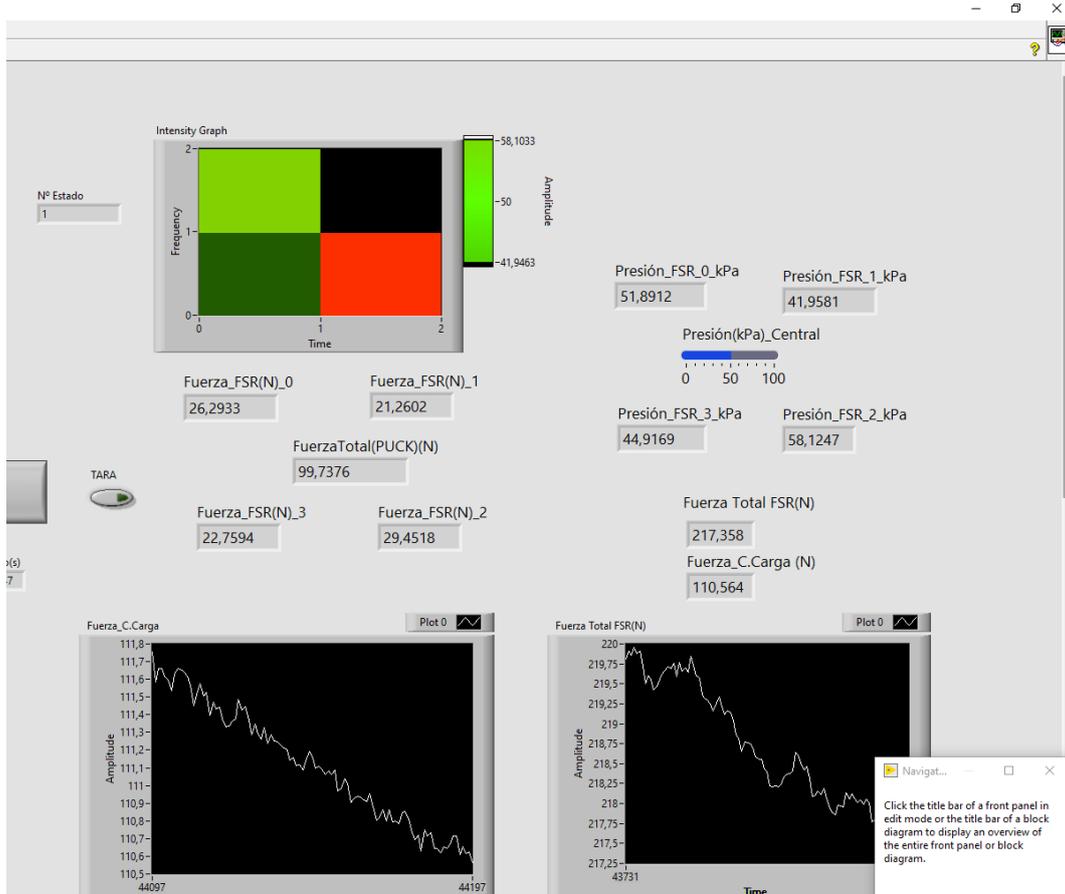


Figura 123: Imagen del panel frontal del programa labview en el que se pueden ver las fuerzas y presiones durante el ensayo.

Se observa que la configuración con puck tiene un comportamiento más uniforme con un error medio más predecible entorno a los 10 N, en comparación con la configuración sin puck que su error absoluto es menos uniforme y fluctúa entre 0 y 45 N dependiendo del estado de carga de los sensores en un instante determinado. Estos resultados coinciden con la recomendación de los fabricantes de utilizar un puck cuando la fuerza es ejercida sobre un área mayor al área sensible de los sensores. Aunque se observa que para determinadas configuraciones donde no es posible la utilización de un puck por motivos de espacio o geometría, se pueden realizar mediciones de la evolución de la fuerza/presión en el tiempo, pero con una menor precisión. Aunque hay que tener en cuenta que la fuerza predicha por los sensores mostrados anteriormente depende en gran medida de la calibración específica realizada para los sensores y los algoritmos diseñados. Por lo que una mejora tanto de los algoritmos y las calibraciones tienen un gran impacto sobre la precisión de los sensores.

12. LÍNEAS FUTURAS

Las diversas aplicaciones actuales y futuras en las que los sensores de tipo film piezorresistivos son adecuadas para realizar medidas de fuerza/presión abren un abanico de nuevas líneas de investigación acerca del funcionamiento de estos sensores:

- Estudio de mejores algoritmos de calibración de los sensores para mejorar su precisión, en este trabajo se han realizado algoritmos básicos para predecir el comportamiento de los sensores, pero estos tienen todavía un gran margen de mejora sobre todo en el estado de descarga y a continuación carga del sensor, por lo que realización de ensayos que simulen este comportamiento son importantes.
- En este trabajo no se han realizado ensayos de repetibilidad, por lo que la realización de estos ensayos en un futuro es de gran importancia para asegurar una buena precisión de los sensores.
- Estudio de matrices de sensores, tanto comerciales como las fabricadas mediante la agrupación de sensores individuales con circuitos electrónicos adicionales basados en multiplexores y registros de desplazamiento. Sería de gran importancia conocer los métodos de calibración de estas matrices y su comportamiento en la medición de la fuerza presión entre superficies complejas. El estudio de matrices de sensores individuales es también importante frente a las matrices comerciales ya que estas son escasas y las disponibles pueden tener un precio muy restrictivo dependiendo de la aplicación.
- Comunicación sin cables (wifi, bluetooth, etc.). En las aplicaciones con productos ortopédicos es una gran ventaja contar con el envío de los datos al ordenador mediante comunicación inalámbrica debido a la simplicidad durante el proceso de medición que esto implica (espacio, movilidad, seguridad etc.). Incluso sería posible integrar la toda la electrónica en el mismo producto ortopédico.
- Estudio de diversos materiales piezorresistivos (Como el anteriormente citado Velostat o el ofrecido por Sensitronics) para comprender y modelar su comportamiento en la medición de fuerzas. Con este material es posible fabricar tanto sensores individuales como agrupaciones de estos (matrices). Tras el estudio de diversos artículos científicos, la precisión de estos sensores personalizados depende en gran medida de los materiales utilizados en su fabricación, diseño, así como las tecnologías de fabricación utilizadas, maquinaria, etc.

13. CONCLUSIONES

Los sensores piezorresistivos de tipo film son adecuados para aplicaciones en las que una gran precisión no es necesaria, con este tipo de sensores se pueden esperar precisiones con un error de entre el 5 % al 10 % con una calibración adecuada. Su bajo coste y fácil integración los destaca en aplicaciones en las que las células de carga y galgas extensométricas ocupan mucho espacio y son difíciles de integrar.

Una de las principales conclusiones que se extraen de este trabajo es la importancia de realizar una calibración específica para cada sensor individual, es decir, una calibración lo más próxima a las condiciones en las que trabajará el sensor (geometría, posicionamiento, materiales, fuerzas, temperaturas, tiempo, etc.), incluso si es posible se deberá calibrar el sensor directamente en la posición que ocupará finalmente en una aplicación concreta con las mismas condiciones antes descritas. También se ha observado las diferencias entre las rectas o curvas de calibración entre sensores del mismo modelo y fabricante.

De los dos tipos de tecnologías (shuntmode y truemode) estudiadas en el trabajo, la tecnología truemode ha demostrado ser más precisa y simple de calibrar. Aunque no es posible afirmar en este trabajo que esta tecnología es más precisa pues solo se han tenido disponibles los sensores shuntmode de Interlink.

En los resultados de la calibración de los sensores se ha observado que el algoritmo que modela la predicción de la fuerza, en el caso de este trabajo una máquina de estados, la precisión baja en el estado de descarga/carga (cuando el sensor se ha descargado y a continuación se ejerce una carga), por lo que es fundamental el estudio del comportamiento de los sensores en este estado. La histéresis juega un papel importante en la precisión de los sensores bajo cargas y descargas, por lo que su estudio y modelado son importantes.

Las fuerzas cortantes tienen efecto sobre la medida de los sensores, en este trabajo se ha comprobado que la colocación de materiales deformables como son las espumas sobre la superficie de los sensores transmiten una fuerza cortante aunque la fuerza ejercida sea normal a la superficie del sensor. Este efecto ya está incluido en la calibración específica que se ha realizado en este trabajo, pues los sensores han sido calibrados con espumas colocadas sobre su superficie. La curvatura de los sensores también tiene un efecto sobre su medida, pero al igual que con las fuerzas cortantes la curvatura se incluye en la calibración específica de los sensores.

La medida con varios sensores en el ensayo que simula una aplicación real ha sido posible, aunque los resultados obtenidos dependen en gran medida de la geometría y el área total de la superficie de contacto, por lo que no se han podido sacar conclusiones acerca de su validación debido a la complejidad del cálculo del área de contacto durante el ensayo. Esto se ha sumado al bajo número de sensores, en el caso del trabajo de cuatro, en relación al área del ensayo. Un mayor número de sensores (matriz) es más adecuado para la medida de fuerzas/presiones sobre una superficie en la que no es posible la colocación de un puck (disco deformable del tamaño del área sensible del sensor para que toda la fuerza pase por este)

para así poder tener más información de cómo se distribuyen las presiones en la superficie a medir. En el ensayo plano con cuatro sensores se ha podido comprobar la ventaja de utilizar un puck sobre los sensores, ya que mejora la lectura de la fuerza, esto ya es descrito y recomendado por los fabricantes de sensores.

14. REFERENCIAS

- Ahmadizadeh, C., & Menon, C. (2019). Investigation of regression methods for reduction of errors caused by bending of FSR-based pressure sensing systems used for prosthetic applications. *Sensors (Switzerland)*, *19*(24). <https://doi.org/10.3390/s19245519>
- Ahmadizadeh, C., Pousett, B., & Menon, C. (2020). Towards management of residual limb volume: Monitoring the prosthetic interface pressure to detect volume fluctuations-A feasibility study. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(19). <https://doi.org/10.3390/app10196841>
- Best Practices in Electrical integration of the flexiforce™ sensor.* (n.d.).
- Best Practices in Mechanical integration of the flexiforce™ sensor.* (n.d.). www.tekscan.com/pucks
- Buis, A. W. P., & Convery, P. (1997). Calibration problems encountered while monitoring stump/socket interface pressures with force sensing resistors: Techniques adopted to minimise inaccuracies. *Prosthetics and Orthotics International*, *21*(3), 179–182. <https://doi.org/10.3109/03093649709164552>
- Fransson, M., & Henriksson, M. (2018). *Force-Sensing Rehabilitation Glove A tool to facilitate rehabilitation of reduced hand strength.*
- FSR 101 Force Sensing Resistor Theory and Applications.* (n.d.).
- Gentile, C., Cordella, F., Rodrigues, C. R., & Zollo, L. (2020). Touch-and-slippage detection algorithm for prosthetic hands. *Mechatronics*, *70*. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102402>
- Gupta, S., Loh, K. J., & Pedtke, A. (2020). Sensing and actuation technologies for smart socket prostheses. In *Biomedical Engineering Letters* (Vol. 10, Issue 1, pp. 103–118). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s13534-019-00137-5>
- Hall, R. S., Desmoulin, G. T., & Milner, T. E. (2008). A technique for conditioning and calibrating force-sensing resistors for repeatable and reliable measurement of compressive force. *Journal of Biomechanics*, *41*(16), 3492–3495. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.09.031>
- Hamilton, M., Behdian, K., & Andrysek, J. (2020). Evaluating the Effects of Load Area and Sensor Configuration on the Performance of Pressure Sensors at Simulated Body-Device Interfaces. *IEEE Sensors Journal*, *20*(10), 5187–5194. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2970964>
- Haque, M. R., Imtiaz, M. H., Kwak, S. T., Sazonov, E., Chang, Y. H., & Shen, X. (2021). A lightweight exoskeleton-based portable gait data collection system†. *Sensors (Switzerland)*, *21*(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s21030781>

- Hollinger, A., & Wanderley, M. M. (2006). *Evaluation of Commercial Force-Sensing Resistors*.
- Hua qiao da xue, & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). *Conference program : 2017 International Conference on Advanced Mechatronic Systems : December 6-9, 2017, Huaqiao University, Xiamen, China*.
- IEEE Staff, & IEEE Staff. (n.d.). *2010 IEEE Andescon*.
- Interlink Electronics FSR® Force Sensing Resistors® FSR® Integration Guide*. (n.d.).
www.interlinkelectronics.com
- Komi, E. R., Roberts, J. R., & Rothberg, S. J. (2007). Evaluation of thin, flexible sensors for time-resolved grip force measurement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 221(12), 1687–1699.
<https://doi.org/10.1243/09544062JMES700>
- Lebosse, C., Renaud, P., Bayle, B., & de Mathelin, M. (2011). Modeling and evaluation of low-cost force sensors. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(4), 815–822.
<https://doi.org/10.1109/TRO.2011.2119850>
- Likitlersuang, J., Leineweber, M. J., & Andrysek, J. (2017). Evaluating and improving the performance of thin film force sensors within body and device interfaces. *Medical Engineering and Physics*, 48, 206–211.
<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2017.06.017>
- Manoj, R., Nabeel, P. M., Kiran, R. v., Joseph, J., & Sivaprakasam, M. (2019, June 1). Cuffless Evaluation of Arterial Pressure Waveform using Flexible Force Sensor: A Proof of Principle. *Medical Measurements and Applications, MeMeA 2019 - Symposium Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/MeMeA.2019.8802205>
- Nandasiri, G. K., Shahidi, A. M., & Dias, T. (2020). Study of three interface pressure measurement systems used in the treatment of venous disease. *Sensors (Switzerland)*, 20(20), 1–13. <https://doi.org/10.3390/s20205777>
- Paredes-Madrid, L., Matute, A., Cruz-Pacheco, A. F., Parra-Vargas, C. A., & Gutiérrez-Velásquez, E. I. (2018). Experimental characterization, modeling and compensation of hysteresis in force sensing resistors. *DYNA (Colombia)*, 85(205), 191–198.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.66432>
- Paredes-Madrid, L., Matute, A., & Palacio, C. (2019). Understanding the effect of sourcing voltage and driving circuit in the repeatability of measurements in force sensing resistors (FSRs). *Measurement Science and Technology*, 30(11).
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab3307>
- Paredes-Madrid, L., Matute, A., & Pena, A. (2017). Framework for a Calibration-Less Operation of Force Sensing Resistors at Different Temperatures. *IEEE Sensors Journal*, 17(13), 4133–4142. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2706697>

- Parmar, S., Khodasevych, I., & Troynikov, O. (2017). Evaluation of flexible force sensors for pressure monitoring in treatment of chronic venous disorders. *Sensors (Switzerland)*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/s17081923>
- Pereira, S., Simoes, R., Fonseca, J., Carvalho, R., & Almeida, J. (2020). Design and development of an embedded sensors matrix for pressure mapping and monitoring applications. *Microprocessors and Microsystems*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103004>
- Saadeh, M. Y., Carambat, T. D., & Arrieta, A. M. (2017). *EVALUATING AND MODELING FORCE SENSING RESISTORS FOR LOW FORCE APPLICATIONS*. <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- Saadeh, M. Y., & Trabia, M. B. (2013). Identification of a force-sensing resistor for tactile applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(7), 813–827. <https://doi.org/10.1177/1045389X12463462>
- Schofield, J. S., Evans, K. R., Hebert, J. S., Marasco, P. D., & Carey, J. P. (2016). The effect of biomechanical variables on force sensitive resistor error: Implications for calibration and improved accuracy. *Journal of Biomechanics*, 49(5), 786–792. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.01.022>
- Schumacher, P., & Jouaneh, M. (2014). A force sensing tool for disassembly operations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(2), 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.09.016>
- Swanson, E. C., Weathersby, E. J., Cagle, J. C., & Sanders, J. E. (2019). Evaluation of Force Sensing Resistors for the Measurement of Interface Pressures in Lower Limb Prosthetics. *Journal of Biomechanical Engineering*, 141(10). <https://doi.org/10.1115/1.4043561>
- Ye, Q., & Sun, Y. N. (2017). Shear effect elimination on force measurement with flexible piezo-resistive sensor during hand manipulation. *Proceedings - International Conference on Signals and Systems, ICSigSys 2017*, 203–206. <https://doi.org/10.1109/ICSIGSYS.2017.7967041>

14.1. PÁGINAS WEB

(30 de agosto de 2021). <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a301>

(30 de agosto de 2021). <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a201>

(30 de agosto de 2021). <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a401?tab=specifications-performance>

(30 de agosto de 2021). <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a502>

(30 de agosto de 2021). www.interlinkelectronics.com/force-sensing-resistor

(30 de agosto de 2021). www.sensitronics.com

(30 de agosto de 2021). <https://www.sensitronics.com/products-1-inch-thru-mode-fsr.php>

(30 de agosto de 2021). <https://www.sensitronics.com/products-thru-mode-matrix-array.php>

(30 de agosto de 2021). <https://www.sensitronics.com/products-shunt-mode-matrix-array.php>

(30 de agosto de 2021). www.tacterion.com

(30 de agosto de 2021). <https://www.peratech.com/sp200-10/>

(30 de agosto de 2021). <https://butlertechnologies.com/shunt-mode-vs-thru-mode/>

(30 de agosto de 2021). <https://www.hbm.com/es/7318/como-funciona-un-transductor-de-fuerza-piezoelectrico/>

(30 de agosto de 2021). <https://www.ohmite.com/fsr-series/>

(30 de agosto de 2021). <https://sensorprod.com/shopping-cart/tactilus-free-form/round-sensors/>

(30 de agosto de 2021). <https://www.singletact.com/micro-force-sensors/standard-sensors/>

(30 de agosto de 2021). https://es.farnell.com/adafruit-industries/1361/accessory-type-conductive-sheet/dp/2419170?qclid=CjwKCAjwqOGCBhAIEiwA7FUXklXfMBO82Gho2oqNHBnqVOXoKiTRuV-HTRO7rEjtryGhVxTSEuU7RoC4uIQAvD_BwE&mckv=sUBsRDwsn_dc|pcrid|491327006346|plid||keyword||match||slid||product|2419170|pgrid|117798495964|ptaid|pla-338222698227&CMP=KNC-GEN-GEN-SHOPPING-SMEC-Whoops-High-Desktop-09-Dec-2020&gross_price=true

(30 de agosto de 2021). https://www.kitronyx.com/store/p30/%5BMS9723%5D_FSR_Matrix_Array_Sensor_%2816x10_Rows_and_Columns_%2F_80mm_x_50mm_Active_Sensing_Area%29.html

15. ANEXOS

15.1. PROGRAMA PYTHON PARA LA INTERPOLACIÓN

```
import numpy as np
```

```
T=np.array([30,30,30,60,60,60,300,300,300])
```

```
V=np.array([0.657660127,1.281308614,2.210197676,0.755667923,1.384036921,2.26804129  
9,0.766289868,1.480858056,2.394544231])
```

```
F=np.array([4.137903909,8.677756483,17.44231414,4.485478157,8.659492592,17.4713432  
3,4.038561216,8.473265278,16.20115636])
```

```
A = np.array([T*0+1, T, V,T**2,V**2,T*V]).T
```

```
B
```

```
coeff, r, rank, s = np.linalg.lstsq(A, B)
```

```
# -*- coding: utf-8 -*-
```

```
.....
```

```
Spyder Editor
```

```
This is a temporary script file.
```

```
.....
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from matplotlib import cm
```

```
from matplotlib.ticker import LinearLocator
```

```
import numpy as np
```

```
fig, ax = plt.subplots(subplot_kw={"projection": "3d"})
```

```
# Make data.
```

```
X = np.arange(0, 420, 0.1)
```

```
Y = np.arange(0, 1.5, 0.1)
```

```
X, Y = np.meshgrid(X, Y)
```

```
Z = (0.00000249015536*X**2+8.87830203*Y**2-0.00555369769*X*Y-0.000524627319*X-0.128647166*Y+0.205623751)
```

```
surf = ax.plot_surface(X, Y, Z, cmap=cm.coolwarm,  
                      linewidth=0, antialiased=False)  
ax.set_zlim(0, 25)  
ax.zaxis.set_major_locator(LinearLocator(10))  
ax.zaxis.set_major_formatter('{x:.02f}')  
ax.set_title("Superficie calibración FSR402 de Interlink")  
ax.set_xlabel("Tiempo(s)")  
ax.set_ylabel("Voltaje(V)")  
ax.set_zlabel("Fuerza(N)")  
  
plt.show()
```