

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

**“OPTIMIZACION Y PUESTA EN MARCHA DE UN INDENTOR PORTATIL
PARA MEDIR LA RIGIDEZ DE TEJIDOS BLANDOS DEL CUERPO HUMANO,
APLICADO AL BUSTO FEMENINO”**

**Memoria para optar al Título de:
INGENIERO CIVIL MECANICO**

ALUMNO: JESSICA CAROCA GONZALEZ
PROFESOR GUIA: IGNACIO DE ARTEAGA JORDA

2017

En colaboración con:

Sociedad Oxylane Research de Decathlon

Laboratoire de Mécaniques des Contacts et de Structures (LaMCoS) del INSA de Lyon

Institut national des sciences appliquées (INSA) de Lyon – Francia



Agradecimientos

Al terminar esta etapa de mi vida, quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que formaron parte de este importante proceso.

A mi familia, especialmente a mis padres José y Artemia, los pilares fundamentales de mi desarrollo, por haberme forjado como la persona que ahora soy, siempre motivándome a alcanzar mis metas, y que sin ustedes, la mayor parte de mis logros no hubiesen sido posibles.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, por haber confiado en mí y haber permitido que la realización de esta memoria fuera en colaboración con la Universidad INSA de Lyon, en Francia.

A todo el equipo de trabajo del laboratorio LaMCoS del INSA de Lyon, especialmente a los profesores Fabrice Morestin y Aline Bel-Brunon, por haber depositado en mí su confianza y apoyo durante todo el proyecto. A Philippe Chaudet, por su importante ayuda y consejos certeros en lo que concierne al sistema electrónico y la programación del Indentor.

A mis amigos, quienes siempre me han brindado su apoyo. Especialmente a Susan y Francisco, quienes fueron y siguen siendo un gran apoyo en mi vida, tanto en nuestra época de estudiantes como ahora en nuestra vida profesional y personal.

A Jacques, mi compañero de aventuras, por todo su apoyo y comprensión entregados durante este proceso, por su paciencia y motivación que me invitan a seguir persiguiendo mis sueños.

A todos ellos, gracias.

Merci à vous.

Resumen

Con la memoria presentada a continuación se propuso optimizar, mejorar y poner en marcha un Indentor portátil que permitirá evaluar la rigidez de tejidos blandos del cuerpo humano, aplicado específicamente al busto femenino, proyecto presentado por la Sociedad Oxlane Research de Decathlon y ejecutado por el Laboratoire de Mécaniques des Contacts et des Structures (LaMCoS), todo esto en el marco de desarrollo de sostenes deportivos utilizando la simulación numérica.

Para poder realizar este proyecto, resultó necesario conocer y consultar los informes precedentes realizados por estudiantes del INSA, quienes habían trabajado en las diferentes etapas iniciales del proyecto, especialmente el informe del estudiante Stefan Dold, quien realizó un primer diseño del Indentor, como también fue necesario estudiar los sistemas de programación de Arduino y LabView.

Para optimizar el funcionamiento de la herramienta creada, se decidió cambiar el antiguo sistema electrónico por uno que permitiera trabajar con Arduino y LabView, de manera que la recuperación y transferencia de datos para su posterior almacenamiento y análisis sea segura, eficaz, simple y rápida según las necesidades demandadas por el cliente.

La nueva programación del Indentor permitió rápidamente su puesta en marcha y en consecuencia un avance importante en el estudio de la rigidez del busto femenino, para continuar con el desarrollo de la simulación numérica de sostenes deportivos.

Résumé

Avec ce projet de fin d'études on a proposé la mise en point d'un Indenteur portatif qui permettra mesurer la raideur de tissus mous du corps humain, appliqué aux seins féminins, projet présenté pour la société Oxlane Research de Decathlon et pour le laboratoire de Mécaniques des Contacts et des Structures (LaMCoS) dans le cadre du développement des soutiens-gorge sportifs en utilisant la simulation numérique.

Pour pouvoir accomplir ce projet, il a été nécessaire d'étudier les projets de fin d'études précédents réalisés par des étudiants de l'INSA, car ils avaient travaillé dans les différentes étapes initiales du projet, spécialement le projet de l'étudiant Stefan Dold qui avait conçu un premier Indenteur. Il a été aussi nécessaire d'étudier les systèmes de programmation d'Arduino et LabView.

Pour optimiser le fonctionnement de l'outil créé, on a décidé de remplacer l'ancien système électronique pour un autre qui permettrait travailler avec Arduino et LabView, de sorte que la récupération et transmission des données pour son ultérieur stockage et exploitation soit fiable, efficace, simple et rapide selon les besoins demandés pour le client.

La nouvelle programmation de l'Indenteur a permis rapidement sa mise en place et par conséquent un important avancement dans l'étude de la raideur de la poitrine féminine, pour continuer avec le développement de la simulation numérique des soutiens-gorge.

Indice

Tabla de Ilustraciones	- 8 -
Introducción	- 10 -
Objetivos	- 11 -
Capítulo 1: Contexto del estudio	- 12 -
1.1 El Indentor precedente	- 12 -
1.2 El sistema electrónico	- 14 -
Capítulo 2: Componentes del sistema de medición	- 16 -
2.1 Sensores.....	- 16 -
2.1.1 Sensor de Fuerza.....	- 16 -
2.1.2 Sensor de Desplazamiento	- 17 -
2.1.3 Sensor de Contacto	- 17 -
2.2 Tarjeta Arduino Nano	- 18 -
2.3 La tarjeta electrónica.....	- 19 -
Capítulo 3: Programación del microcontrolador y de la IHM Recuperación, transmisión y análisis de datos	- 21 -
3.1 Recuperación de datos.....	- 21 -
3.1.1 Tensión de referencia.....	- 22 -
3.1.2 Sensor de fuerza.....	- 22 -
3.1.3 Sensor de desplazamiento	- 25 -
3.1.4 Sensor de contacto: Fotodiodo.....	- 26 -
3.2 Tarjeta electrónica.....	- 27 -
3.3 Programación de la tarjeta Arduino Nano utilizando LabView	- 29 -
3.4 Interfaz Arduino-LabView	- 30 -
3.5 Esquema de acciones del Indentor	- 32 -
Capítulo 4: Calibración de sensores y primeras pruebas	- 34 -
4.1 Calibración de los sensores	- 34 -
4.1.1 Sensor de fuerza.....	- 34 -
4.1.2 Sensor de desplazamiento	- 36 -
4.1.3 Sensor de contacto	- 37 -
4.2 Primera serie de pruebas con el Indentor	- 37 -

4.2.1	Protocolo	- 37 -
4.2.2	Primera campaña de pruebas	- 41 -
4.2.3	Segunda Campaña de pruebas	- 45 -
4.3	Problema de repetitividad	- 49 -
4.4	Problemas en las mediciones precedentes: soluciones.....	- 54 -
Capítulo 5: Nueva calibración y tercera campaña de mediciones		- 57 -
5.1	Calibración de los sensores	- 57 -
5.1.1	Sensor de fuerza.....	- 57 -
5.1.2	Sensor de desplazamiento.....	- 59 -
5.1.3	Sensor de contacto:	- 60 -
5.2	Tercera campaña de mediciones.	- 61 -
5.2.1	Resultados.....	- 63 -
Capítulo 6: Mejoras al Indentor		- 68 -
6.1	Re-diseño del limitador de fuerza y del apoyo del sensor de desplazamiento.....	- 68 -
6.2	Nueva campaña de mediciones	- 69 -
6.3	3. Resultados	- 70 -
Conclusión		- 76 -
Recomendaciones		- 77 -
Bibliografía		- 78 -
Programas Informáticos utilizados		- 78 -
Anexo 1: Control y Comunicación entre Arduino y LabView.....		- 79 -
Anexo 2: Planos adjuntos		- 81 -

Tabla de Ilustraciones

Fig. 1: Indentor precedente diseñado por el estudiante Stefan Dold	12 -
Fig. 2: Partes del mecanismo principal	14 -
Fig. 3: Microcontrolador utilizado anteriormente.....	15 -
Fig. 4: Tarjeta Arduino Nano.....	15 -
Fig. 5: Sensor de fuerza	17 -
Fig. 6: Sensor de desplazamiento	17 -
Fig. 7: Sensor de contacto.....	18 -
Fig. 8: Componentes de la tarjeta Arduino Nano	19 -
Fig. 9: Tarjeta electrónica	20 -
Fig. 10: Esquema de la recuperación, transmisión y análisis de datos	21 -
Fig. 11: Esquema del puente de Wheatstone	22 -
Fig. 12: Esquema adquisición de datos AOI.....	23 -
Fig. 13: Diagrama de conexión del AOI.....	24 -
Fig. 14: Esquema funcionamiento AOI	24 -
Fig. 15: Valores de ganancia requeridos.....	25 -
Fig. 16: Principio de un potenciómetro	26 -
Fig. 17: Principio de un fototransistor	26 -
Fig. 18: Componentes de la tarjeta electrónica.....	28 -
Fig. 19: Sketch LIFA_Base	29 -
Fig. 20: Panel frontal de ejecución del Indentor	30 -
Fig. 21: Plataforma de programación en LabView.....	31 -
Fig. 22: Esquema descriptivo de las acciones del Indentor	33 -
Fig. 23: Posición del sensor de fuerza para la calibración.....	34 -
Fig. 24: Curva de calibración del sensor de fuerza.....	35 -
Fig. 25: Posición del sensor de desplazamiento para la calibración.....	36 -
Fig. 26: Curva calibración del sensor de desplazamiento.....	36 -
Fig. 27: Asignación de colores referenciales de las personas.....	39 -
Fig. 28: Posición Indentor medición lateral.....	40 -
Fig. 29: Posición Indentor medición por debajo.....	40 -
Fig. 30: Curva fuerza/desplazamiento, seno derecho, medición lateral (serie C1, persona A) ..	41 -
Fig. 31: Gráfico de comparación de las mediciones laterales.....	42 -
Fig. 32: Gráfico comparación medición seno por debajo, primera campaña C1.....	44 -
Fig. 33: Indentor con el nivel de burbuja.....	45 -
Fig. 34: Curva fuerza/desplazamiento para el seno derecho medición lateral.....	46 -
Fig. 35: Gráfico de comparación medición lateral, campaña	47 -
Fig. 36: Gráfico de comparación medición por debajo del seno, campaña 2	48 -

Fig. 37: Curvas desviación estándar (mediciones al vacío en seno derecho parte lateral, campañas 1 y 2)	- 49 -
Fig. 38: Mediciones al vacío con el gatillo bien presionado	- 50 -
Fig. 39: Mediciones al vacío con el gatillo levemente presionado	- 51 -
Fig. 40: Mediciones al vacío sin el embudo, gatillo bien presionado.....	- 52 -
Fig. 41: Posición del Indentor para registrar los valores de fuerza sin sollicitación	- 53 -
Fig. 42: Gráfico valores de fuerza sin sollicitación (amplitud de variación: 70).....	- 53 -
Fig. 43: Posición del Indentor en segundo ensayo.....	- 54 -
Fig. 44: Gráfico valores de fuerza segunda prueba (amplitud de variación: 70).....	- 54 -
Fig. 45: Medición de la variación del esfuerzo para una conversión sobre 10 bits (amplitud de variación: 5)	- 56 -
Fig. 46: Curva calibración sensor de fuerza, resolución 10 bits	- 58 -
Fig. 47: Curva calibración sensor de desplazamiento.....	- 60 -
Fig. 48: Curvas de mediciones al vacío con y sin el embudo	- 62 -
Fig. 49: Curva fuerza/desplazamiento seno derecho medición lateral, campaña 3	- 64 -
Fig. 50: Gráfico comparación medición lateral del seno entre ambas personas, campaña 3. -	65 -
-	
Fig. 51: Gráfico de comparación medición por debajo del seno, campaña 3	- 66 -
Fig. 52: Diseño de la nueva pieza	- 68 -
Fig. 53: Posición Indentor fijo y máquina de tracción utilizada.....	- 70 -
Fig. 54: Gráfico fuerza/desplazamiento senos persona A, campaña 4	- 71 -
Fig. 55: Gráfico seno derecho medido por debajo, persona A	- 72 -
Fig. 56: Gráfico comparación seno derecho medido por debajo, personas A y C.....	- 73 -
Fig. 57: Gráfico comparación seno izquierdo medido lateralmente, personas A y C	- 74 -

Introducción

La sociedad Oxylane Research busca mejorar el desarrollo de los sostenes deportivos utilizando la simulación numérica. Esta herramienta informática permite conocer mejor la acción del sostén sobre el busto femenino y evaluar los parámetros a mejorar para aumentar su comodidad y respaldo.

En el marco de una cooperación con el laboratorio LaMCoS del Institut National des Sciences Appliquées de Lyon en Francia (INSA de Lyon), un modelo numérico del busto femenino y de sostén deportivo es desarrollado, con el fin de evaluar la factibilidad de una simulación de la práctica deportiva utilizando un sostén deportivo. El modelo desarrollado requiere datos sobre los materiales constituyentes del busto femenino, más concretamente los senos.

El busto femenino es una estructura difícil de estudiar ya que está constituido de diferentes tejidos, con propiedades no lineales. Así, también es difícil definir las leyes de su comportamiento mecánico. En el modelo desarrollado por Oxylane y LaMCoS, hay dos cuerpos distintos: la piel y el interior del seno. Para determinar la rigidez homogénea del interior del seno, el método elegido fue la indentación.

Como ningún busto es idéntico a otro, fue necesario crear una herramienta práctica que permitiese efectuar de manera fácil y rápida varias mediciones sobre los senos y obtener datos de fuerza y desplazamiento que permitirían definir la rigidez de los tejidos. Un Indentor¹ portátil fue diseñado y fabricado con este fin en un proyecto de fin de estudios precedente. Sin embargo, esta herramienta no ha podido ser utilizada debido a problemas en la programación para la recuperación de datos. Los datos recuperados por el Indentor no se transmitían correctamente al computador para su posterior análisis, además de alejarse de la realidad debido a problemas con la calibración de los sensores y algunas concepciones mecánicas de la parte móvil de la herramienta. Frente a esta problemática, Oxylane y LaMCoS solicitaron realizar un análisis y sustitución del sistema electrónico del Indentor, y realizar una nueva

¹ El instrumento diseñado recibió el nombre de “Indentor” gracias a la técnica escogida para realizar las mediciones, en este caso la indentación (también conocida como penetración).

programación de la herramienta con el fin de dejarla operativa para su posterior uso en el marco de la investigación que ambas entidades mantienen.

Objetivos

El objetivo de este proyecto es de mejorar el sistema de adquisición y transmisión de datos del Indentor, de manera que sea posible utilizarlo en el corto plazo, siendo una herramienta más fácil y más confiable para los usuarios.

Las diferentes etapas a desarrollar para mejorar el funcionamiento del Indentor son las siguientes:

- Programación del microcontrolador y de la interfaz Hombre/Máquina (IHM)
- Calibración de los sensores de fuerza y desplazamiento
- Campañas de mediciones y análisis de los datos obtenidos

Capítulo 1: Contexto del estudio

1.1 El Indentor precedente

Para caracterizar el comportamiento del busto femenino, en el ámbito de desarrollo de sostenes deportivos de la sociedad “Oxylane Research” en cooperación con el Laboratorio de Mecánica de Contacto y de Estructuras (LaMCoS) de INSA de Lyon (Francia), es necesario realizar múltiples mediciones, por lo que se necesita una herramienta de medición que sea simple y fácil de utilizar siendo precisa en todo momento.

Un primer Indentor portátil (Fig. 1) fue diseñado por el estudiante alemán Stefan Dold (año 2012-2013). Su diseño permitió disponer de una herramienta muy completa que atiende las necesidades del cliente, realizando mediciones de manera fácil y concreta, teniendo la posibilidad de registrar los datos con una frecuencia de muestreo constante y de manera rápida.



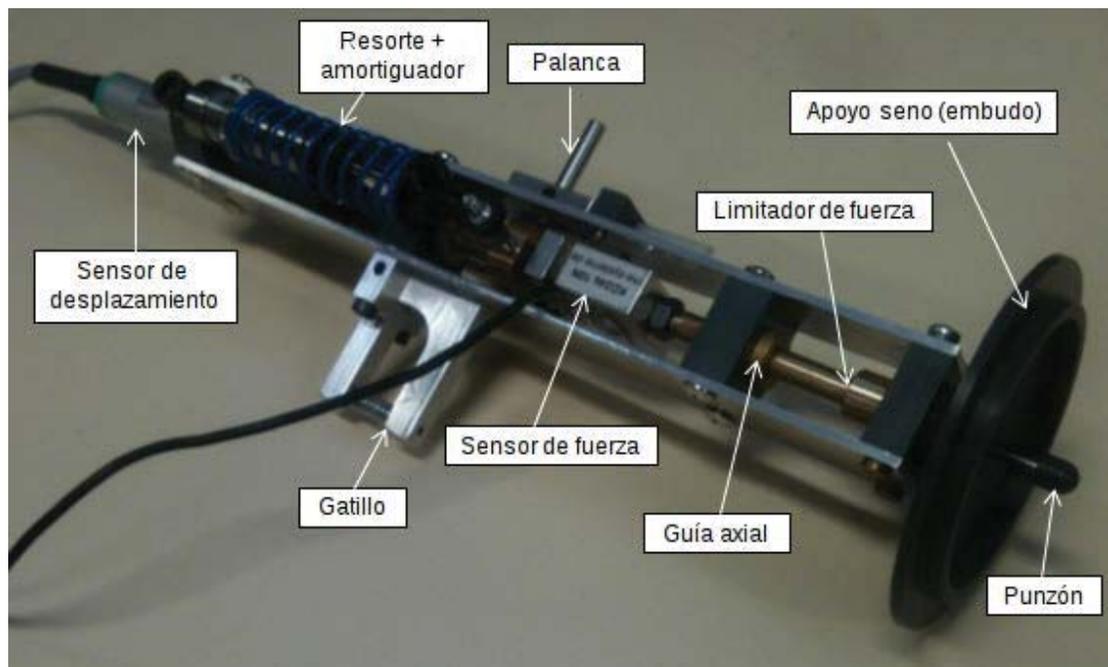
Fig. 1: Indentor precedente diseñado por el estudiante Stefan Dold

(Fotografía propia, octubre 2013)

La medición es realizada por el método de la indentación y permite conocer la rigidez de un material comprimiéndolo localmente. En el curso de esta compresión o penetración, se recupera la fuerza resultante en función del desplazamiento del punzón que se apoya sobre el material a estudiar (en este caso, la materia blanda del seno).

Las partes del mecanismo principal del Indentor se muestran en la figura 2. El funcionamiento del Indentor portátil para efectuar una medición es el siguiente:

- En primer lugar, el mecanismo debe estar armado. Esto se obtiene tirando la pequeña palanca hacia atrás y el conjunto resorte-amortiguador es puesto bajo compresión, la parte móvil del mecanismo se engancha, dejando al Indentor listo para medir.
- Una vez que el mecanismo está armado, se coloca el embudo del Indentor sobre el seno y se verifica que exista un buen contacto entre ellos. Para saber si el contacto es correcto, se dispone de un fotodiodo que mide la luminosidad al interior del embudo. El contacto es considerado bueno cuando el valor de la luminosidad medida por el fotodiodo es inferior a un cierto valor límite, lo que corresponde al cierre completo del embudo por el seno. El control del contacto es necesario para asegurar la reproducibilidad de las pruebas.
- La medición es realizada presionando sobre el gatillo. La energía almacenada en el resorte es utilizada para hacer avanzar la parte móvil del mecanismo y así impulsar el punzón contra el seno.
- Los datos proporcionados por los sensores de desplazamiento, de fuerza y de contacto son recuperados por un microcontrolador bajo la forma de tensión y son enviados hacia el computador para su análisis posterior.



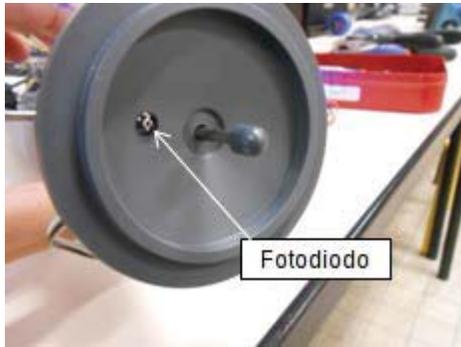


Fig. 2: Partes del mecanismo principal

(Creación propia, octubre 2013)

1.2 El sistema electrónico

En el Indentor, el sistema electrónico tiene por objetivo recuperar los valores medidos, amplificarlos, y enseguida transmitirlos a un computador para su posterior análisis. Además, el sistema contiene una parte de señalización que informa al usuario sobre el estado actual de la herramienta. El sistema electrónico se compone de tres sensores (fuerza, desplazamiento y contacto), tres LED (para la señalización), un sistema microcontrolador y una tarjeta electrónica.

Para la recuperación de las informaciones proporcionadas por los diferentes sensores, el Indentor utilizaba un sistema en base a un microcontrolador tipo MSP430 de Texas Instruments (Fig. 3). Este sistema contenía dos tarjetas sobre la base del microcontrolador MSP430 integrando módulos de transmisión WIFI. El conjunto también incluía una interfaz USB que servía para la comunicación con el computador, asimismo que un compartimiento para pilas para la alimentación de una de las tarjetas (dos pilas AAA).

Cada una de las tarjetas del microcontrolador podía programarse independientemente conectándolas a la interfaz USB con el programa informático IAR Workbench proporcionado por IAR Systems.

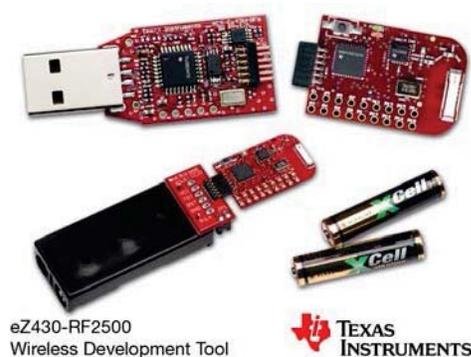


Fig. 3: Microcontrolador utilizado anteriormente

(Dold, Stefan. Imagen tomada de su proyecto, 2012-2013)

Algunos de los problemas que se presentaron en este sistema fue la complejidad de la programación del microcontrolador, así como la vida útil de las pilas: éstas cesaban de funcionar para una cierta cantidad de mediciones provocando una interrupción del proceso de muestreo. Para evitar este problema de alimentación, de conexión y de transmisión de datos hacia el computador, se tomó la decisión de reemplazar este sistema microcontrolador por un microcontrolador Arduino Nano. Las dimensiones de este microcontrolador permiten su instalación en el actual Indentor sin efectuar grandes modificaciones a la armazón base. El microcontrolador escogido fue un Arduino Nano basado sobre la tarjeta ATmega328 (Fig. 4).

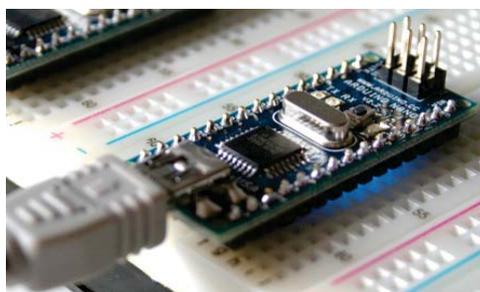


Fig. 4: Tarjeta Arduino Nano

(<https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoNano>, junio 2016)

En esta tarjeta, la transmisión de datos desde y hacia el computador, así como la alimentación del microcontrolador, se hacen por medio de un cable USB Mini-B en lugar de un cable estándar. Este cable será suficientemente largo de modo que no habrá inconvenientes al momento de efectuar las mediciones.

Capítulo 2: Componentes del sistema de medición

Como ha sido mencionado anteriormente, el sistema electrónico del Indentor tiene por objetivo recuperar los datos medidos, amplificarlos y luego transmitirlos a un computador para su posterior lectura y análisis.

El sistema electrónico consta de tres sensores (fuerza, desplazamiento y contacto), de una tarjeta de acondicionamiento de señales de las mediciones a la salida de los sensores y de un sistema microcontrolador (Arduino Nano) para gestionar la digitalización de esas mediciones y su transmisión a la IHM (Interfaz Hombre/Máquina). En un computador, el operador puede recuperar en directo las informaciones sobre el funcionamiento del Indentor y los datos de las pruebas que se están desarrollando. Por otro lado, la señalización que informa al usuario sobre el estado de la herramienta es visible sobre la interfaz de LabView. A continuación, se detallan los diferentes componentes del sistema de medición.

2.1 Sensores

Los sensores son los elementos más importantes del Indentor. Los datos que ellos proporcionan son detectados por el microcontrolador. Se utilizarán tres sensores: sensor de fuerza, sensor de desplazamiento y sensor de contacto.

2.1.1 Sensor de Fuerza

El anterior sensor de fuerza tenía un dominio de operación de 2N. En razón de su alta sensibilidad y la posibilidad de sobrepasar una fuerza de 2N, y para permitir que sea posible medir la rigidez sobre otros tejidos, se decidió reemplazar este sensor por un sensor de dominio de operación de 10N (Fig. 5).



Proveedor	ME-SYSTEME
Modelo	KD24s
Tipo	Doble barra en flexión + puente de Wheatstone
Dominio operacional	10 N
Esfuerzo máximo	40 N
Peso	25 g

Fig. 5: Sensor de fuerza

(Ficha técnica KraftSensor KD24s de ME-SYSTEME, 2013)

2.1.2 Sensor de Desplazamiento

En el trabajo anterior, se escogió un potenciómetro lineal (Fig. 6) para medir el desplazamiento. Este tipo de sensor es simple de trabajar ya que no requiere ninguna amplificación de su tensión de salida (se basa en un circuito divisor de tensión).



Proveedor	WAYCON
Modelo	LZW1-S
Tipo	Potenciómetro lineal
Dominio operacional	0 a 25 mm
Fuerza de roce	< 0,5 N
Peso	30 g

Fig. 6: Sensor de desplazamiento

(Ficha técnica Linear potentiometer de WAYCON, 2013)

2.1.3 Sensor de Contacto

Para garantizar el buen contacto del Indentor con el seno, en el trabajo anterior se escogió un fotodiodo (Fig. 7) para cumplir esta tarea. Un fotodiodo convierte la luz en electricidad, y esta variación de electricidad es la que se utiliza para informar si hubo un cambio en el nivel de iluminación del mismo, lo que se traduce en un buen contacto o no del embudo con el seno. El fotodiodo escogido es adaptado al espectro del ojo humano.



Proveedor	OSRAM
Modelo	SFH203P/T13/4
Tipo	Fotodiodo
Dominio operacional	0,1 a 1000 lux
Peso	2 g

Fig. 7: Sensor de contacto

(Ficha técnica Photodiode SFH 203P de OSRAM, 2013)

2.2 Tarjeta Arduino Nano

Como ya ha sido mencionado anteriormente, la tecnología de la tarjeta Arduino Nano la cual integra un sistema microcontrolador, es el sistema elegido para la recuperación de datos. El Arduino Nano (Fig. 8) es una pequeña pero poderosa tarjeta basada en el microcontrolador ATmega328 (Arduino Nano 3.0). El microcontrolador gestiona los elementos periféricos para establecer la comunicación con el exterior por medio de señales digitales y analógicas.

La transmisión de datos desde y hacia el computador, así como la alimentación del microcontrolador, se hace por medio de un cable USB Mini-B. El Arduino Nano posee 6 entradas analógicas, cada una de ellas tiene 10 bits de resolución (1024 valores diferentes) para la conversión analógica/digital. El sistema hace una conversión cada 100 microsegundos.

Por defecto, el microcontrolador recupera una señal entre 0 y 5 volts. No obstante, es completamente posible cambiar el rango superior utilizando la función *analogReference()* en la programación. Este microcontrolador integrado en el Indentor administra la adquisición de datos analógicos y las señales de comunicación con el usuario, las cuales son derivadas al computador en el cual serán recuperadas las mediciones.

A continuación se especifican las características de la tarjeta Arduino:

- Microcontrolador ATmega328 (con iniciador (bootloader) pre-programado)
- Tensión de entrada (recomendado): +7 a +12 V
- Tensión de entrada (límite): +6 a +20 V

- 14 Pines GPIO (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
- 6 Pines de entrada analógica
- Corriente continua por el Pin de E/S: 40mA
- Memoria Flash 32Ko (de los cuales 2 Ko son utilizados por el iniciador)
- Velocidad de procesamiento: 16MHz
- Dimensiones: 0.73'' x 1.70''

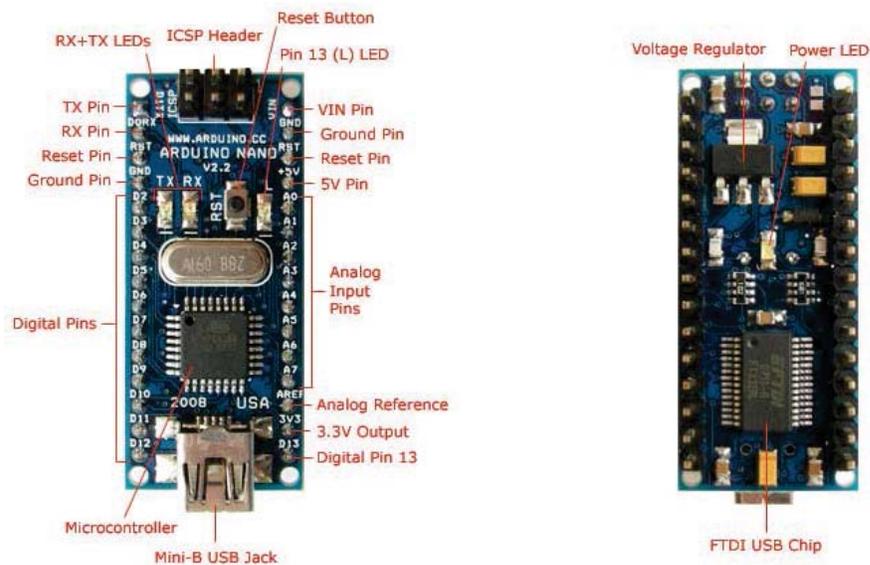


Fig. 8: Componentes de la tarjeta Arduino Nano

(Ficha técnica Arduino Nano e imagen de <http://www.ec21.com/product-details/ATMEGA328-Arduino-Nano-3.0--6978113>, 2013)

2.3 La tarjeta electrónica

En la tarjeta electrónica (Fig. 9) se encuentran todos los componentes electrónicos necesarios para el buen funcionamiento del Indentor. La tarjeta electrónica permite conectar el microcontrolador con los sensores y los LEDs para la obtención de datos, y luego enviarlos hacia el computador.

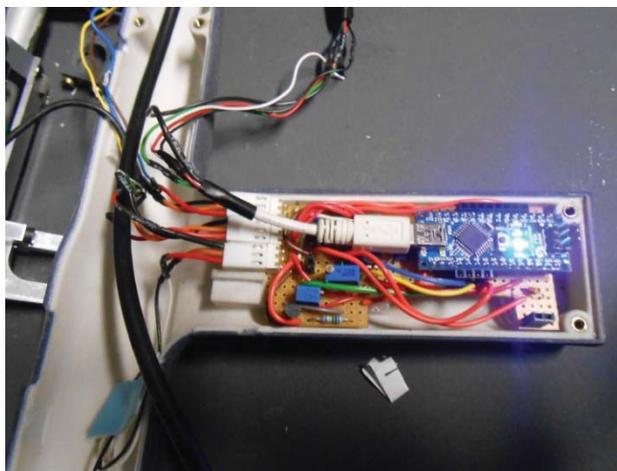


Fig. 9: Tarjeta electrónica

(Fotografía propia tarjeta electrónica del Indentor, octubre 2013)

Capítulo 3: Programación del microcontrolador y de la IHM

Recuperación, transmisión y análisis de datos

3.1 Recuperación de datos

Al interior del Indentor se encuentra el dispositivo mecánico (sensores) y la tarjeta electrónica para la amplificación/digitalización de las señales medidas. El Indentor está conectado a un computador para el almacenamiento de estos datos y el intercambio de “instrucciones” de funcionamiento con el programa informático LabView, el cual presenta una interfaz de comunicación con el usuario. Los datos proporcionados por los sensores son enviados al computador por medio de un cable USB.

El siguiente esquema (Fig.10) muestra las etapas principales para la recuperación, transmisión y análisis de datos.

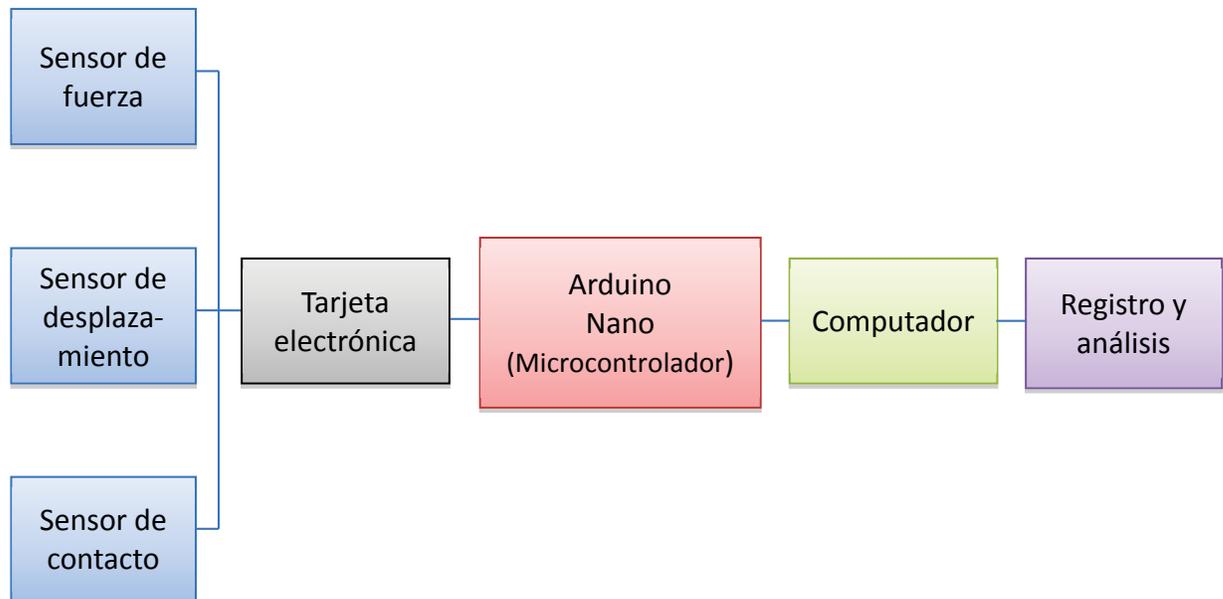


Fig. 10: Esquema de la recuperación, transmisión y análisis de datos

(Creación propia, octubre 2013)

3.1.1 Tensión de referencia

Los datos proporcionados por los sensores y adaptados por la tarjeta electrónica llegan al microcontrolador en forma de tensión analógica. En este caso, la tensión de referencia fue medida con la ayuda de un voltímetro y se encontró un valor de tensión de alimentación igual a 3,388 V (correspondiente a una de las dos salidas de tensión de alimentación de la tarjeta Arduino Nano). Esta tarjeta posee convertidores analógicos/digitales (CAN) con una resolución de 10 bits (1024 valores diferentes). Entonces, para conocer la resolución máxima de la adquisición de datos se hace la siguiente ecuación:

$$V_{res} = \frac{3,388V}{1024} = 3,3 \text{ mV}$$

Es decir, cada valor numérico medido corresponde a un valor de tensión de alrededor de 0,0033 Volts.

Con el fin de obtener una resolución máxima en la adquisición de datos, es necesario adaptar la tensión de salida de los sensores.

3.1.2 Sensor de fuerza

El sensor de fuerza está provisto de un puente de Wheatstone (Fig. 11) en donde las cuatro resistencias son galgas extensiométricas (puente completo). Cada una de las resistencias soporta la misma variación bajo una deformación determinada.

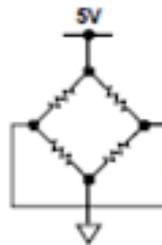


Fig. 11: Esquema del puente de Wheatstone

(Imagen extraída de la figura 53, página 19, ficha técnica AD623 de Analog)

En la parte de adquisición de datos, sobre el sensor de fuerza se tiene una entrada (tensión) de alimentación de aproximadamente 5 Volts recuperada del Arduino Nano, y una señal de salida de medición comprendida entre 0 Volts (equivalente a 0 N) y 2,5 milivolts (equivalente a 10 N).

En las características del sensor de fuerza proporcionados por el proveedor, se destaca que la tensión de salida del sensor es de alrededor de 0,5 milivolts. Por lo tanto, la tensión de salida es:

$$V_{sal} = \frac{0,5mV}{V} * 5V = 2,5 mV$$

Como el valor es igual al valor límite de salida de 2,5 mV, y para que la tensión que entra al microcontrolador utilice la más amplia gama posible de valores de tensión disponibles, se decidió utilizar un amplificador operacional de instrumentación (AOI) (Fig. 12).

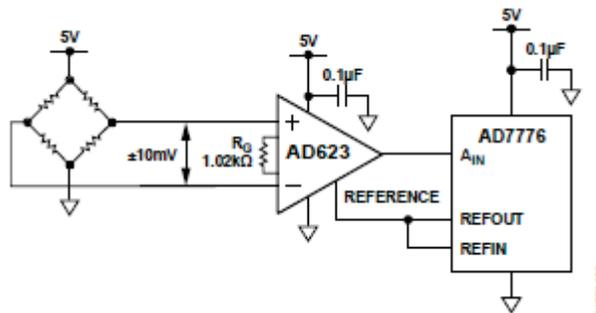


Fig. 12: Esquema adquisición de datos AOI

(Ficha técnica AD623 de Analog, página 19, figura 53)

El amplificador escogido es del tipo AD623 (Fig. 13). Es un amplificador de alta precisión y ofrece linealidad, estabilidad de temperatura y fiabilidad superiores en un mínimo de espacio. En la figura 13 se muestra el diagrama de conexión del amplificador.

CONNECTION DIAGRAM

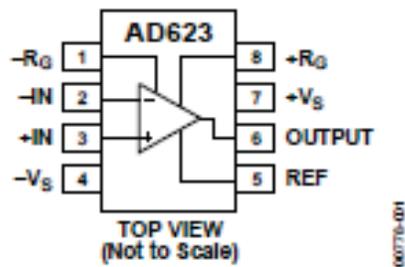


Fig. 13: Diagrama de conexión del AOI

(Ficha técnica AD623 de Analog, página 1, figura 1)

Se utiliza un potenciómetro para desplazar la tensión de referencia del AOI x1000. El AOI es alimentado por la tensión de 5V del Arduino. Entonces, haciendo variar la resistencia del potenciómetro se hace variar la tensión correspondiente a 0N.

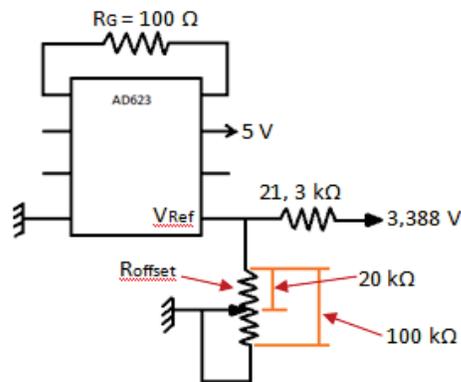


Fig. 14: Esquema funcionamiento AOI

(Creación propia, noviembre 2013)

Para obtener una mayor precisión en la adquisición de datos se dispuso de dos amplificadores (Fig. 14):

- El primer amplificador, para una gama de mediciones entre -1N y 10N, aplica una ganancia de 1000 con una resistencia de precisión para ajustar/regular la ganancia de 100 Ω.

- El segundo amplificador: para una gama de mediciones entre -1N y 5N aplica una ganancia de 2 con una resistencia de precisión para ajustar/regular la ganancia de 100 k Ω . Este último amplificador se ha instalado para compensar el efecto del ruido que podría perturbar la precisión de los datos adquiridos.
- Se utiliza la salida V_{ref} para definir la tensión de salida a 0N. Esto permite trabajar con ambas gamas de medición.

La figura a continuación, muestra una tabla con los valores requeridos de las resistencias de ganancia:

Desired Gain	1% Standard Table Value of R_G (Ω)	Calculated Gain Using 1% Resistors
2	100 k	2
5	24.9 k	5.02
10	11 k	10.09
20	5.23 k	20.12
33	3.09 k	33.36
40	2.55 k	40.21
50	2.05 k	49.78
65	1.58 k	64.29
100	1.02 k	99.04
200	499	201.4
500	200	501
1000	100	1001

Fig. 15: Valores de ganancia requeridos

(Ficha técnica AD623 de Analog, página 16, tabla 5)

Se tiene entonces que para el primer amplificador cuya gama (G_1) es de -1N a 10N la ganancia deseada es de 1000, y para el segundo amplificador cuya gama (G_2) es de -1N a 5N la ganancia deseada es de 2.

3.1.3 Sensor de desplazamiento

Este sensor es un potenciómetro del tipo lineal.

- Un potenciómetro es un componente electrónico en el cual el valor de la resistencia es variable, permitiendo controlar la intensidad de corriente a lo largo de un circuito.

- Un potenciómetro está compuesto de una resistencia de valor total constante a lo largo de la cual se desplaza un cursor, el cual es un contacto móvil y divide la resistencia total en dos resistencias de valor variable.

Su funcionamiento está basado en un circuito divisor de tensión (Fig. 16): para una tensión de entrada de 3,388V la tensión medida varía entre 0V y 3,388V, entonces el valor es proporcional al desplazamiento del eje del potenciómetro.

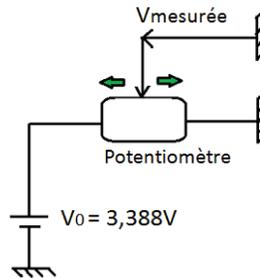


Fig. 16: Principio de un potenciómetro

(Creación propia, noviembre 2013)

3.1.4 Sensor de contacto: Fotodiodo

El sensor de contacto permite asegurar un buen contacto entre el Indentor y el seno. Para recuperar la señal que emite el fotodiodo, se utiliza un amplificador y un transistor. El transistor es de tipo BC337, emite una tensión de salida de 5V que llega a la tarjeta Arduino (Fig. 17).

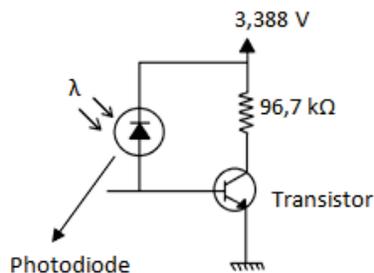


Fig. 17: Principio de un fototransistor

(Documento Dispositifs optoelectroniques, Joël Redoutey)

3.2 Tarjeta electrónica.

La tarjeta electrónica es una tarjeta de acondicionamiento de señales de las mediciones en la salida de estos sensores. Esta tarjeta permite la amplificación de las tensiones analógicas proporcionadas por los sensores, la alimentación de éstos y permite tener una interfaz entre los diferentes componentes y el microcontrolador (tarjeta Arduino Nano).

A continuación se especifican los diferentes componentes de la tarjeta electrónica (los números y componentes descritos aquí abajo corresponden a los números de la figura 18. Ejemplo: el componente “conexión sensor de fuerza” corresponde al elemento indicado con el número 2 en la Fig. 18):

1	Conexión sensor de contacto
2	Conexión sensor de fuerza
3	Conexión sensor de desplazamiento
4	Transistor
5	Potenciómetro 100 k Ω (resistencia útil: 96,7 k Ω)
6	Resistencia 20 k Ω
7	Potenciómetro 100 k Ω (resistencia útil: 96,7 k Ω)
8	Amplificador AD623 (gama G1)
9	Amplificador AD623 (gama G2)
10	Resistencia de precisión 100 Ω
11	Resistencia de precisión 100 k Ω
12	Tarjeta Arduino Nano
13	Entrada señal fotodiodo (A0)
14	Entrada señal desplazamiento (A1)
15	Entrada señal fuerza gama G1
16	Entrada señal de fuerza gama G2

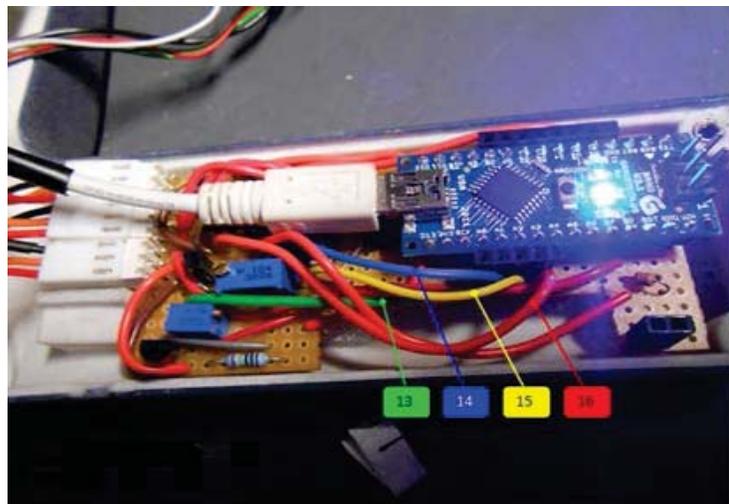
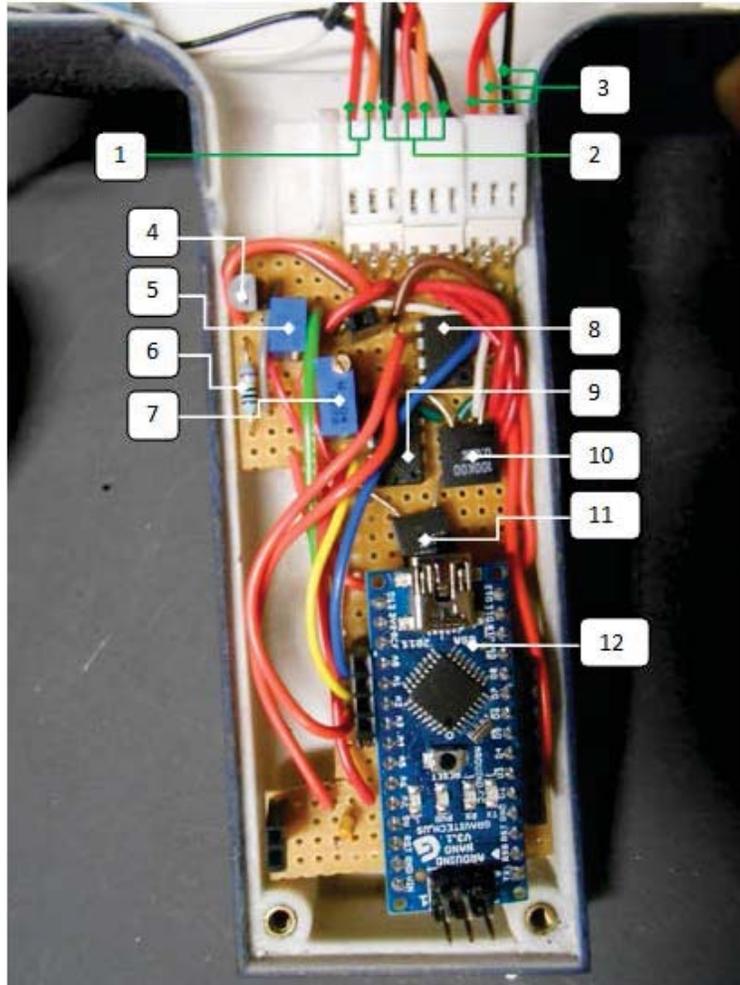


Fig. 18: Componentes de la tarjeta electrónica

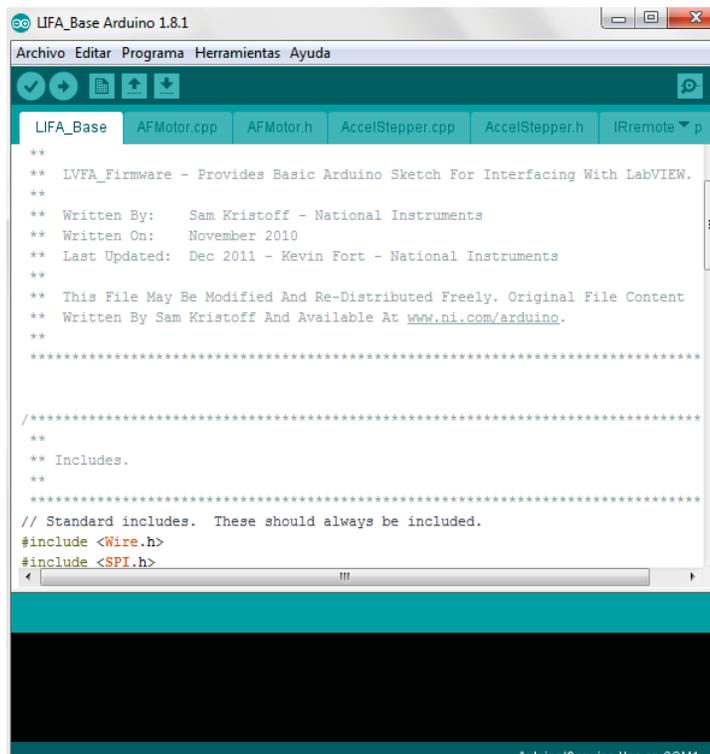
(Creación propia, noviembre 2013)

3.3 Programación de la tarjeta Arduino Nano utilizando LabView

La programación que se necesita realizar sobre el Indentor para efectuar las mediciones se hace directamente sobre el microcontrolador Arduino. Existe pues, una interfaz de LabView para Arduino (LabView Interface for Arduino) que permite adquirir datos del microcontrolador y procesarlos en el entorno de programación gráfica de LabView.

Para poder establecer la comunicación entre Arduino y LabView, es necesario instalar el toolkit Arduino para LabView que National Instruments (NI) ha creado con este fin. Este toolkit contiene los complementos LIFA_Base, NI Visa y Vi Package Manager necesarios para poder establecer la comunicación entre el computador y el Indentor.

Así, una vez instalados todos los programas y complementos necesarios para poder manipular Arduino desde LabView, se procede a realizar la programación de las instrucciones que el Indentor debe seguir. La figura 19 muestra el programa LIFA-Base (contenido también el toolkit) que se debe cargar en la tarjeta Arduino para poder manipularla desde LabView.



```
**
** LVFA_Firmware - Provides Basic Arduino Sketch For Interfacing With LabVIEW.
**
** Written By: Sam Kristoff - National Instruments
** Written On: November 2010
** Last Updated: Dec 2011 - Kevin Fort - National Instruments
**
** This File May Be Modified And Re-Distributed Freely. Original File Content
** Written By Sam Kristoff And Available At www.ni.com/arduino.
**
** *****
//*****
**
** Includes.
**
** *****
// Standard includes. These should always be included.
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
*****
```

Fig. 19: Sketch LIFA_Base

(Programa Arduino, noviembre 2013)

3.4 Interfaz Arduino-LabView

La interfaz de LabView para Arduino es una herramienta gratuita proporcionada por NI (National Instruments) que permite adquirir los datos del microcontrolador Arduino y tratarlos en la plataforma de programación gráfica de LabView. LabView es una herramienta gráfica de programación, eso significa que los programas no son escritos sino que son diseñados, lo que facilita su comprensión.

LabView proporciona las herramientas necesarias para controlar el Arduino desde el monitor de un computador con una interfaz gráfica que se ha creado, de manera que el registro de las mediciones, la transmisión y el análisis de datos sean efectuados de manera automática. Por consecuencia, es posible manipular el sistema de medición del Indentor desde el PC.

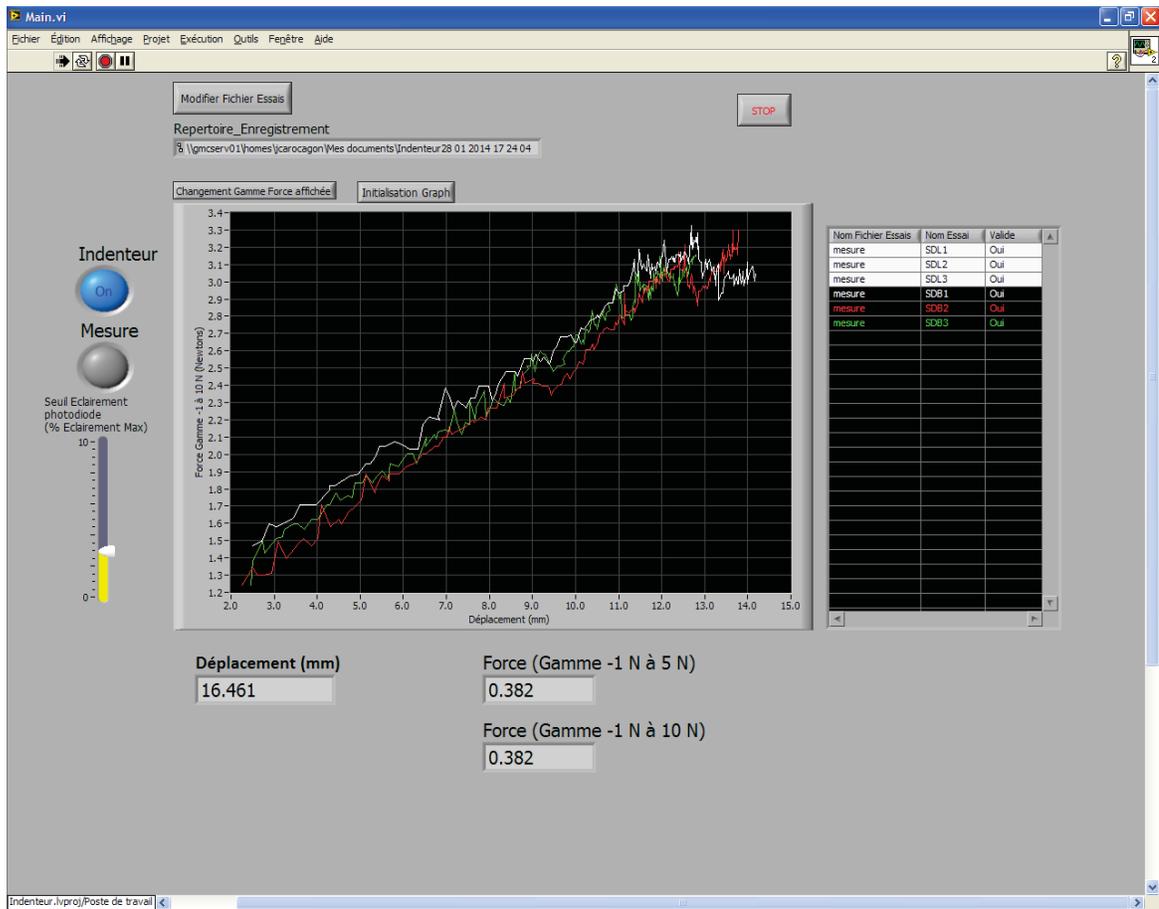


Fig. 20: Panel frontal de ejecución del Indentor

(Panel de ejecución creado en LabView, noviembre 2013)

En la figura 20, se puede apreciar la interfaz final creada en LabView. Sobre el panel frontal se puede ver:

- Un gráfico con las curvas obtenidas en cada medición
- Dos LEDs que informan al usuario el estado actual de la herramienta: LED Indentor, de color azul, en ON quiere decir que el Indentor está bien conectado al PC. El otro LED informa si el Indentor tiene buen contacto con el seno (el área del embudo está totalmente en contacto con el seno). Si el contacto es correcto, el LED se ilumina de color verde, y si el contacto no es completo o se pierde en algún momento el LED parpadea de color rojo.
- El umbral de iluminación del fotodiodo
- Los valores medidos de desplazamiento y fuerza
- Una tabla que contiene el nombre del archivo de prueba, el número de la medición y si la medición es válida o no.
- Varios botones: “Modifier fichier Essais” (Modificar archivo Pruebas) para registrar un nuevo archivo de prueba; “Initialisation Graph” (Inicialización Gráfico) para limpiar el gráfico y visualizar nuevas curvas; “Changement Gamme Force Affiché” (Cambio Gama de fuerza indicada) para cambiar la escala de medición según la gama de fuerza elegida; “Stop” para detener el programa una vez terminada la sesión de medición.

La siguiente figura 21 muestra la plataforma de programación utilizada sobre L

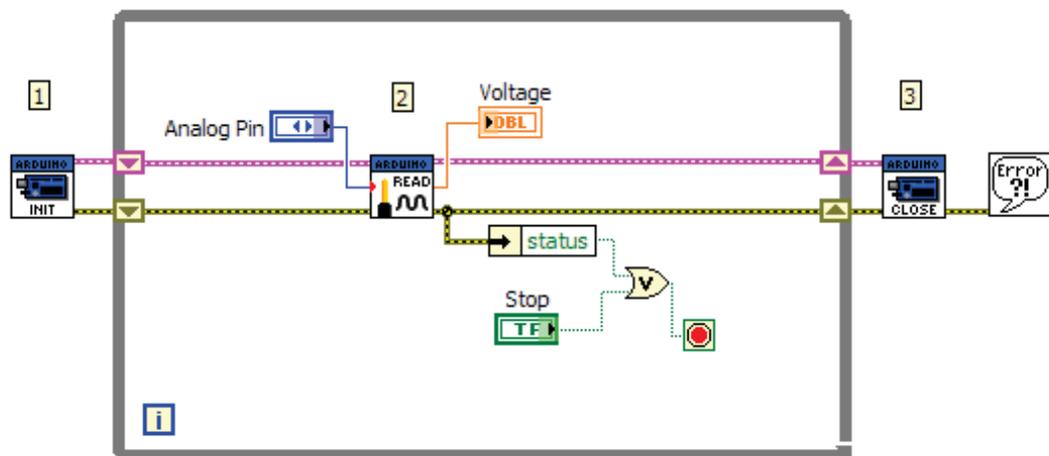


Fig. 21: Plataforma de programación en LabView

(Ejemplo de programación gráfica sobre LabView, Noviembre 2013)

En el ejemplo de la Fig. 21 se pueden apreciar tres etapas indicadas como 1, 2 y 3:

1. Inicia la conexión con el Arduino
2. Lee el pin de entrada analógica especificado
3. Cierra la conexión con Arduino (y trata los errores)

Finalmente, LabView permite el registro de datos como tiempo, desplazamiento, fuerza y luminosidad del fotodiodo para un posterior análisis. Los datos son organizados de la siguiente manera:

- Para cada archivo de prueba se crea un archivo TDMS que contendrá todas las mediciones realizadas. Este archivo contiene todos los datos brutos necesarios para efectuar un análisis en profundidad y detallado.
- Para cada medición, el usuario indica el número de test, alimentando así progresivamente el archivo TDMS en curso de creación.

La utilización que se ha ideado para el programa y el Indentor, es que cada archivo de pruebas corresponde sólo a una persona, de tal manera que todas las mediciones efectuadas sobre una misma persona (mediciones laterales y por debajo de cada seno) se encuentren en un mismo archivo TDMS y enumeradas por el usuario del Indentor. Sin embargo, es posible otras maneras de funcionamiento de la herramienta, depende de las necesidades del usuario.

3.5 Esquema de acciones del Indentor

El siguiente esquema de la Fig. 22 describe el protocolo de medición de la rigidez que realiza el Indentor, el cual incluye las acciones que el usuario debe hacer y las acciones automáticas programadas en el microcontrolador y en la interfaz LabView.

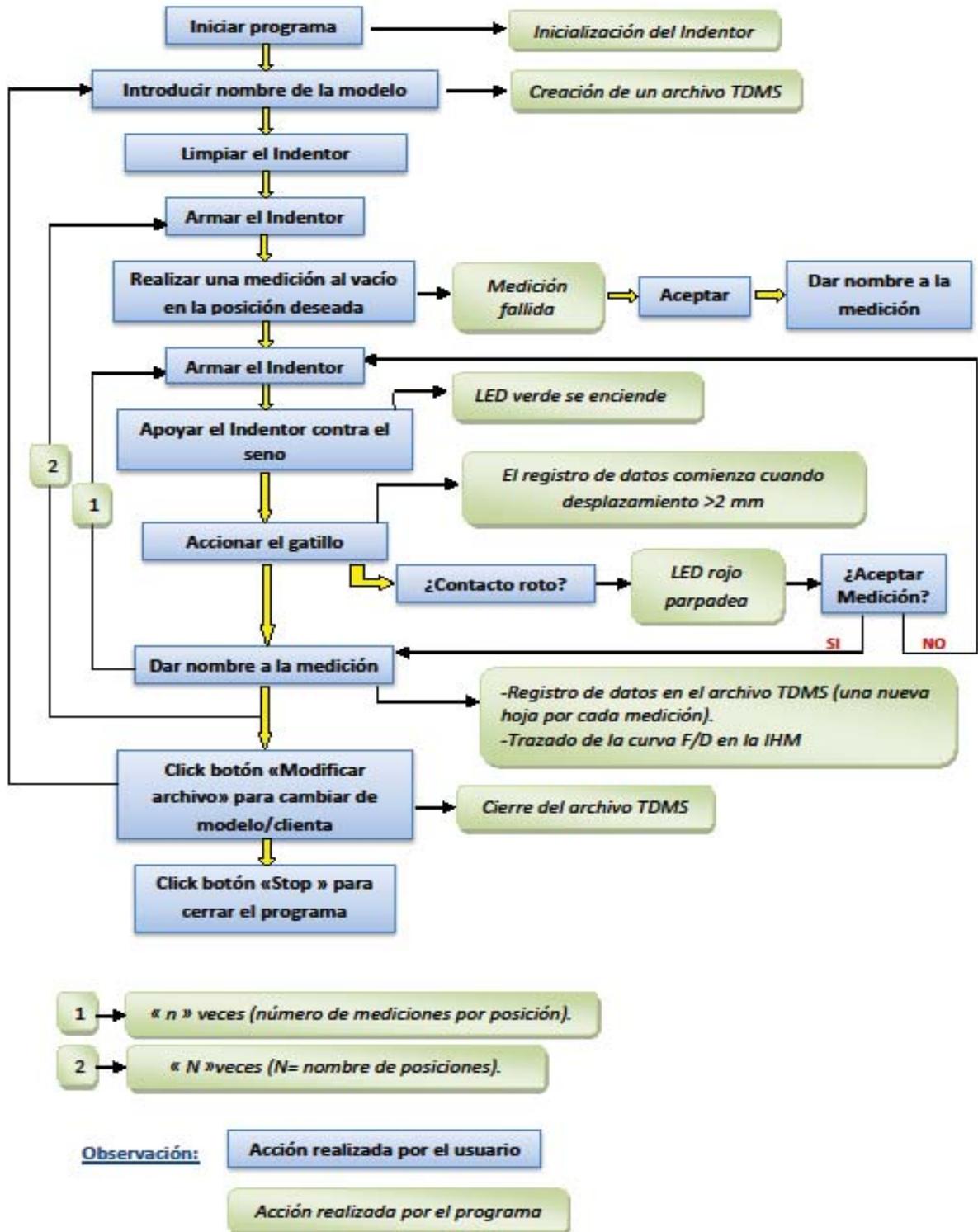


Fig. 22: Esquema descriptivo de las acciones del Indentor

(Creación propia, noviembre 2013)

Capítulo 4: Calibración de sensores y primeras pruebas

El Indentor está listo para realizar las primeras mediciones. Antes de comenzar, es necesario efectuar la calibración de los sensores de fuerza y desplazamiento.

Observación: para este primer test del Indentor (la calibración de los sensores y las dos primeras series de mediciones), se trabajará con una resolución de 12 bits para la conversión analógica/digital. Este convertidor de 12 bits formaba parte del primer sistema electrónico del Indentor con el fin de tener una resolución de medición más grande. Luego de esta primera serie de mediciones (calibración y series 1 y 2) este convertidor fue retirado.

4.1 Calibración de los sensores

4.1.1 Sensor de fuerza

La calibración del sensor de fuerza fue realizada con pesos diferentes. Con la idea de obtener una mejor representatividad de los valores para trazar la curva, se decidió realizar 10 series de repeticiones.

En primer lugar, se debe conocer el valor que indica el sensor sin peso y sin tornillo (Fig. 23):

Sensor en posición horizontal	
Valor numérico	676,94
Sensor en posición vertical	
Valor numérico	691,01

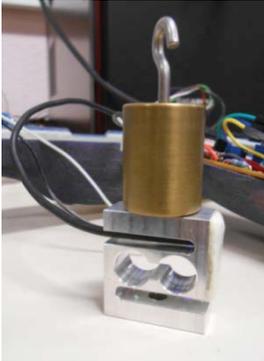


Fig. 23: Posición del sensor de fuerza para la calibración

(Fotografía propia, noviembre 2013)

Enseguida, se procedió a realizar la calibración con diferentes pesos (se utilizó la gravedad como $g = 9,81 \text{ N/kg}$). Los valores obtenidos (valores numéricos) para cada peso se muestran a continuación:

Peso (N)	0	0,1962	0,4905	0,981	1,962	4,905
Serie 1	676,94	742,87	840,61	1003,98	1330,8	2292,03
Serie 2	676,94	743,24	841,13	1004,23	1328,68	2299,09
Serie 3	676,94	742,62	842,2	1005,16	1337,22	2307,91
Serie 4	676,94	743,96	841,57	1005,15	1334,49	2304,16
Serie 5	676,94	743,08	841,59	1005,71	1330,89	2288,96
Serie 6	676,94	743,51	842,03	1005,86	1334,87	2292,34
Serie 7	676,94	743,22	840,99	1004,88	1333,03	2294,04
Serie 8	676,94	743	841,68	1005,5	1329,71	2292,72
Serie 9	676,94	743,33	841,45	1006,32	1333,84	2290,19
Serie 10	676,94	744,15	842,44	1006,06	1328,52	2292,77
Me dia	676,94	743,298	841,569	1005,285	1332,205	2295,421

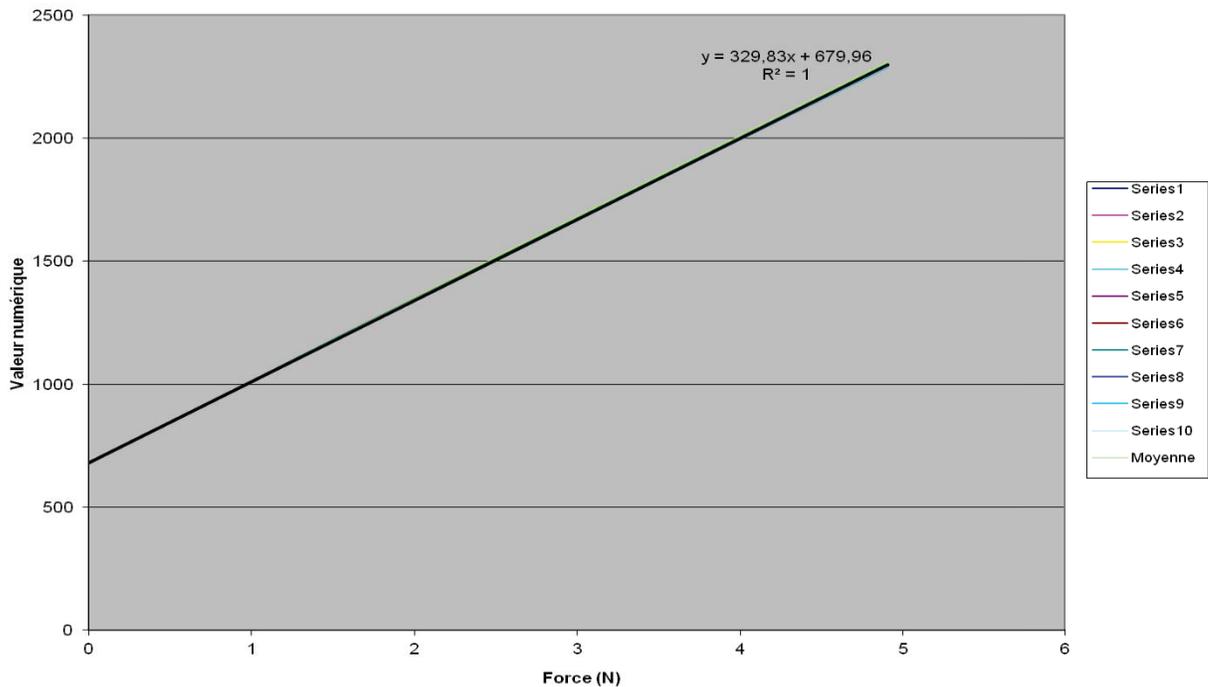


Fig. 24: Curva de calibración del sensor de fuerza

(Documento Excel, primera calibración sensor de fuerza, noviembre 2013)

El gráfico en la figura 24 muestra las curvas encontradas para las diferentes series realizadas durante la calibración del sensor de fuerza. Se deduce que el comportamiento del sensor es completamente reproducible y lineal en su dominio de funcionamiento.

4.1.2 Sensor de desplazamiento

La calibración de este sensor se hizo desplazando el eje del sensor a diferentes posiciones medidas por un micrómetro.

Desplazamiento (mm)	Valor Numérico
31,093	4094,43
24,406	3313,68
15,326	1896,87
7,388	656,62
4,502	205,28
1,18	3,19



Fig. 25: Posición del sensor de desplazamiento para la calibración

(Fotografía propia, noviembre 2013)

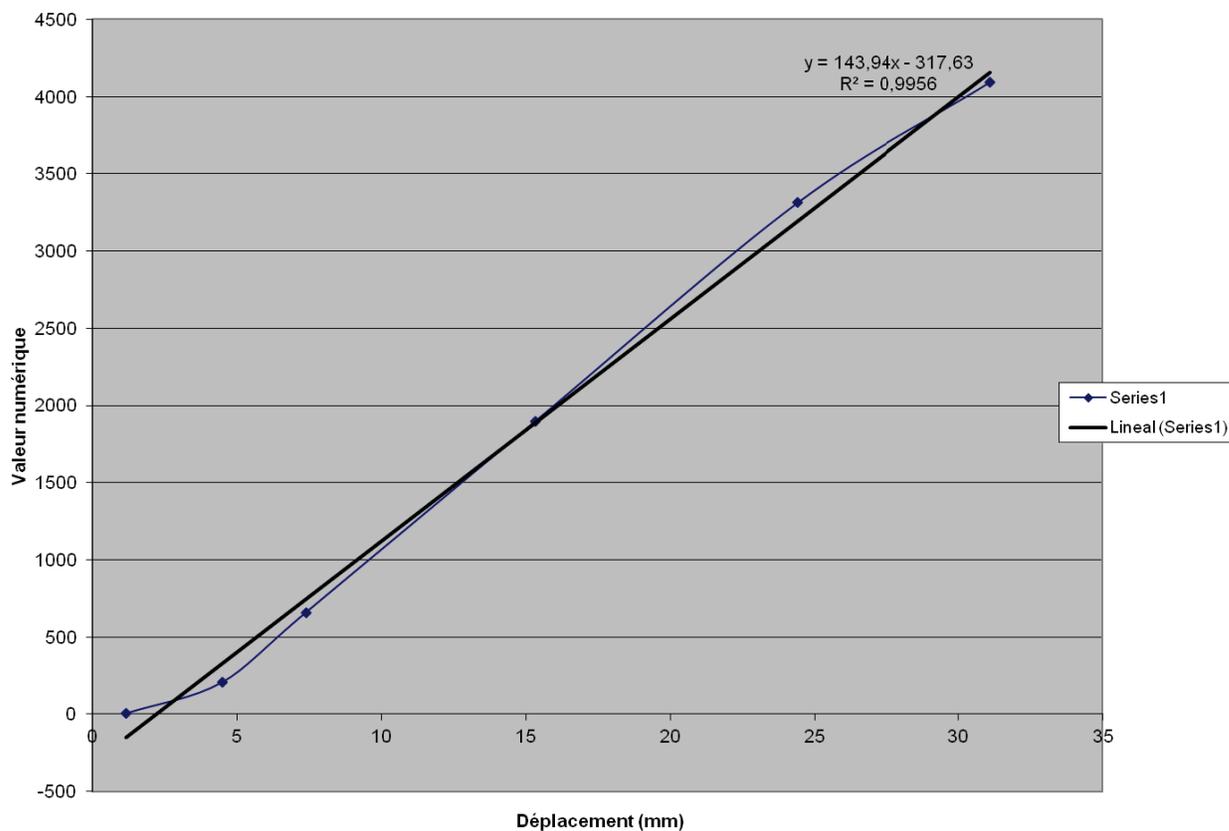


Fig. 26: Curva calibración del sensor de desplazamiento

(Documento Excel, primera calibración sensor de desplazamiento, noviembre 2013)

El gráfico de la figura 26 muestra las curvas encontradas para las diferentes series de la calibración del sensor de desplazamiento. Se deduce que el comportamiento del sensor se puede considerar lineal en su dominio de funcionamiento (valor de R^2 es muy cercano a 1).

El hecho que la curva no sea perfectamente lineal puede ser consecuencia de que el sensor externo utilizado para la calibración estaba en contacto específico en el extremo del sensor de desplazamiento, lo que pudo haber conducido a pequeñas deformaciones e incertidumbres de medición. No obstante, el error que puede producirse en las mediciones es prácticamente nulo.

4.1.3 Sensor de contacto

Como ya fue mencionado en el capítulo precedente, el contacto entre el Indentor y el seno es correcto cuando existe un cierre completo entre el embudo y el seno. Para saber esto, es necesario conocer un valor límite en el cual el fotodiodo no detecte la luz.

Se encontró que para un valor numérico bruto de 4050 el cierre entre el embudo y el seno es completo. Por consecuencia, este valor es fijado como el límite de validación de la medición.

4.2 Primera serie de pruebas con el Indentor

Después de haber realizado la calibración de los sensores y terminada la programación para dirigir el Indentor desde el computador, se efectuó una primera serie de pruebas sobre diferentes mujeres.

4.2.1 Protocolo

Las mediciones fueron efectuadas sobre los senos de 6 mujeres voluntarias con el mismo protocolo de medición para todas, indicado a continuación:

1) A cada persona se le ha formulado las siguientes preguntas:

- Nombre
- Edad
- Peso (kg)
- Estatura (m)
- IMC (%) (Índice de masa corporal)
- Día del ciclo menstrual
- ¿Tiene hijos?
- ¿Está embarazada?
- TDB (tamaño, talla del busto)
- Copa
- ¿Silicona?

2) Al momento de efectuar la medición, la persona debe estar sentada con las manos sobre sus muslos, espalda recta, vista hacia adelante.

3) Antes de comenzar las mediciones, el embudo del Indentor es desinfectado para mantener la higiene durante el proceso.

4) Antes de cada medición, se realiza una medición “al vacío” en la posición de la medición a realizar, con el fin de evaluar los esfuerzos de roce.

5) Por cada seno (derecho e izquierdo), se realizaron 3 mediciones sobre el lado lateral externo del seno y 3 mediciones por debajo del mismo, como muestran las figuras más abajo.

La etapa 4 del protocolo es esencial, puesto que la parte del Indentor que contiene el punzón y el limitador de fuerza ejercen un esfuerzo no nulo sobre el sensor de fuerza cuando el Indentor no está posicionado horizontalmente. Por otro lado, se constató que existen roces no despreciables entre las partes móviles del Indentor. Entonces, es necesario medir estos esfuerzos parásitos previamente para sustraerlos posteriormente a la medición efectiva.

A continuación se muestran los datos de las personas (etapa 1 del protocolo):

Persona	A	B	C	D	E	F
Edad	29	28	25	32	43	41
Peso (kg)	60	67	49	57	55	47
Estatura (m)	1.68	1.68	1.57	1.60	1.62	1.62
IMC (%)	21,25	23,73	19,87	22,26	20,95	17,9
Día de ciclo menstrual	15	6	9	N/A	7	27
¿Tiene hijos?	Sí	No	No	No	Sí	Sí
¿Está embarazada?	No	No	No	No	No	No
TDB	85	95	85	90	90	85
Copa	B	B	B	C	C	C
¿Silicona?	No	No	No	No	No	Sí

Para establecer una diferencia entre las personas protegiendo sus identidades, se decidió atribuir a cada una un color, de manera que se pueda distinguir rápidamente qué curva representa a cuál persona durante las próximas series de mediciones, y así poder realizar una comparación entre ellas (Fig. 27).

La asignación es la siguiente:

Persona A	
Persona B	
Persona C	
Persona D	
Persona E	
Persona F	

Fig. 27: Asignación de colores referenciales de las personas

(Creación propia, diciembre 2013)

Observación 1: Las curvas indicadas en los próximos gráficos son curvas medias. Ellas fueron trazadas encontrando la media entre los valores de las tres mediciones realizadas, a la cual se restó el valor de la medición al vacío. Por otro lado, las mediciones de fuerza se dejaron en valores brutos (valor numérico antes de la conversión en N) ya que es posible que la calibración haya estado influenciada por problemas de inestabilidad electrónica. Sin

embargo, los valores numéricos dan una idea de la comparación entre las personas. Se puede tener en mente este orden de magnitud resultante de la calibración: una variación de valor numérico de 100 corresponde a una variación de fuerza de alrededor 0,3 N.

Observación 2: Para la primera y segunda serie de mediciones se retiró la guía axial del punzón la más cercana al embudo para minimizar el roce; en efecto, se observó que una prueba de indentación no implicaba esfuerzo radial sobre el punzón y que la guía axial era tal vez innecesaria.

En las figuras que se muestran a continuación, se ilustra la posición del Indentor para realizar las mediciones laterales del seno (Fig. 28) y las mediciones realizadas por debajo del seno (fig. 29).



Fig. 28: Posición Indentor medición lateral



Fig. 29: Posición Indentor medición por debajo

(Fotografías propias, noviembre 2013)

4.2.2 Primera campaña de pruebas

Una vez efectuadas todas las mediciones, se hizo una comparación entre las curvas medias obtenidas de cada una de las personas por cada seno (izquierdo y derecho) y para cada tipo de medición (lateral y por debajo). Se han aproximado las curvas obtenidas mediante funciones lineales cuyas ecuaciones están dadas sobre los diferentes gráficos (recurrir al código color para la correspondencia curva/ecuación).

En primer lugar, se muestra como ejemplo las curvas encontradas para una persona (persona A) sobre un seno, en este caso es el seno derecho medido lateralmente. Este gráfico va a permitir comparar la reproducibilidad de las mediciones entre las tres series de pruebas.

Los valores de fuerza son trazados de la siguiente manera:

$$\text{Valor fuerza} = \text{Valor fuerza medida} - \text{Valor medición al vacío}$$

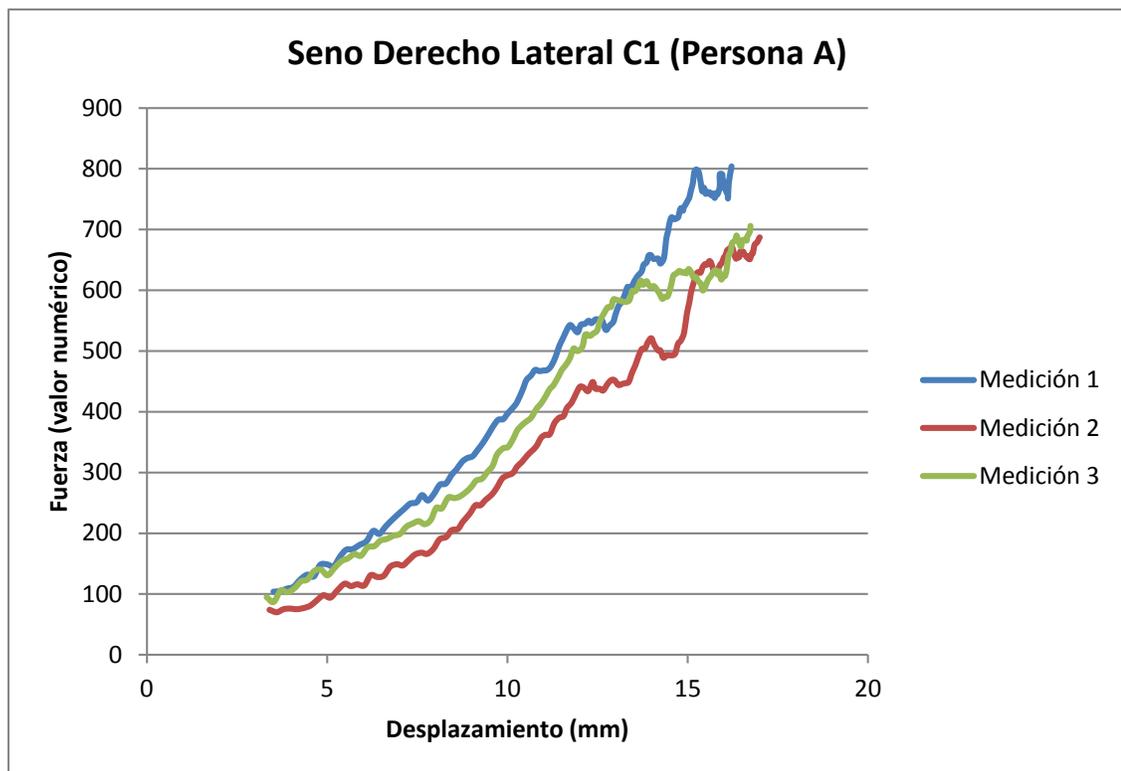
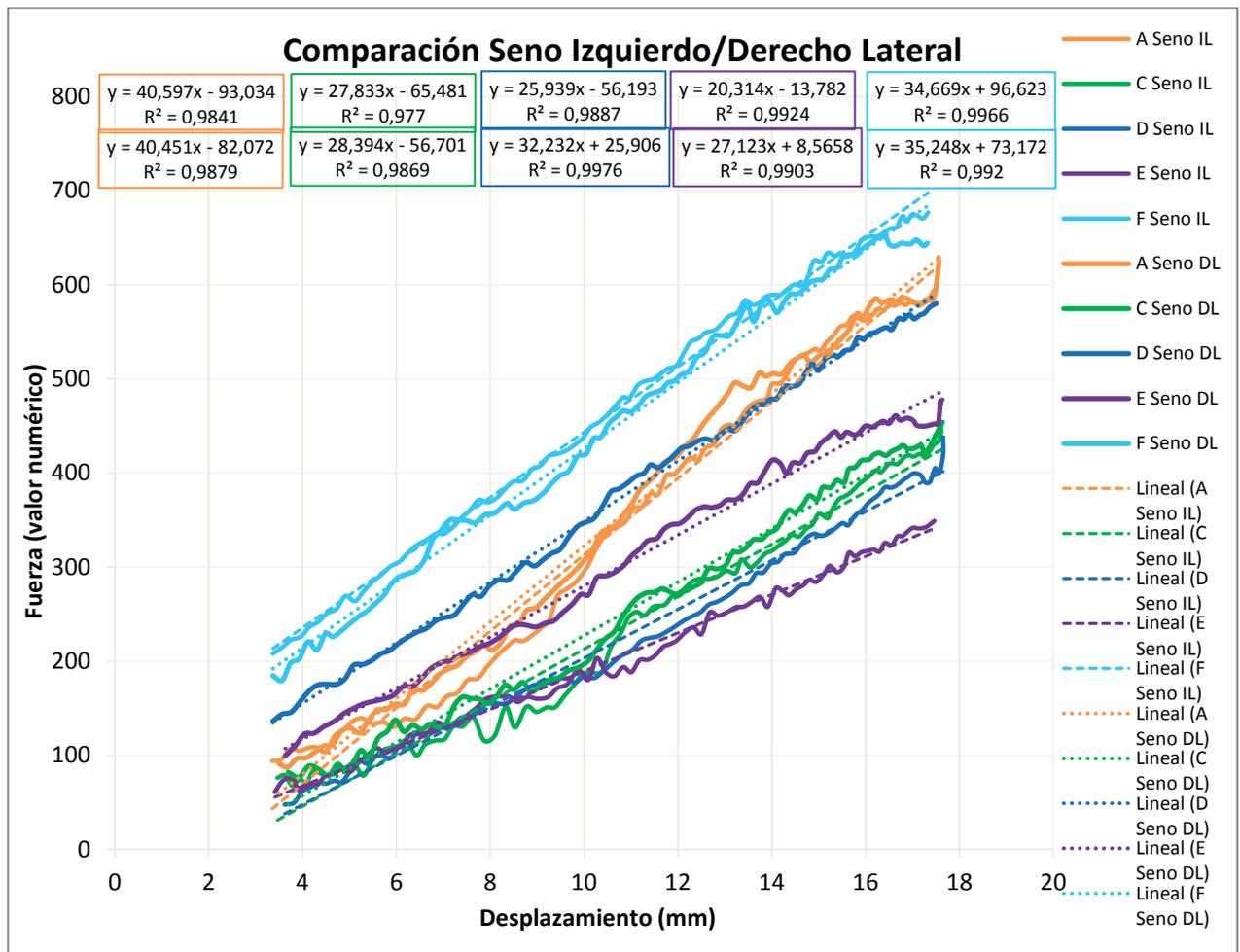


Fig. 30: Curva fuerza/desplazamiento, seno derecho, medición lateral (serie C1, persona A)

Al observar el gráfico (Fig. 30), se encontró que la reproducibilidad de las mediciones no era muy satisfactoria. Al final de la segunda campaña de pruebas se tratará de solucionar esta situación.

Para comenzar con el análisis de los gráficos obtenidos, en una primera instancia se muestra una comparación de las curvas tanto entre las personas como entre los senos. La comparación se realiza entre el seno derecho y el izquierdo, tanto para la medición lateral y por debajo del seno.



Nota: IL: izquierdo lateral; DL: derecho lateral; Linéaire: lineal

Fig. 31: Gráfico de comparación de las mediciones laterales

Cabe mencionar, que además de querer comprender cómo influyen en la rigidez del busto femenino la presencia de prótesis mamarias, el tamaño del busto o los cambios

originados al amamantar, realizar comparaciones de las curvas obtenidas tanto para los senos derecho e izquierdo como entre las personas sirve para demostrar que efectivamente existen diferencias entre los senos de una misma persona, así como también recordar que ningún busto femenino es idéntico a otro. El análisis de los datos de rigidez obtenidos de diferentes personas permite comenzar a tener un conocimiento del comportamiento de un tejido suave del cual aún no existen leyes definidas de comportamiento mecánico, como es el caso del busto femenino.

En el gráfico de la figura 31, se puede ver en esta primera comparación que las curvas siguen una trayectoria casi lineal (valores de R^2 muy cercanos a 1 en todos los casos), pero existe una diferencia entre ellas. La persona F es claramente quien presenta una mayor rigidez de los senos, reflejo de la presencia de prótesis mamarias.

Para las personas C, D y F, las mediciones sobre el seno izquierdo y el seno derecho son similares. Para las personas A y E no es el mismo caso. Se piensa que la razón es un mal control de la posición del Indentor en relación al seno: si está orientado hacia abajo y puesto ligeramente sobre la parte superior del seno, es posible que se esté midiendo el músculo pectoral en vez del seno en sí.

Nota: en todos los gráficos que se presentarán a continuación, las leyendas de las curvas significan:

- Seno IL: Seno izquierdo medido de manera lateral
- Seno GB: Seno izquierdo medido por debajo (parte baja del seno)
- Seno DL: Seno derecho medido de manera lateral
- Seno DB: Seno derecho medido por debajo (parte baja del seno)
- Linéaire: lineal

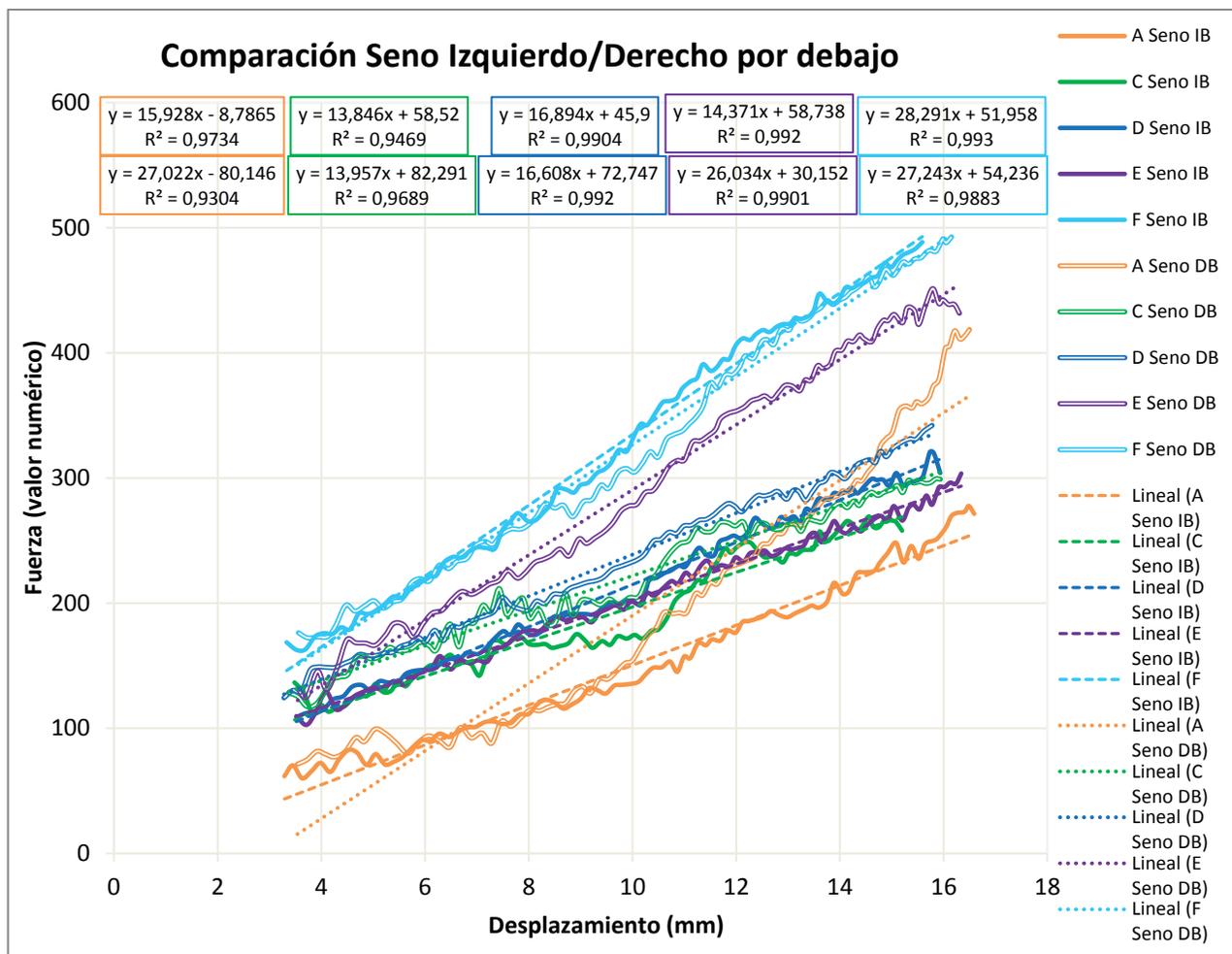


Fig. 32: Gráfico comparación medición seno por debajo, primera campaña C1

En el caso del gráfico de la figura 32, se puede ver que la medición por debajo del seno presenta globalmente curvas lineales.

Realizar una comparación entre las personas en esta posición (medición por debajo del seno) resulta más difícil debido a que, además de medir la rigidez, se mide el peso del seno. Incluso se puede pensar que la rigidez de un seno más grande será más elevada que la de un seno más pequeño, lo que no es correcto. Igualmente, se constató que era difícil de garantizar un buen contacto entre el embudo y el seno para los senos de menor tamaño. También es difícil de tener la misma orientación (si es posible verticalmente) del Indentor para todas las personas, puesto que para los senos de menor tamaño, el embudo estorba para el buen contacto

al colocar el Indentor verticalmente. Por consecuencia, la posición vertical no es la más indicada para garantizar una buena repetitividad de las mediciones y, por ende, una buena comparación entre las personas.

Por otro lado, se constató que el esfuerzo de compresión no es nulo cuando se coloca el Indentor contra la piel (antes de lanzar la prueba) ya que el punzón sobrepasa del embudo en el eje axial.

Finalmente, también se constató durante las mediciones que la detección del límite de luminosidad no funcionaba correctamente, entonces no se tiene la garantía que el contacto fue bien mantenido durante todas las mediciones. La curva “A Seno IB” es un ejemplo donde su no-linealidad es debida a un movimiento de la mano del usuario.

Luego de estos primeros resultados, se lanzó una segunda campaña de mediciones para la cual dos puntos fueron modificados:

- La orientación horizontal del Indentor es controlada gracias a un nivel de burbuja.
- El contacto del embudo sobre el seno es controlado por el fotodiodo, y se adjuntó una argolla de espuma de polímero sobre el embudo para que el esfuerzo sobre el punzón sea nulo al momento del contacto entre el seno y el punzón.

4.2.3 Segunda Campaña de pruebas

Para esta campaña, se aseguró de tener una buena horizontalidad del Indentor durante la medición lateral del seno colocando un nivel de burbuja sobre la parte superior del Indentor (Fig. 33).



Fig. 33: Indentor con el nivel de burbuja

La medición lateral del seno derecho (Fig. 34) de la persona A se muestra en el siguiente gráfico. Se constata que la repetitividad es un poco mejor respecto de la primera campaña, pero la parte final de la curva muestra una pequeña dispersión.

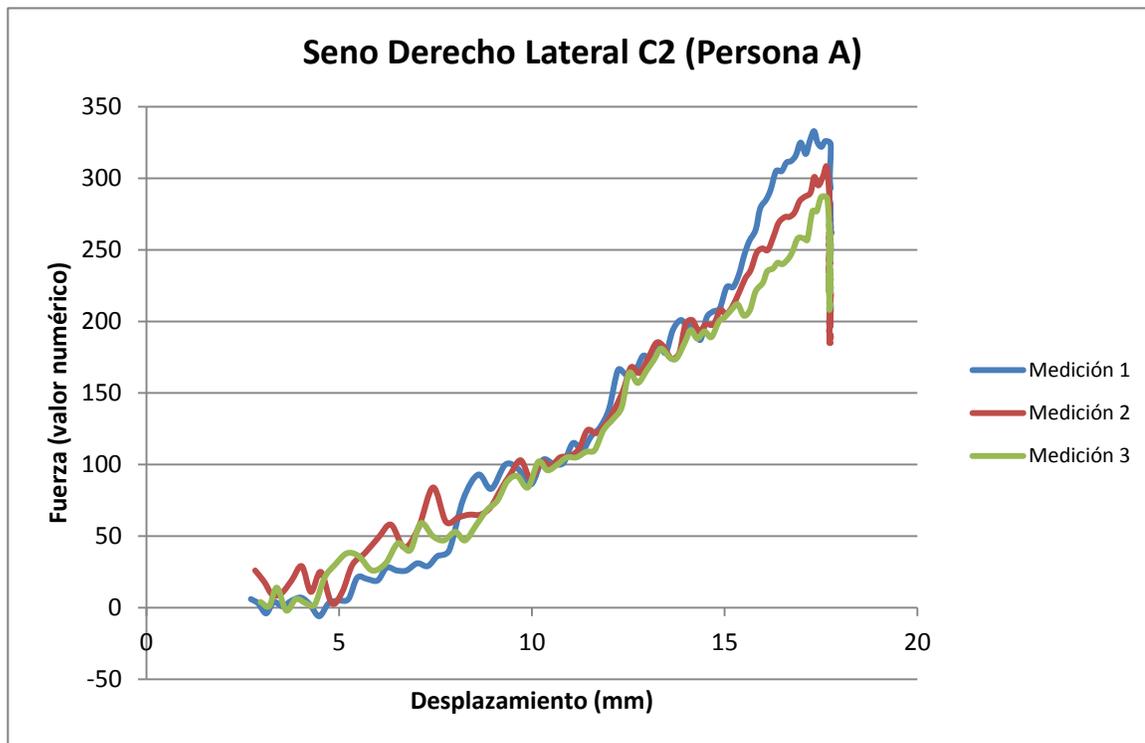


Fig. 34: Curva fuerza/desplazamiento para el seno derecho medición lateral

Primero que todo, se van a comparar las curvas entre el seno izquierdo y el seno derecho de cada una de las personas, tanto para la medición lateral como para la medición por debajo del seno.

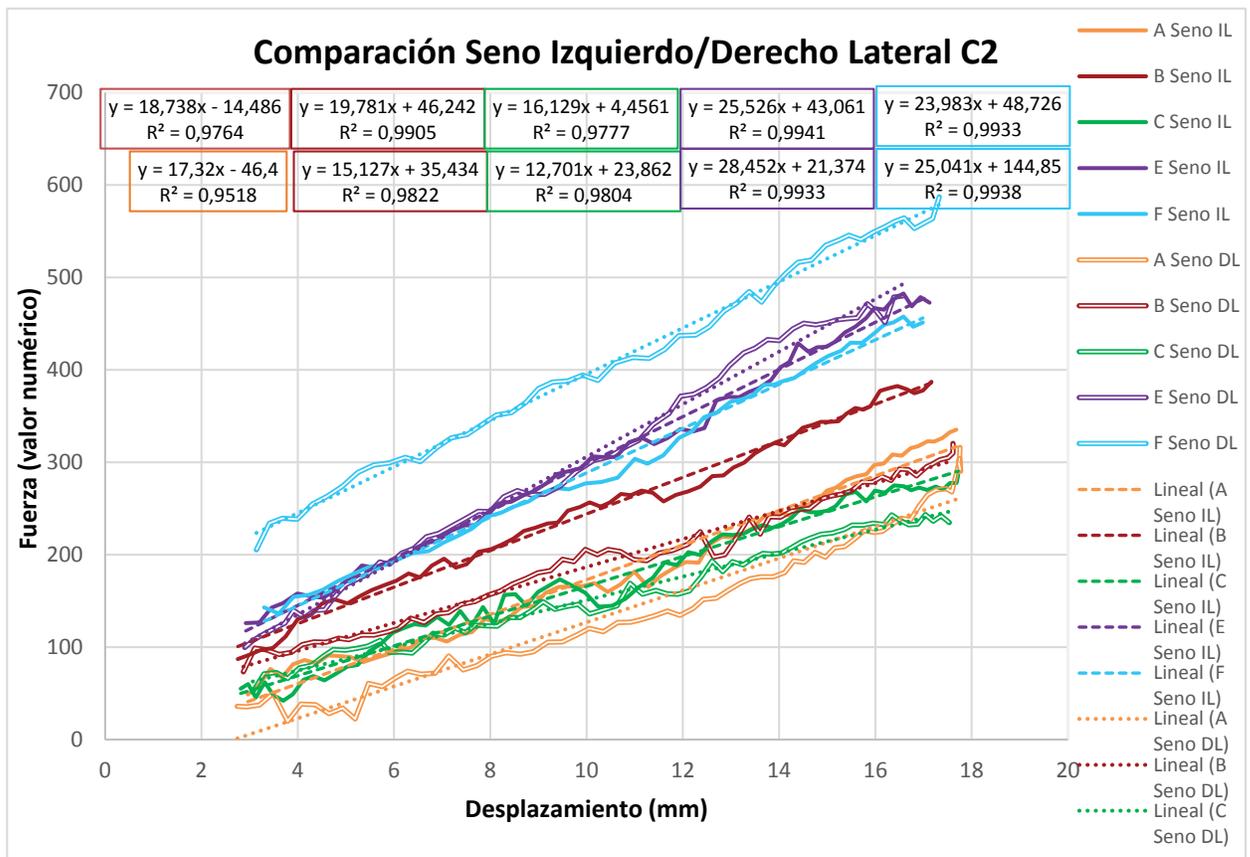


Fig. 35: Gráfico de comparación medición lateral, campaña

Luego de esta campaña, como se puede observar en el gráfico de la figura 35, no se constató una clara mejora de la repetitividad de las curvas. Las curvas de este gráfico son muy similares a las curvas de la primera campaña. Sin embargo, se puede ver que para la persona A, los valores son particularmente menores en esta campaña, y para el resto de las personas ocurre lo mismo. Esto puede tener su explicación en el hecho de haber añadido la argolla de espuma para así evitar que el valor de fuerza aumente, hecho que ocurrió en la primera campaña.

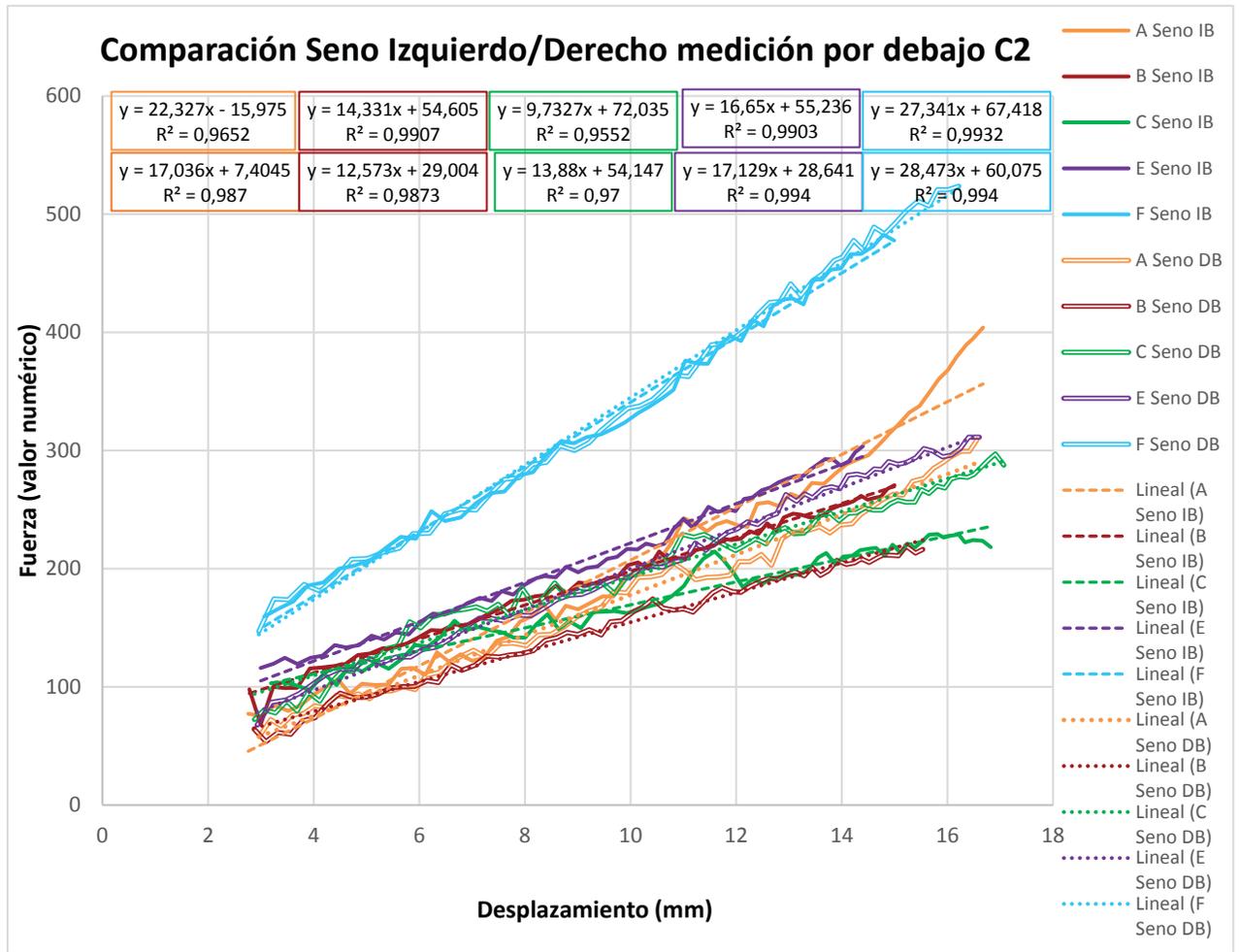


Fig. 36: Gráfico de comparación medición por debajo del seno, campaña 2

La medición hecha por debajo del seno es muy similar entre el seno izquierdo y el derecho. Como se muestra en el gráfico de la figura 36, las curvas son más lineales y con mejor repetitividad respecto de la primera campaña, lo que indica que las mediciones de esta segunda campaña son más aprovechables. Los valores de fuerza son menores respecto de la campaña anterior, lo que puede tener su explicación también en la argolla de espuma que se agregó al Indentor para evitar que el punzón mida esfuerzo alguno al momento de entrar en contacto con la piel.

4.3 Problema de repetitividad

Se constató que la repetitividad o reproducibilidad de las mediciones para el caso lateral no es satisfactoria, aun habiendo mejorado el control de la orientación del Indentor en relación a la primera serie de mediciones (presencia del nivel de burbuja). Para intentar explicar esta diferencia, se decidió trazar la desviación estándar de las mediciones al vacío de forma horizontal (se tomaron los valores medidos cuando se realizaban las mediciones del seno derecho en cada campaña): se espera ver que esta desviación estándar disminuya entre la primera y la segunda campaña puesto que, controlando la orientación del Indentor, se controla el valor del esfuerzo debido al peso del punzón y del limitador de fuerza.

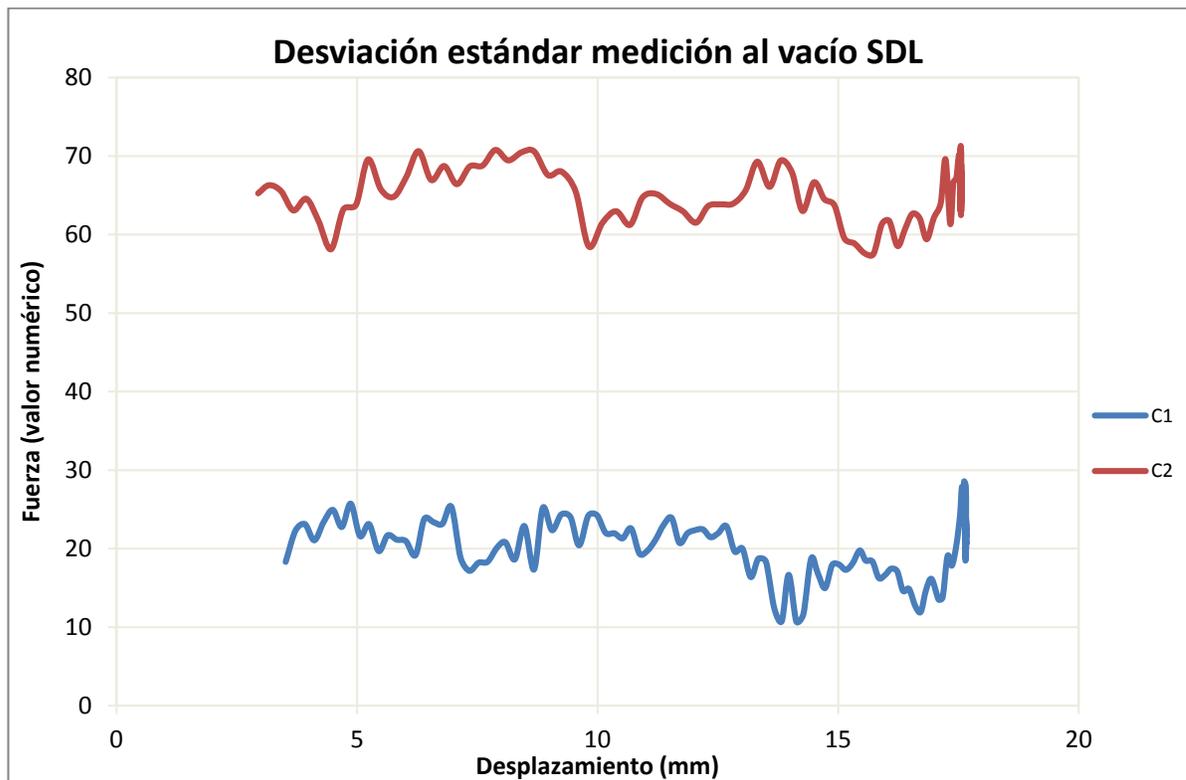


Fig. 37: Curvas desviación estándar (mediciones al vacío en seno derecho parte lateral, campañas 1 y 2)

En realidad, se puede ver que en la segunda campaña de mediciones, luego que se prestara una mayor atención a la orientación del Indentor, las mediciones al vacío realizadas

en la posición horizontal son menos repetitivas que las realizadas durante la primera campaña de mediciones (Fig. 37). Eso significa que otro fenómeno es preponderante en relación al peso propio del punzón y del limitador de fuerza. Incluso, se observó que si se accionaba el gatillo sin mantenerlo presionado durante la prueba, éste ejercía un esfuerzo radial sobre el punzón y podía aumentar las fuerzas de roce del punzón sobre el embudo.

Para constatar si se trata de roces en ciertas partes del Indentor, se decidió efectuar mediciones al vacío de la siguiente manera:

- a) Mediciones al vacío manteniendo bien presionado el gatillo
- b) Mediciones al vacío presionando levemente el gatillo (para verificar si el gatillo provoca un pequeño roce)

Se repitieron las acciones a) y b) pero sin el embudo, para saber si es el contacto entre el eje del punzón y el embudo el que provoca el roce.

a) Mediciones al vacío manteniendo bien presionado el gatillo:

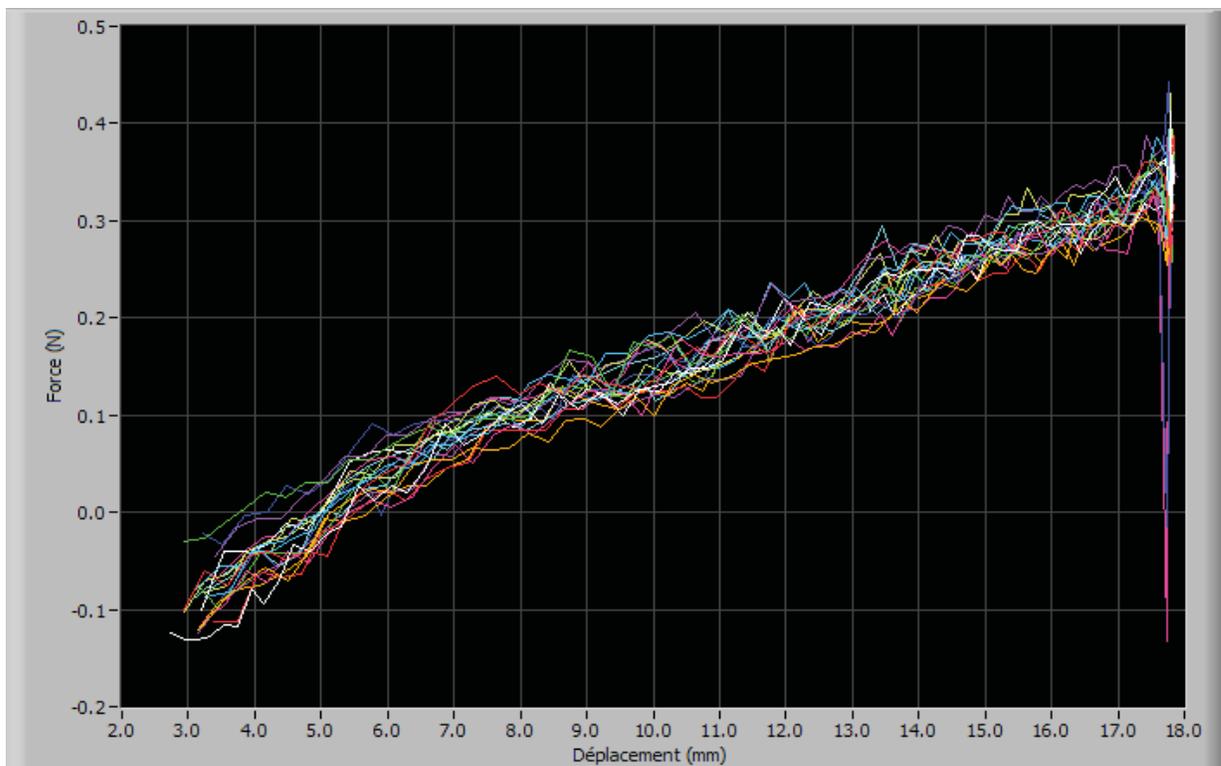


Fig. 38: Mediciones al vacío con el gatillo bien presionado

La figura 38 muestra la medición del Indentor con el gatillo presionado totalmente. Se puede ver que existe ciertamente un roce no despreciable, pero aun así las curvas son reproducibles.

b) Mediciones al vacío presionando levemente el gatillo:

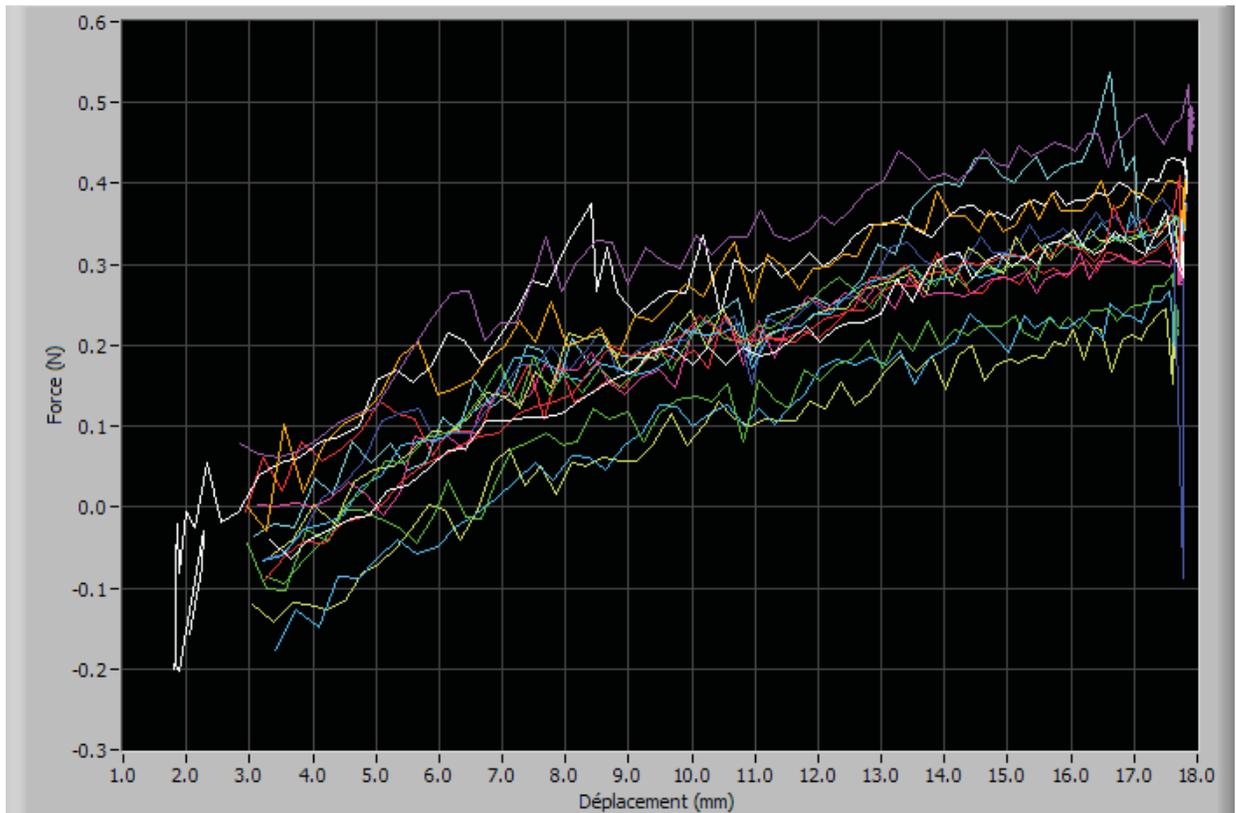


Fig. 39: Mediciones al vacío con el gatillo levemente presionado

En la figura 39, se puede ver que las curvas no son repetitivas si, al momento de efectuar una medición, el gatillo no está bien presionado. Cuando esto se produce, el gatillo provoca una pequeña elevación de la parte móvil del Indentor y eso hace que el punzón toque el embudo provocando un pequeño roce. Entonces, para realizar mediciones más repetibles, se debe mantener el gatillo totalmente presionado al momento de efectuar una medición.

c) Mediciones al vacío manteniendo bien presionado el gatillo pero sin el embudo:

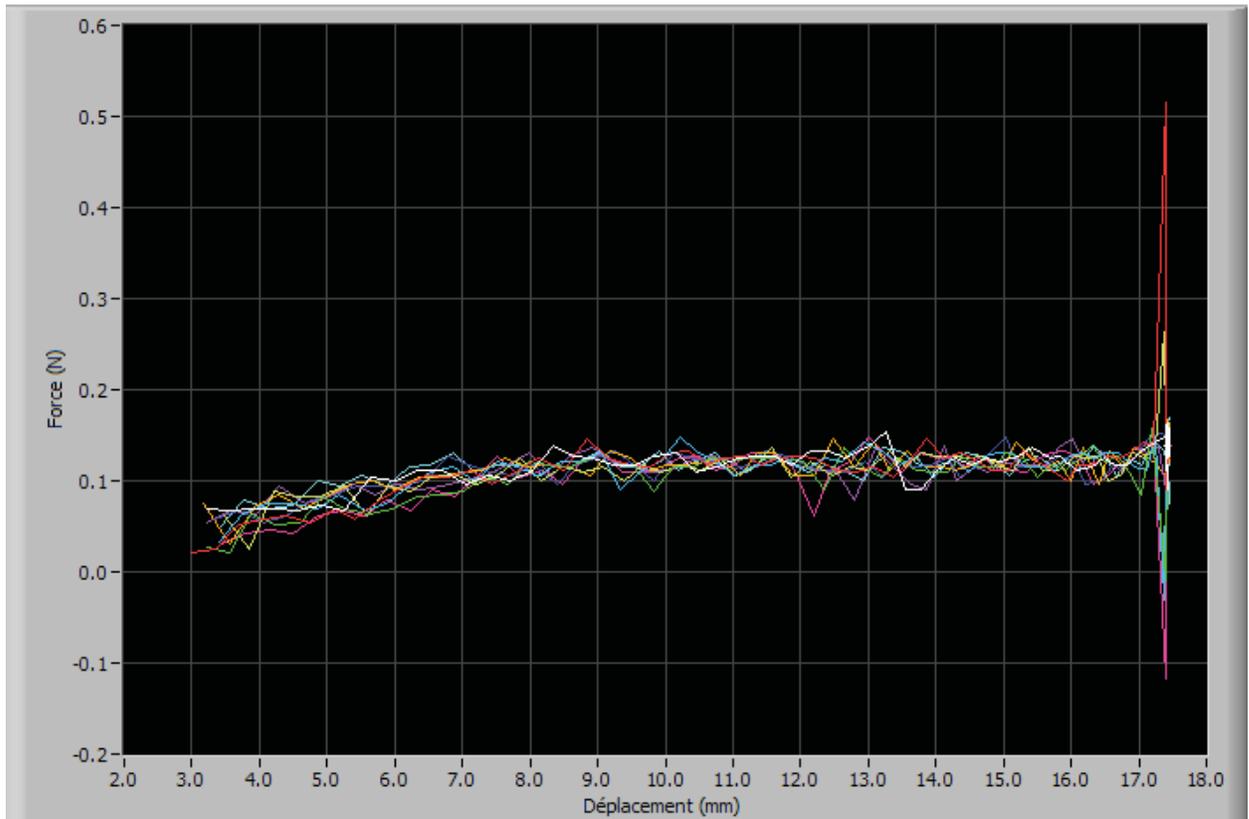


Fig. 40: Mediciones al vacío sin el embudo, gatillo bien presionado

(Imágenes 38, 39 y 40 son gráficos generados en LabView, diciembre 2013)

La figura 40 muestra las curvas medidas al vacío. Se puede constatar que las curvas son repetitivas y de una amplitud más bien baja. Según el gráfico, el roce medido (figuras 38 y 3932) proviene principalmente del contacto entre el punzón y el embudo. Es posible que este roce entre embudo y punzón sea en parte responsable de la dispersión de los valores al vacío constatados en la Fig. 38, puesto que no se controló bien la presión sobre el gatillo durante la segunda medición.

Sin embargo, para saber si la dispersión puede venir también de un problema de tipo electrónico, se decidió medir durante toda una noche los valores entregados por el sensor de fuerza cuando el Indentor queda inmóvil. Se colocó entonces el Indentor armado (gatillo en

posición para medir) y en posición horizontal (ver Fig.41), y se midió toda la noche los valores de fuerza.



Fig. 41: Posición del Indentor para registrar los valores de fuerza sin sollicitación
(Fotografía propia, diciembre 2013)

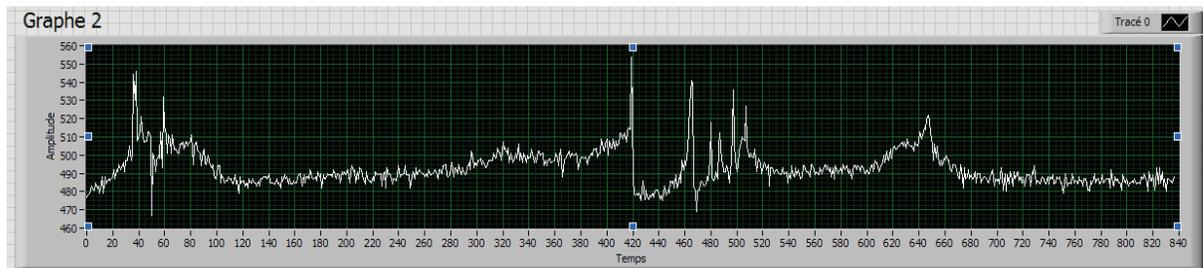


Fig. 42: Gráfico valores de fuerza sin sollicitación (amplitud de variación: 70)
(Gráfico generado en LabView, diciembre 2013)

La figura 42 muestra el gráfico obtenido. Se observa que la curva no es estable, presenta variaciones en ciertos intervalos de tiempo. Para saber si estos esfuerzos parásitos son excepcionales, se reitera la misma operación la noche siguiente; esta vez, el sensor es dejado libre, es decir, el punzón y el limitador de fuerza fueron desmontados.

Entonces, para saber si realmente la fuerza que ejerce el limitador de fuerza sobre el sensor provoca estas variaciones en la curva obtenida anteriormente, se decidió medir nuevamente durante toda una noche el sensor pero esta vez sin el limitador de esfuerzos y acostado sobre una mesa, como lo muestra la figura 43.



Fig. 43: Posición del Indentor en segundo ensayo

(Fotografía propia, diciembre 2013)

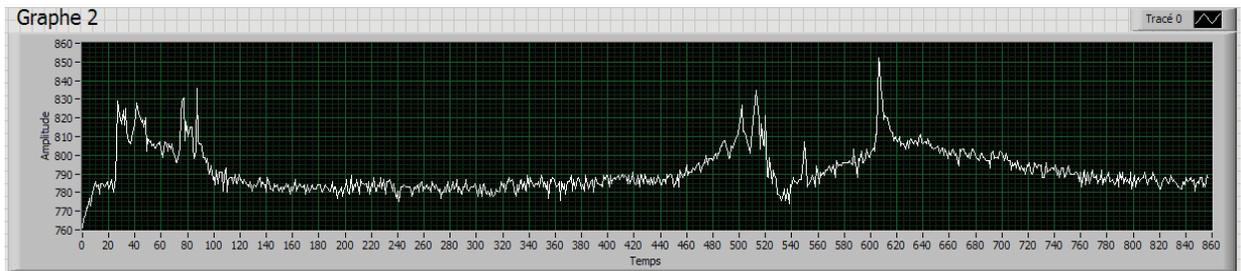


Fig. 44: Gráfico valores de fuerza segunda prueba (amplitud de variación: 70)

(Gráfico generado en LabView, diciembre 2013)

El gráfico de la figura 44 muestra una vez más variaciones en la curva obtenida. Eso quiere decir que el problema viene tal vez de la tarjeta electrónica o del microcontrolador Arduino Nano durante la adquisición de datos. Por esta razón, se decidió testear la tarjeta electrónica y el Arduino Nano midiendo los datos proporcionados por el sensor de fuerza.

4.4 Problemas en las mediciones precedentes: soluciones

Luego de haber testeado el Indentor para encontrar la causa de la dispersión de los valores de fuerza al inicio de una medición, pensando que se trataba de un problema de roce,

se decidió testear los componentes electrónicos. Finalmente, se encontró una inestabilidad en un componente de la tarjeta electrónica.

Inicialmente, se tenía un convertidor analógico/digital de una resolución de 12 bits, para ganar niveles de resolución en relación a la conversión sobre 10 bits disponible sobre la tarjeta Arduino. Para hacer este tipo de conversión, se disponía de dos componentes electrónicos: una tarjeta Digilent con el componente CAN 12 bit (tarjeta del tipo PmodAD2) y un CAN de 12 bit del tipo AD7991 de la tarjeta PmodAD2. Se encontró que en el convertidor se producía un problema de ruido en la transmisión y conversión de datos que causaba la inestabilidad del valor de fuerza medido para un esfuerzo nulo (particularmente las mediciones efectuadas al vacío).

Entonces, se quitó ambos componentes de resolución 12 bits y se intentó la conversión analógica/digital directamente sobre la tarjeta Arduino: el resultado fue un valor más estable y más preciso en la conversión.

Finalmente, se decidió que la conversión será realizada con el convertidor de la tarjeta Arduino Nano de una resolución de 10 bits (como fue detallado en el capítulo 3).

Observación: todos los componentes electrónicos dispuestos sobre la tarjeta electrónica fueron detallados en el capítulo 2.

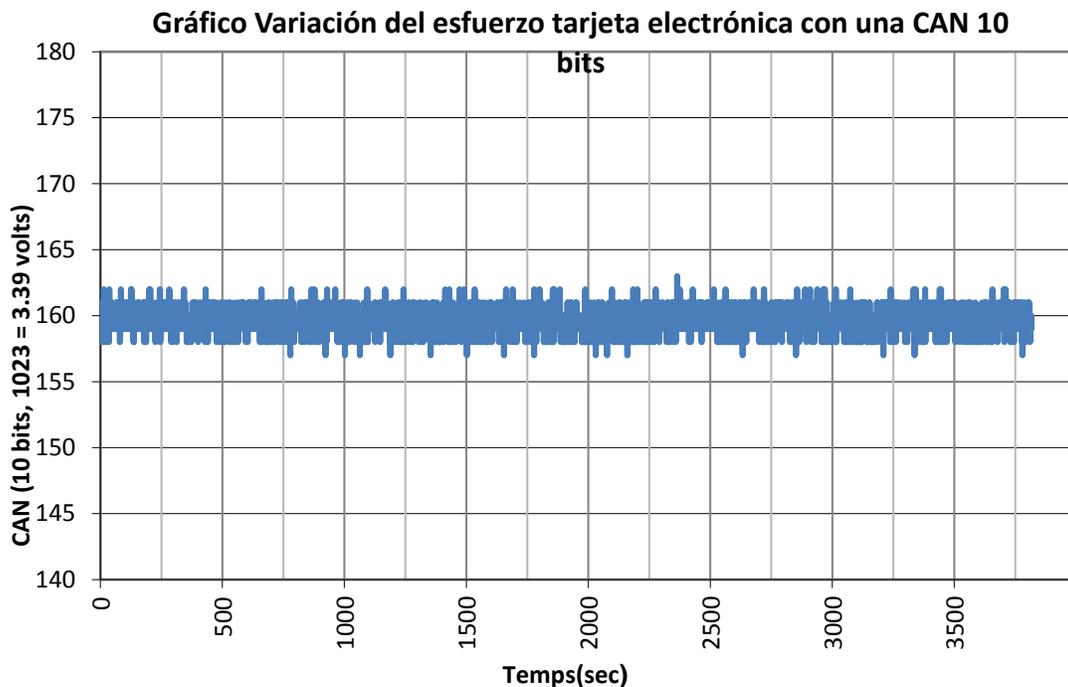


Fig. 45: Medición de la variación del esfuerzo para una conversión sobre 10 bits (amplitud de variación: 5)

El gráfico 45 muestra que la conversión analógica/digital, realizada directamente por la tarjeta Arduino Nano, es más estable y precisa con una resolución de 10 bits. La variación de los valores es de alrededor 2% o menos.

Para verificar finalmente que el problema ha sido resuelto y que los valores de fuerza al inicio de las mediciones presentan una mejor reproducibilidad, se decidió lanzar una nueva campaña de mediciones. Para esta nueva campaña, se tomaron todos los cuidados necesarios con el fin de realizar mediciones más repetitivas: presionar bien el gatillo, mantener bien horizontal el Indentor al momento de efectuar la medición lateral y evitar medir una parte del músculo pectoral.

Capítulo 5: Nueva calibración y tercera campaña de mediciones

Para esta nueva campaña de mediciones se han realizado algunos cambios: en razón de los problemas encontrados durante las dos primeras campañas, se decidió trabajar con una resolución de 10 bits para la conversión de las señales analógicas/digitales de los datos proporcionados por los sensores, tanto para la nueva calibración como para la última campaña de mediciones realizadas durante este proyecto.

5.1 Calibración de los sensores

5.1.1 Sensor de fuerza

La calibración del sensor de fuerza se realizó bajo el mismo procedimiento anterior: se colocan pesos diferentes sobre el sensor y esta acción se repite 6 veces.

Como se tiene dos gamas de valores de fuerza, se decidió efectuar la calibración con la gama 2 (valores entre -1N a 5N) debido a que es más precisa que la gama 1 (el ruido o la interferencia es menor).

Primeramente, se deben conocer los valores numéricos entregados por el sensor sin peso y sin tornillo:

Sensor en posición horizontal	
Valor numérico	167,32
Sensor en posición vertical	
Valor numérico	177,54

A continuación, se procedió a realizar la calibración con diferentes pesos utilizando la gravedad como $g = 9,81 \text{ N/kg}$. Los valores obtenidos (valores numéricos) se muestran a continuación:

Peso (N)	0	0,1962	0,4905	0,981	1,962	4,905
Serie 1	167,32	194,77	238,4	315,34	472,3	847,84
Serie 2	167,32	192,76	244,37	319,84	478,28	848,89
Serie 3	167,32	197,93	244,35	320,9	475,34	842,12
Serie 4	167,32	198,91	245,11	321,38	476,41	848,01
Serie 5	167,32	198,18	244,77	322,22	476,53	844,66
Serie 6	167,32	197,48	244,71	321,71	475,76	851,2

Para cada peso utilizado, se obtiene la media y la desviación estándar de todas las series realizadas:

Peso (N)	Media (VN)	Desviación estándar
0	167,32	3,11344E-14
0,1962	196,67	2,384931166
0,4905	243,62	2,571944141
0,981	320,23	2,529271964
1,962	475,77	1,975510061
4,905	847,12	3,229284751

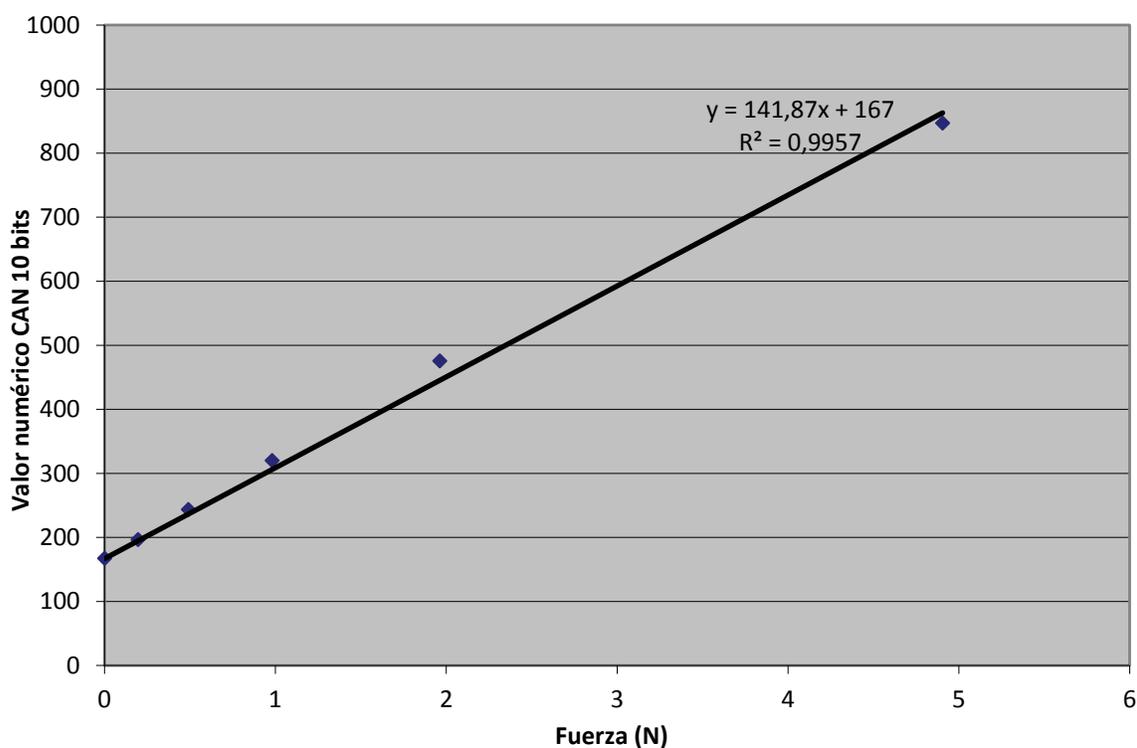


Fig. 46: Curva calibración sensor de fuerza, resolución 10 bits

En el gráfico de la figura 46 se observan las curvas de los valores encontrados además de la desviación estándar. La curva media encontrada es lineal, pero el valor del error es ligeramente menor que en la primera campaña. La explicación a este puede encontrarse en que esta vez se realizaron menos series de evaluación, lo que significa tener una menor cantidad de valores a comparar. Aun así, continúa presentando una buena repetitividad en su dominio de funcionamiento. Por otro lado, la desviación estándar es pequeña.

5.1.2 Sensor de desplazamiento

La calibración del sensor de desplazamiento fue realizada desplazando el eje del sensor a diferentes posiciones con la ayuda de galgas de acero cuya longitud era conocida.

Desplazamiento (mm)	Valor numérico
0	141
1	179,12
3	258,46
5	336,17
6	374,73
8	454,12
11	564,15
12	610,12
15	728,14
17	806,7
18	845,61
21	962,61
24	1021,23

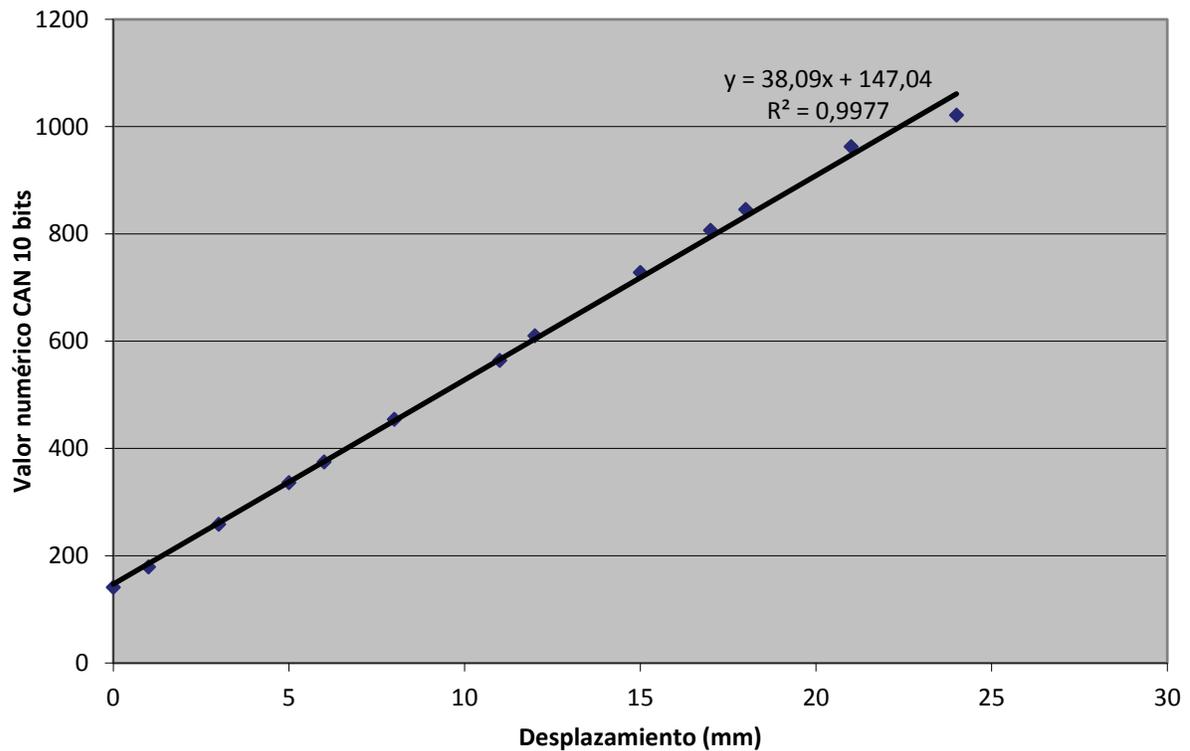


Fig. 47: Curva calibración sensor de desplazamiento

Contrariamente a la primera calibración, la curva encontrada es totalmente lineal (Fig. 47). Se piensa que esto se debe al hecho que se controló mejor la posición del sensor y su desplazamiento con las galgas, además de haber utilizado más series en la calibración (se utilizaron más posiciones de medición).

5.1.3 Sensor de contacto:

La calibración para el sensor de contacto está dada por un porcentaje del límite de luminosidad del fotodiodo (valor en Volts). El contacto es bueno cuando el valor medido sea mayor al valor que indica la siguiente ecuación:

$$\text{Tensión de referencia (3,388V)} - 0,1V = 3,288V$$

Es decir, para valores mayores a 3,288V el contacto entre el Indentor y el seno es considerado correcto.

5.2 Tercera campaña de mediciones.

Después de haber calibrado los sensores, se efectuó una nueva campaña de mediciones, pero esta vez tomando en consideración todas las precauciones necesarias con el fin de obtener buenos resultados:

- El gatillo es bien presionado al momento de realizar la medición.
- El Indentor es bien posicionado horizontalmente con la ayuda del nivel de burbuja.
- Se tomó el cuidado necesario para medir sólo el seno, evitando así medir el músculo pectoral.

Además, esta vez las mediciones fueron realizadas con la guía axial del punzón (puesta al nivel del eje del limitador de fuerza). Esta guía axial permite atenuar el roce del punzón sobre el embudo.

Primero que todo, se efectuaron varias mediciones al vacío con el fin de saber si la guía axial producía valores de roce muy elevados que pudiesen influenciar los valores de rigidez medidos. Las curvas encontradas se muestran a continuación.

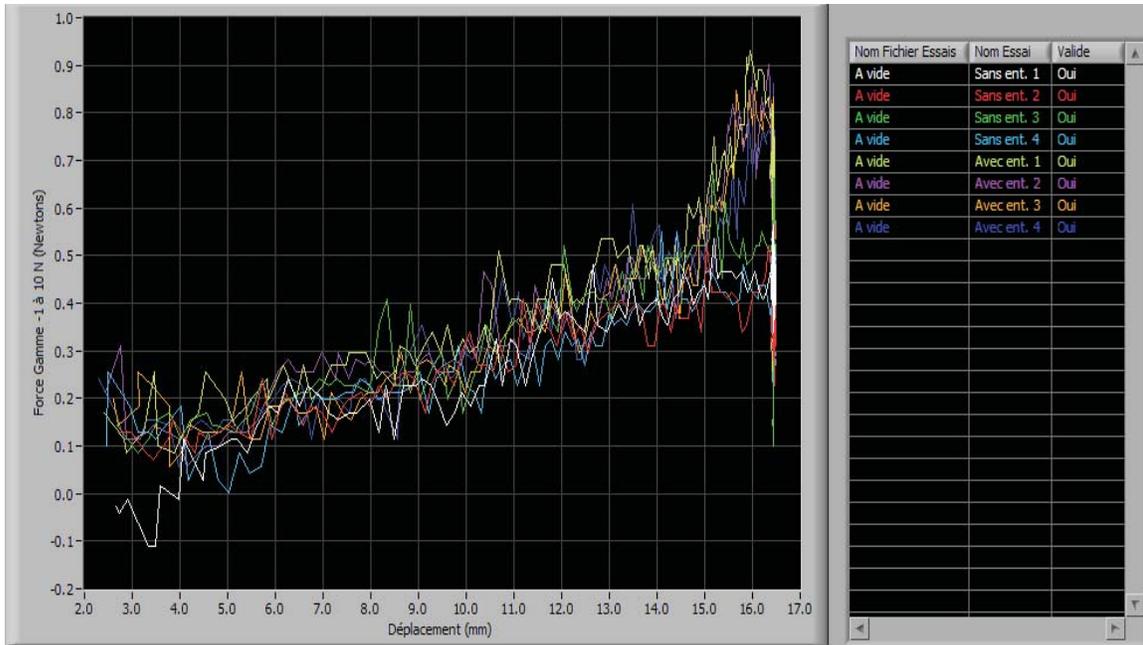
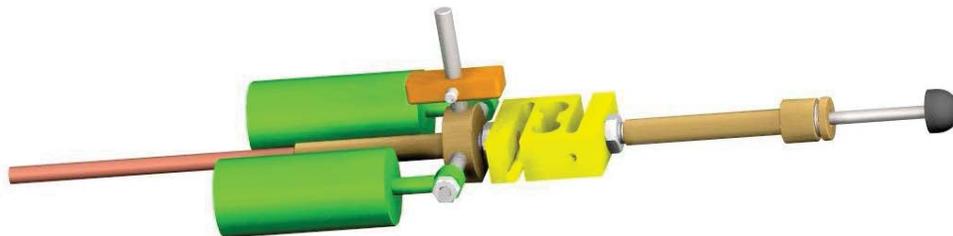


Fig. 48: Curvas de mediciones al vacío con y sin el embudo

Observación: **Sans ent.** : Sin embudo; **Avec ent.:** Con embudo.

Del gráfico de la figura 49, se pueden hacer varias observaciones:

- Las curvas con y sin embudo son relativamente las mismas, excluyendo el ruido o interferencias. Al inicio de la carrera del eje (de 3 a 5 mm), una de las curvas es diferente, pero repitiendo varias decenas de veces (curvas no presentadas en este informe), se constató que las curvas al vacío son reproducibles.
- Cuando se colocó nuevamente el embudo, los valores medidos aumentaron hacia el final de la medición (entre 15 y 16,5 mm). Esto se debe al contacto entre el punzón-cabeza del limitador de fuerza y el embudo, provocado por un mal alineamiento de la parte móvil del mecanismo principal del Indentor (la figura siguiente fue tomada del informe de Stefan Dold). Se estudió modificar la concepción de esta parte afín de corregir este problema de alineamiento.



La parte móvil del Indentor se compone principalmente por:

- Punzón + eje
- Limitador de fuerza (corredera)
- Sensor de fuerza
- Acoplador (corredera + soporte resortes + palanca + cursor)
- Eje del sensor de desplazamiento

Entonces, para disminuir el problema de roce entre el limitador de fuerza y el embudo, es necesario garantizar un mejor alineamiento de la parte móvil en relación a la carcasa (armazón) del Indentor.

Luego de haber realizado las mediciones al vacío, se efectuó una tercera campaña de mediciones. Por falta de tiempo al final de este proyecto, las mediciones se realizaron solamente sobre dos personas voluntarias.

5.2.1 Resultados

De la misma manera que se ha hecho con las campañas 1 y 2, se muestra como ejemplo las curvas encontradas para una persona, en este caso la persona A, sobre el seno derecho medido lateralmente.

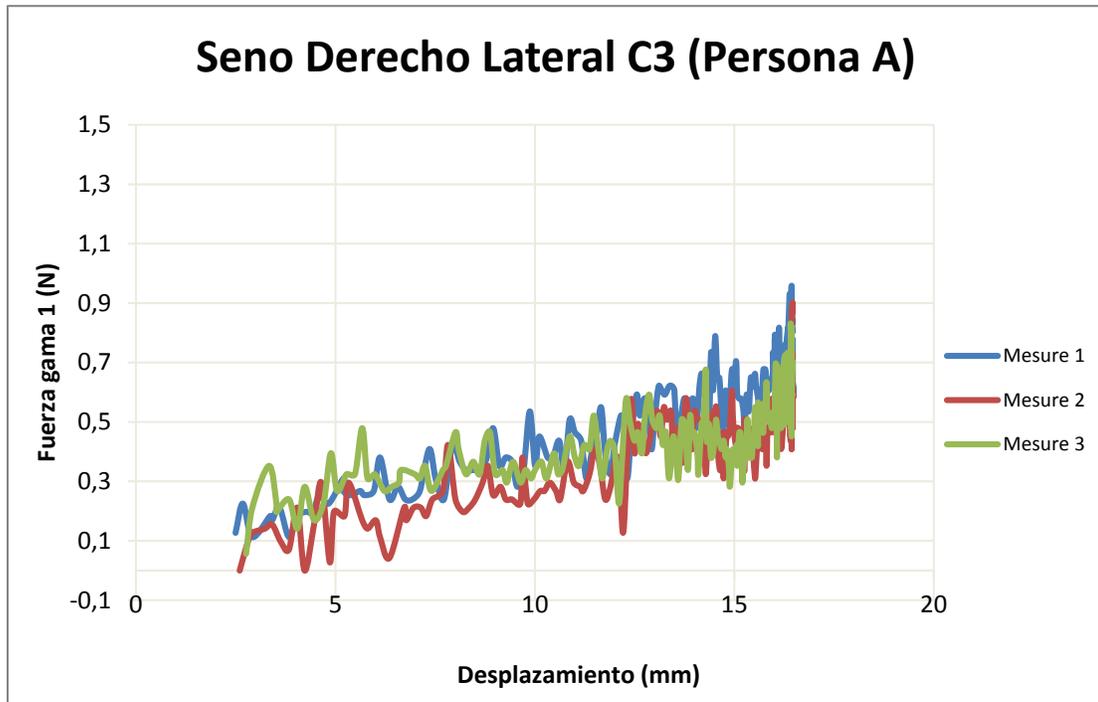


Fig. 49: Curva fuerza/desplazamiento seno derecho medición lateral, campaña 3

La figura 49 muestra el gráfico obtenido. La medición, particularmente al final de la curva, es más repetitiva respecto de las campañas precedentes, esta vez controlando bien la orientación del Indentor, la presión sobre el gatillo y el buen contacto del embudo sobre la piel.

Los resultados comparativos se muestran a continuación.

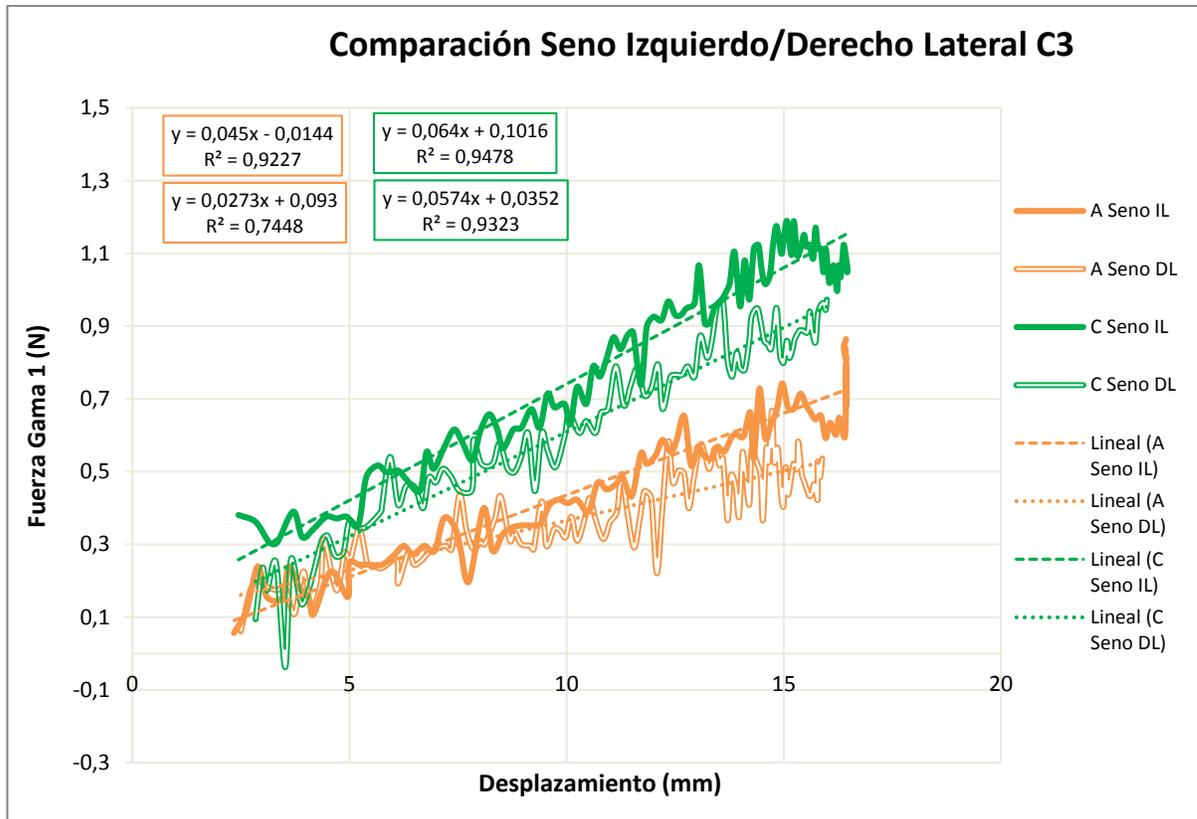


Fig. 50: Gráfico comparación medición lateral del seno entre ambas personas, campaña 3

La figura 50 muestra las curvas obtenidas. En el caso de la comparación de la medición lateral entre el seno izquierdo y el derecho, se puede apreciar que las curvas siguen una trayectoria lineal y son bastante reproducibles. En ambos casos (personas A y C), se puede ver que los valores obtenidos sobre el seno derecho son más bajos que para los del seno izquierdo. Esto se debe tal vez a una diferencia de tamaño entre los senos de cada persona. También se puede ver que los valores al inicio de la medición son casi los mismos para ambos casos, lo que significa que los problemas de roce (entre el punzón y el embudo) fueron en gran medida solucionados.

Enseguida, se hizo la comparación para las mediciones por debajo del seno:

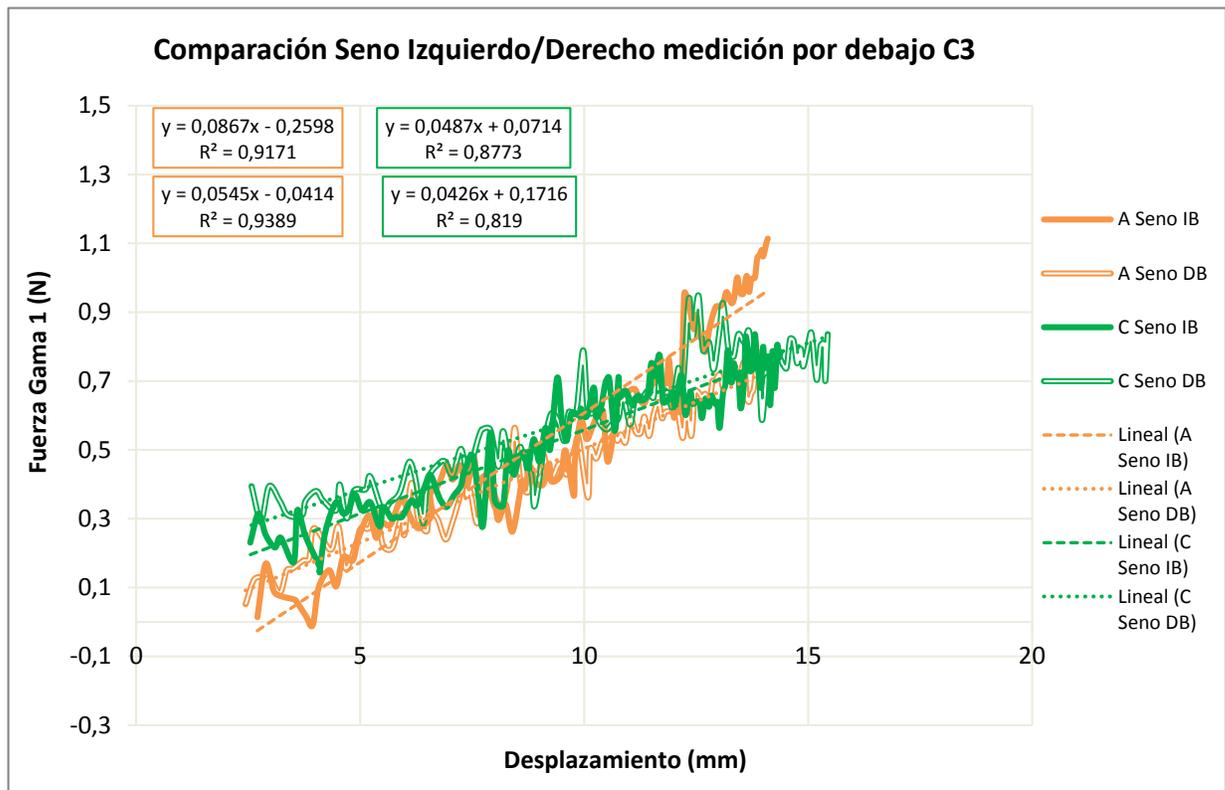


Fig. 51: Gráfico de comparación medición por debajo del seno, campaña 3

Para la comparación de las mediciones realizadas por debajo del seno (Fig. 51), se puede ver que las curvas son muy similares entre los dos senos, son lineales y también bastantes reproducibles. En cambio, hacer esta comparación es más difícil respecto de las mediciones laterales, puesto que en esta posición (casi vertical) se mide también el peso del seno.

Si se hace una comparación entre las mediciones de los senos de la persona A, se puede ver que los valores encontrados para las mediciones hechas de manera lateral son más pequeños que los valores encontrados midiendo por debajo del seno. Esto es debido a que en ésta posición se mide también el peso del seno, lo que hace aumentar el valor final de rigidez.

En esta última campaña de pruebas se pudo constatar que los problemas encontrados en las campañas anteriores fueron corregidos de manera satisfactoria: los valores al inicio de una medición se muestran en ON sobre el panel frontal de LabView para todas las mediciones efectuadas. Por otro lado, las mediciones son más confiables si se mantienen todas las garantías necesarias: mantener el gatillo bien presionado durante la medición, mantener el Indentor horizontal cuando se mide lateralmente y evitar medir el músculo pectoral.

En general, las curvas obtenidas son lineales y repetitivas entre ellas. Se debe tener en cuenta que cuando se mide por debajo del seno, además de medir su rigidez, se mide también su peso, lo que conduce a valores más elevados de rigidez (un seno más grande tendrá un valor más elevado, así como ocurre también con la presencia de prótesis mamarias).

No obstante, existe un pequeño problema de roce al nivel del embudo que hace que la medición no pueda ser aprovechada completamente (en términos de análisis). Además, se constata que en esta tercera campaña las curvas son menos lisas respecto de las dos primeras campañas. Esto puede ser consecuencia tal vez, debido a que el convertidor de 12 bits presente en las dos primeras campañas fue reemplazado por otro convertidor de 10 bits, originando tal vez el aumento de la presencia de ruido o interferencia que puede constatarse en los gráficos recién analizados (fig. 50 y Fig. 51).

Capítulo 6: Mejoras al Indentor

En esta etapa del proyecto, se centró más la atención en encontrar el origen del roce y del ruido o interferencias que provocan ciertas variaciones en los valores de las mediciones sobre la curva trazada de fuerza. Se constató que el limitador de fuerza provoca un pequeño roce sobre la guía cuando se realiza una medición. Existe también un juego un tanto grande entre el diámetro del apoyo del sensor de desplazamiento y el sensor mismo, lo que provoca una pequeña elevación del mecanismo móvil al presionar el gatillo y finalmente la presencia de roce.

Para saber si estas partes mecánicas son el origen del roce (y del ruido) que inciden en los resultados finales de los valores de rigidez del busto femenino, se decidió re-diseñarlos y realizar nuevas mediciones para analizar los resultados.

6.1 Re-diseño del limitador de fuerza y del apoyo del sensor de desplazamiento

En esta primera parte se diseñó un nuevo limitador de fuerza: como no se obtendrá un valor de fuerza mayor a 10 N se decidió anular la función del limitador, y la nueva pieza diseñada sirve solamente de unión entre el sensor de fuerza y el punzón (Fig. 52). Para el apoyo del sensor de desplazamiento se decidió disminuir el diámetro de manera que sea lo más cercano posible al valor del diámetro del sensor.

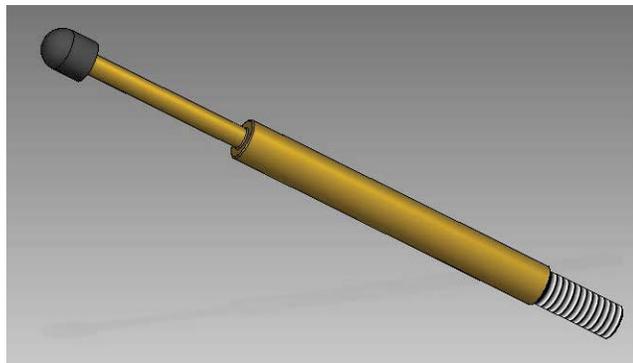


Fig. 52: Diseño de la nueva pieza

(Imagen de la pieza, programa SolidEdge, enero 2014)

Una vez que las piezas fueron creadas, se hizo el montaje del Indentor quedando listo para realizar una nueva campaña de mediciones (campaña número 4). Esta vez el limitador de esfuerzos fue concebido en titanio, con el fin de obtener una pieza más ligera y con propiedades mecánicas mayores.

6.2 Nueva campaña de mediciones

Para esta nueva campaña de mediciones se creó un nuevo protocolo a seguir. Para constatar si la vibración de la mano tenía incidencia en los valores finales medidos, se decidió realizar mediciones utilizando el Indentor fijo (con la ayuda de una prensa), sosteniéndolo con la mano (como en las tres campañas anteriores) y con la máquina de tracción Lloyd FL Plus (Fig. 53), máquina que fue utilizada en la concepción de una primera herramienta de medición en el marco del proyecto final de estudios de la estudiante Elsa DRAI (año 2012).

Por esta razón, se elaboró un nuevo protocolo a seguir tanto por el Indentor como por la máquina de tracción:

1. Posición de medición: la persona está de pie, un poco inclinada hacia adelante, de manera que el Indentor esté lo más vertical posible para efectuar así mediciones que sean lo más reproducibles posible para ambos instrumentos.

2. Ritmo de la respiración: al momento de medir la persona está quieta, sin moverse y conteniendo la respiración luego de haber exhalado.

3. Cantidad de mediciones: inicialmente se efectuará una medición al vacío, y enseguida se harán tres mediciones de manera lateral y tres por debajo del seno (no hay medición lateral para la máquina de tracción).

4. Sensor de fuerza: 10 N para cada instrumento de medición.

5. Curso del punzón: de alrededor 0 a 15 mm.

6. Velocidad de avance: 15 mm/s idealmente para ambos instrumentos.

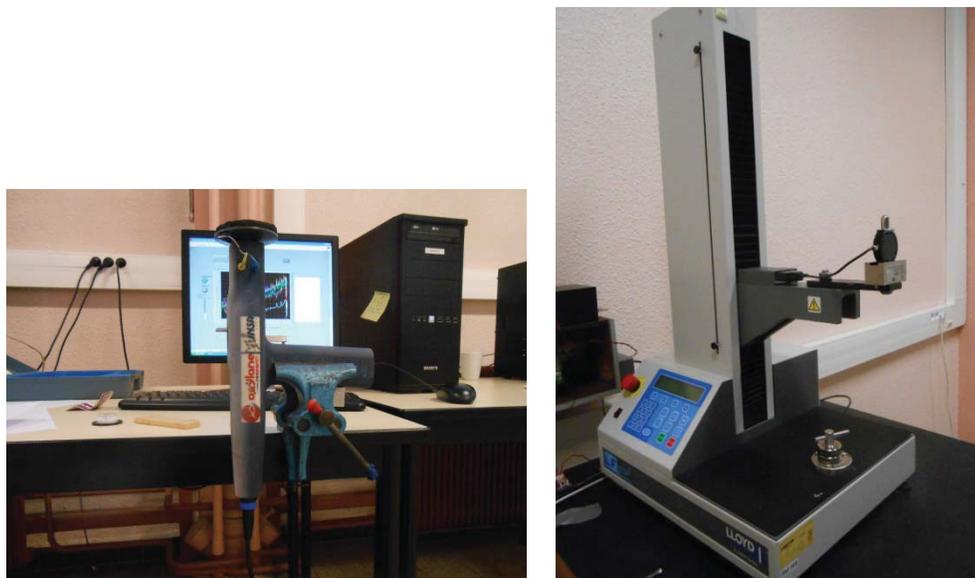


Fig. 53: Posición Indentor fijo y máquina de tracción utilizada

De la misma manera que en las campañas anteriores, se tomaron todos los cuidados necesarios con el fin de realizar mediciones más repetitivas: presionar bien el gatillo, mantener horizontal el Indentor al momento de efectuar la medición lateral y evitar medir una parte del músculo pectoral.

6.3 3. Resultados

En este primer gráfico se muestra, a modo de ejemplo, las curvas encontradas para la persona A sobre el seno derecho e izquierdo medidos por debajo del mismo, con el Indentor fijo y sosteniéndolo con la mano.

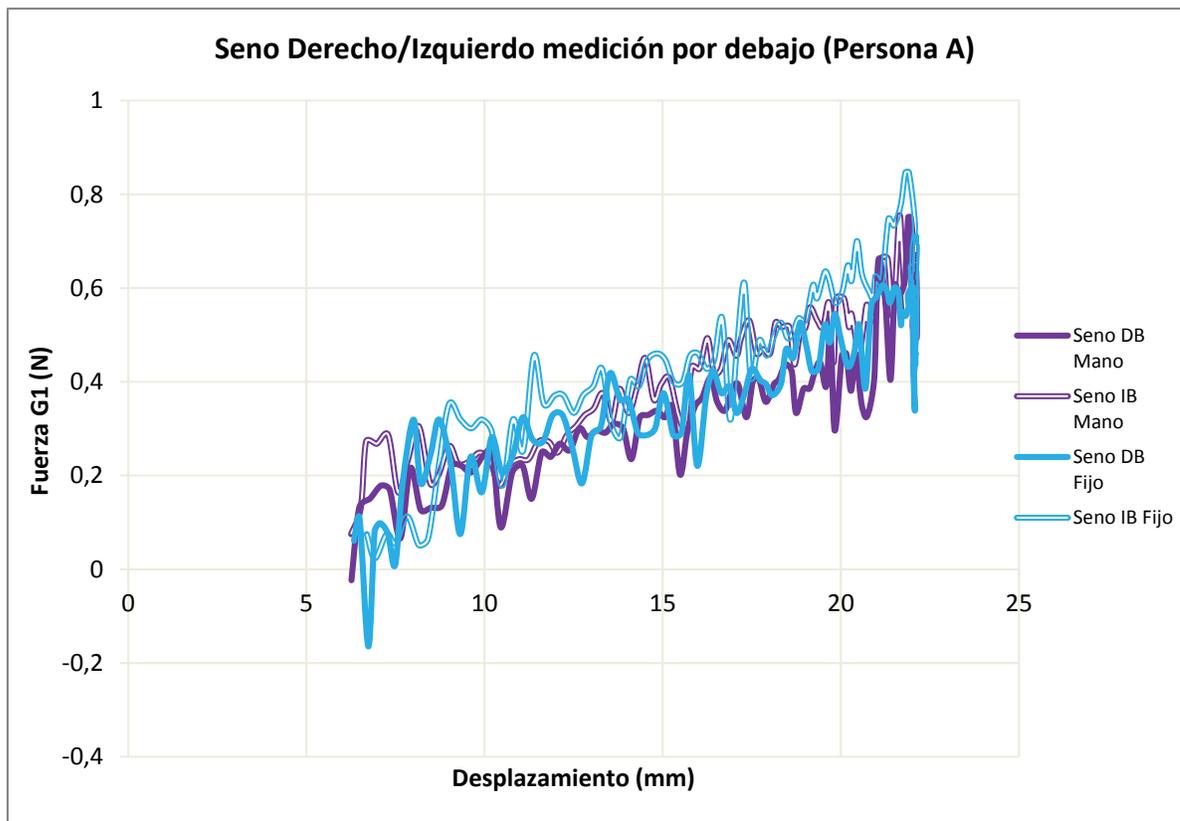


Fig. 54: Gráfico fuerza/desplazamiento senos persona A, campaña 4

Se puede constatar sobre el gráfico (Fig. 54) la presencia de ruido (o interferencias) en las mediciones. Las curvas obtenidas no son lisas y esto no permite hacer un análisis claro del comportamiento de los valores obtenidos, y de realizar una comparación entre ellas.

Para poder analizar bien las curvas obtenidas, se hizo un filtro de ruido de manera de obtener curvas más lisas. No obstante, es necesario señalar que luego de haber cambiado el convertidor 12 bits por el convertidor de 10 bits, un gran ruido apareció en las mediciones, o al menos fue amplificado. Entonces, es necesario estudiar más en profundidad el sistema convertidor y la parte electrónica con el fin de mejorar y, en la medida de lo posible, minimizar el ruido existente en las mediciones finales efectuadas por el Indentor.

Para apreciar curvas más lisas, se realizó un filtro de ruido de manera de ver sobre el gráfico si las pendientes de cada curva son reproducibles o no. Entonces, los gráficos a continuación son presentados utilizando un filtro para el ruido.

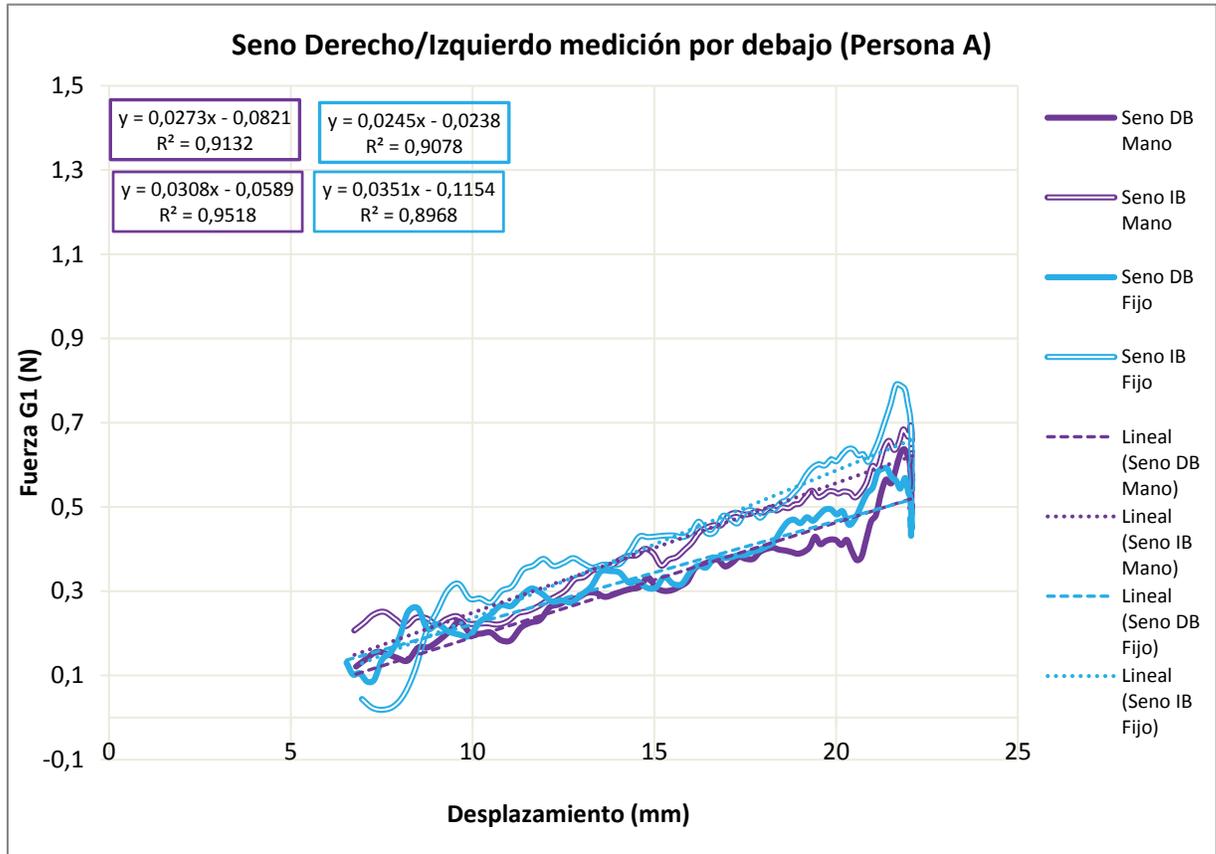


Fig. 55: Gráfico seno derecho medido por debajo, persona A

Del gráfico se puede observar (Fig. 55) que las mediciones son más reproducibles, ya sea teniendo el Indente fijo o sosteniéndolo con la mano, controlando bien la orientación del Indente, la presión sobre el gatillo y el buen contacto del embudo sobre la piel. También se puede deducir que los valores de vibración, cuando se hace la medición con la mano, no son determinantes en los valores finales de rigidez de seno, por lo que no representa una fuente de ruido o interferencias que pueda afectar en gran medida.

Se puede ver también que el ritmo de respiración tampoco representa una fuente de ruido. Entonces, se puede decir que si los orígenes de ruido o interferencias presentes en las

mediciones no provienen de la vibración de la mano o de la respiración de la persona al momento de hacer una medición, se deduce que el origen del ruido sigue siendo probablemente la tarjeta electrónica.

Por otro lado, se puede ver que las curvas son bien similares para ambos senos, siendo los valores ligeramente mayores para las mediciones por debajo, esto puede explicarse a que también se mide el peso del seno en esta posición.

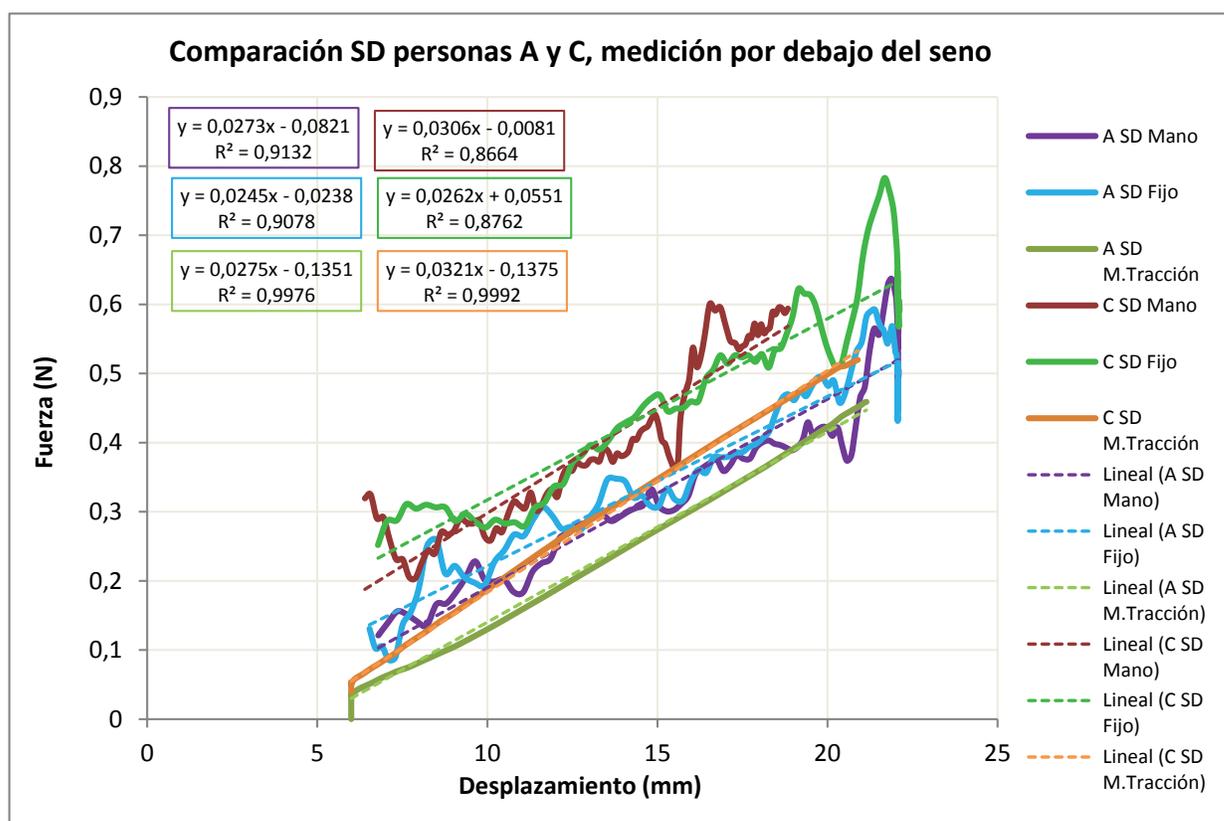


Fig. 56: Gráfico comparación seno derecho medido por debajo, personas A y C

En un segundo gráfico (Fig. 56), se puede ver una comparación de las mediciones realizadas por debajo del seno derecho de las personas A y C. Las mediciones fueron efectuadas con el Indentor fijo, el Indentor sosteniéndolo con la mano y con la máquina de tracción. Se hizo también un filtro de ruido/interferencias para hacer una mejor comparación entre las curvas.

Las mediciones para cada persona son repetitivas. Si se hace una comparación entre las dos personas se puede ver aún que las curvas son reproducibles. Se puede decir que los valores de roce son minimizados y que las pendientes entre cada una de las curvas son similares (la regresión lineal de las mediciones de la máquina coinciden con las mediciones hechas por el Indentor).

Es decir, no existe una fuerte incidencia de la pequeña vibración que el movimiento de la mano puede ocasionar en las mediciones, y finalmente no es un origen del ruido o interferencia. De la misma manera, se puede decir que se mejoró al menos el alineamiento de la parte móvil del Indentor y el roce fue minimizado con las nuevas piezas creadas.

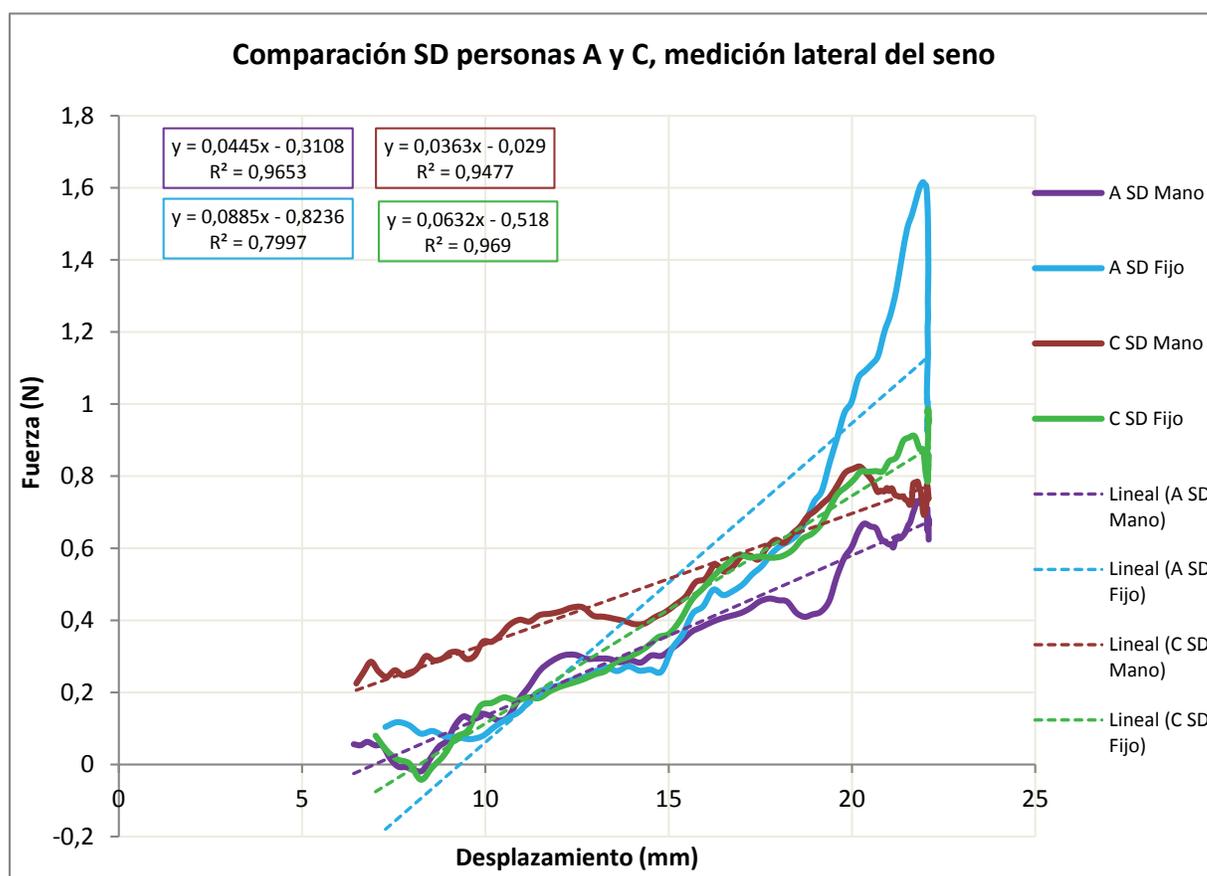


Fig. 57: Gráfico comparación seno izquierdo medido lateralmente, personas A y C

El gráfico de la figura 57 muestra las mediciones realizadas de manera lateral sobre el seno derecho de las dos personas evaluadas.

Se observa que para la persona A, cuando se hizo la medición del seno con el Indentor fijo, la curva aumenta hacia el final de la carrera del punzón. Esto se debe a que se midió el músculo pectoral incluso tomando todos los cuidados necesarios para evitarlo. Es por esto que se debe prestar mucha atención al momento de realizar mediciones con el Indentor para evitar así tocar el músculo, sobre todo cuando el tamaño del seno es pequeño (es bastante difícil de mantener bien controlada la posición del Indentor en este caso, pero es necesario encontrar el buen control para realizar así una medición totalmente válida).

Las mediciones realizadas con el Indentor sosteniéndolo con la mano son levemente superiores para la persona C, pero para las mediciones realizadas con el Indentor fijo los valores resultaron ser muy similares para ambas personas. Esto puede deberse a que estando el Indentor fijo las mediciones pudieron ser más exactas, deduciendo así que para ambas personas, con un tamaño similar de busto, la medición lateral es bien representativa de la rigidez del busto cuando no se mide el músculo pectoral.

Conclusión

Para mejorar el funcionamiento del Indentor precedente con el fin de conocer el comportamiento de tejidos blandos, particularmente el busto femenino, se modificaron los componentes electrónicos, la programación y el protocolo de utilización del Indentor. Durante este período, se concentró en mejorar el diseño del Indentor, tanto del sistema electrónico, programación y análisis de los datos, como también parte de la concepción de la parte móvil del sistema mecánico. Los resultados obtenidos acercan al diseño final de esta herramienta.

Las diferentes campañas efectuadas con la cooperación y participación de 6 personas, ayudaron a entender mejor el comportamiento del busto femenino, así como obtener mediciones más confiables y reproducibles de la rigidez de los senos. Por otra parte, queda de manifiesto que ningún busto femenino es igual a otro. La composición corporal de cada mujer es única y por lo tanto, lo es también el comportamiento de su busto. Sin embargo, ha sido posible constatar que la rigidez del busto tiende a ser mayor en mujeres con prótesis mamarias.

Por otro lado, la explotación de los datos sobre el programa LabView permite seguir en tiempo real todas las mediciones hechas por el usuario, siendo el Indentor una herramienta con un proceso sencillo de realizar y con el cual se puede obtener buenos resultados.

Al final de este período, se presentó a Oxylane Research el nuevo Indentor fruto del trabajo en conjunto con el laboratorio LaMCoS, y se pudo entregar una herramienta que responde a las necesidades demandadas por el cliente.

Desde un punto de vista personal, este trabajo me ha servido para desarrollar mis conocimientos y también para adquirir otros nuevos. El desarrollo de nuevas herramientas de aprendizaje como la programación, fue un desafío que acepté con mucho placer; la responsabilidad de trabajar en equipo y la confianza entregada para realizar este proyecto fue un marco ideal que aprecié y aproveché considerablemente.

Recomendaciones

Después de haber hecho hincapié acerca de todos los cuidados que se deben tomar para realizar mediciones más reproducibles, es necesario hacer ciertas observaciones sobre la utilización del Indentor, y por lo tanto elaborar un protocolo a seguir en cada una de las campañas de mediciones a efectuar: el gatillo bien presionado, controlar bien el Indentor al momento de hacer una medición, realizar siempre una medición al vacío antes de medir el seno ya sea de manera lateral o por debajo del mismo, ritmo de respiración y posición de la persona.

Sobre el diseño del Indentor, es necesario rediseñar algunas piezas con el fin de minimizar completamente el roce provocado por la guía axial, por la nueva pieza que reemplazó al limitador de esfuerzo, y principalmente mejorar el alineamiento de la parte móvil de la herramienta, porque se puede constatar que ésta es responsable en gran medida del roce presente entre el limitador y su guía, alterando así los reales valores de rigidez medidos por el Indentor sobre el seno

Finalmente, es necesario re-evaluar el sistema electrónico actual con el fin de encontrar una solución para disminuir al máximo las interferencias (ruido) presentes en las curvas obtenidas en cada medición.

Bibliografía

- TAVERNIER Christian (2011) – « *Arduino: Maîtrisez sa programmation et ses cartes d'interface (shields)* »
- DOLD Stefan (2012/2013) – « *Conception et réalisation d'un Indenteur portatif pour le caractériser les lois de comportement des matières molles du corps humain* » (INSA de Lyon)
- <http://www.arduino.cc/> - Programación Arduino Nano
- <http://www.ni.com/> - Programación y ayuda sobre el programa informático LabView
- Foro sobre internet para la programación de LabView
- Documentos de los componentes electrónicos
- Proyectos de Fin de Estudios precedentes INSA de Lyon

Programas Informáticos utilizados

- Arduino (Licencia INSA de Lyon) – Programación de Arduino
- LabView (Licencia INSA de Lyon) – Programación Indentor
- SolidEdge (Licencia INSA de Lyon) – Diseño piezas mecánicas
- Microsoft Office (Licencia privada) – *Word*: redacción del informe; *Excel*: cálculos y gráficos.

Anexo 1: Control y Comunicación entre Arduino y LabView.

A continuación se describen las etapas ejecutadas para realizar la conexión entre Arduino y LabView:

- Se debe instalar el Toolkit Arduino para LabView que National Instruments (NI) ha creado con este fin. Este toolkit contiene los complementos NI Visa (permite la configuración, programación y solución de problemas por medio de distintas interfaces de comunicación) y VI Package Manager (funciona como administrador de contenido y descarga para librerías y kits de herramientas para LabView). Se debe instalar ambos complementos para poder establecer la comunicación entre el computador y el Indentor.
- Una vez instalado, se debe abrir el programa VI Package Manager, y se debe localizar y seleccionar “LabView Interface for Arduino” para proceder a su instalación (Install Package).
- Para que LabView pueda estar comunicado con Arduino es necesario transferir en la memoria de la tarjeta Arduino el programa *LIFA_Base* (que por defecto es instalado en el proceso de descarga del TOOLKIT Arduino para LabView). Importante: antes de cargar este programa, se debe seleccionar el tipo de tarjeta Arduino que se tenga (en este caso Arduino Nano ATmega328) y el puerto COM al cual se conectará (puede verificar el reconocimiento del puerto USB de Arduino en el administrador de dispositivos de Windows). Esto se efectúa en la plataforma de Arduino: ir a herramientas → tarjeta → Arduino Nano ATmega 328. Luego dirigirse nuevamente a herramientas → puerto serial → seleccione COM al cual está conectado Arduino.
- Enseguida, en la plataforma de LabView se programan las instrucciones necesarias para el funcionamiento del Indentor. Es decir, se escriben todas las funciones que la herramienta debe utilizar.
- También debe configurarse la velocidad de comunicación entre LabView y Arduino en la plataforma de LabView.

- Finalmente, se constata que la comunicación entre Arduino y LabView es correcta realizando pequeñas instrucciones sobre LabView de manera que el Indentor las pueda ejecutar, como por ejemplo, encender y apagar un LED (para hacer esto, no es necesario ocupar el Indentor; se puede efectuar conectando una tarjeta Arduino con un LED al computador y verificar que las funciones creadas son ejecutadas correctamente).

Anexo 2: Planos adjuntos