



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**  
**Facultad Regional Concepción del Uruguay**  
**INGENIERIA ELECTROMECHANICA**

**PROYECTO FINAL DE CARRERA**  
**( P F C )**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE**  
**DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE**  
**HORMIGON ARMADO**

Proyecto N°: PFC 1510D

**Autores:**

**Bochatay Alejo Lepoldo**

**Tutor:**

**Rougier Viviana Carolina**

**Dirección de Proyectos:**

**Ing. Puente, Gustavo**

**Ing. De Marco, Luis**

**AÑO 2016**

### Abstract

The purpose of this research is to automatize the measurement of concrete specimens' deformation which is tested in the civil engineering laboratory of UTN FRCU; our aim is to measure the strain with accuracy down to a micron.

In order to calculate the deformation, we decided to use Strain gauges since they can easily be used to build a low-cost and reusable rugged sensor, which later on is attached to the specimen.

Using an Analog-to-Digital Converter we are able to measure the Strain gauges' deformation, and the acquired data is transferred to a computer through a microcontroller.

The software allows us to visualize real-time data and once the test has ended, it produces an Excel spreadsheet with the previously mentioned data.

El presente trabajo surge a partir de la necesidad de automatizar las mediciones de deformaciones en especímenes ensayados en el laboratorio de Ing. Civil de la UTN FRCU, con un grado de exactitud cercano al micrón.

Para evaluar las deformaciones se optó por utilizar galgas extensiométricas debido la facilidad que presentan para crear un sensor robusto, reutilizable y de bajo costo que posteriormente se adhiere al espécimen a ensayar.

Mediante un conversor analógico digital se toma la deformación de las galgas y los datos son transferidos a la computadora por medio de un microcontrolador.

La interfaz de usuario (software) permite visualizar los datos en tiempo real y, una vez finalizado el ensayo, crea una planilla de Excel con los mismos.

## 1.1 Introducción

Debido a la necesidad de automatizar la medición de deformación en “especímenes” ensayados en el laboratorio de Ingeniería Civil de la UTN FRCU.

El Grupo de Investigación de Mecánica Computacional y de Estructuras GIMCE de la facultad ensaya probetas y vigas de hormigón reforzadas o reparadas con plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) o con fibra de carbono (PRFC).

En estos ensayos es necesario medir la deformación que sufren las probetas o vigas a medida que se aplica una cierta carga.

El método actual en los ensayos a las probetas consiste en colocar tres comparadores en torno a ellas y a medida que la carga aplicada aumenta, los becarios toman los datos de los tres comparadores.



Figura 1: Probeta con comparadores

Un método similar se utiliza con las vigas, con la diferencia que se usa un solo comparador dispuesto debajo de la viga con el fin de medir la flecha en el centro de ésta.



Figura 2: Viga y comparador

### 1.2 Situación problemática

- Ensayo compresión de probetas
  - Errores de lectura de los instrumentos de medición
  - Discontinuidad en la lectura por cuestiones de seguridad, durante los ensayos de probetas se toman lecturas cada 500 Kg y solo mientras se encuentran sometidas a cargas menores de 10 toneladas. Una vez que se supera esa carga se deja de medir la deformación por cuestiones de seguridad, perdiéndose información del comportamiento de la probeta cuando se somete a cargas cercanas a la rotura.
  - Se requieren 4 personas para realizar el ensayo, tres para leer cada uno de los comparadores y otra para avisarle a las restantes que la máquina alcanzó la carga.
  - Daños en los comparadores como los ensayos no pueden ser detenidos una vez iniciados, no se pueden retirar los comparadores y cuando ocurre la rotura de la probeta, es frecuente que también se dañe alguno de los comparadores.
  - Imposibilidad de medir el Módulo de Poisson por no contar con los medios necesarios para medir el ensanchamiento de las probetas
- Ensayo vigas
  - Errores de lectura de los instrumentos de medición
  - Discontinuidad en la lectura durante los ensayos de vigas se toman datos cada 200 Kg hasta que la viga presenta fisuras. En ese momento se retira el comparador que mide la flecha para evitar la rotura de éste.
  - Se requieren 2 personas para realizar el ensayo, una para leer el comparador y otra para avisarle que la máquina alcanzó la carga.

## PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

---

- Dificultad en la preparación del ensayo. La mesa de la máquina de ensayos no cuenta con el ancho suficiente para colocar los apoyos de las vigas a ensayar. Por lo que es necesario extender la mesa con el uso de un perfil IPN 400.



Figura 3: Viga IPN400 sobre máquina de ensayos



Figura 4: Apoyos ensayo de vigas

Además de los problemas enumerados anteriormente es necesario que dos personas manipulen los especímenes para ser colocados en la máquina de ensayos debido a su peso.

## 1.3 Objetivos y alcances

### Objetivo Principal

- Automatizar la toma de datos.

### Objetivos Secundarios

- Aumentar la seguridad del ensayo.
- Aumentar la precisión y cantidad de datos a analizar.
- Facilitar la colocación y sujeción de los especímenes sobre la máquina de ensayos.

### Alcances

Como el grupo de investigación cuenta con un presupuesto limitado se descarta la posibilidad de adquirir los sensores y la electrónica asociada a ellos. Esta decisión se toma además por cuestiones técnicas que se detallarán más adelante.

Por lo tanto los alcances de este trabajo son:

- Contempla
  - Construcción y calibración de sensores y la electrónica.
  - Programación de la interfaz de usuario.
  - Ingeniería de detalles de los sensores, la electrónica, software y anclajes mecánicos.
  - Realizar un presupuesto y compararlo con instrumentos en plaza.
- No contempla
  - La máquina de ensayos.

Parte II

INGENIERÍA BÁSICA

## II INGENIERÍA BÁSICA

2.1	Sistema de medición .....	8
2.2	Electrónica.....	8
	Esquemático.....	9
	Programación microcontrolador .....	10
2.3	Interfaz .....	11
	Diagrama de flujo.....	12
2.4	Anclajes .....	15

## 2.1 Sistema de medición

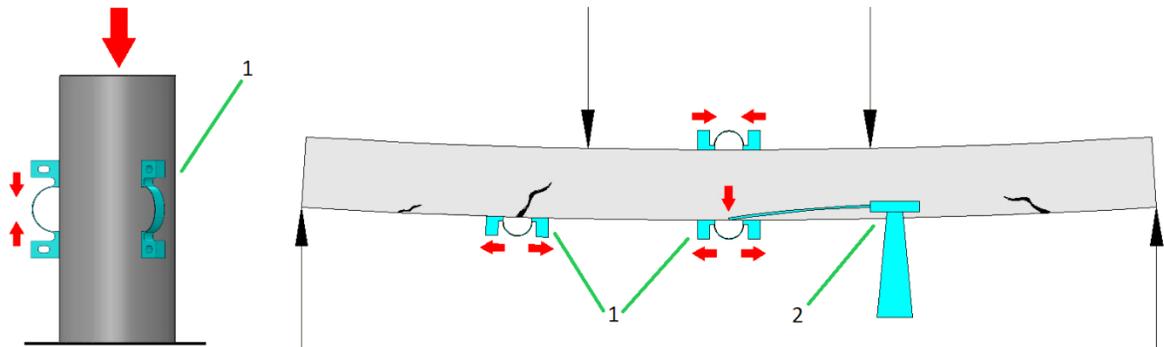


Figura 5: Mediciones posibles

Para realizar las mediciones se propone fabricar dos sensores distintos, uno encargado de sensar pequeñas deformaciones (menos de 2 mm) y otro capaz de medir deformaciones de hasta 10 cm.

El sensor de pequeñas deformaciones es el que aparece indicado con el número 1, mientras que el de grandes deformaciones es el número 2.

Las mediciones que se podrán realizar con estos sensores son las siguientes

- Con las omegas (pequeñas deformaciones):
  - Compresión de la probeta o fibra superior de la viga
  - Elongación de las fibras inferiores
  - Propagación y ensanchamiento de grietas
  - Deformación de los refuerzos
- Con el sensor de grandes deformaciones:
  - Flecha (descenso de la viga)
  - Cualquier deformación o desplazamiento que sufra el espécimen ensayado respecto de la mesa o punto de sujeción del sensor.

## 2.2 Electrónica

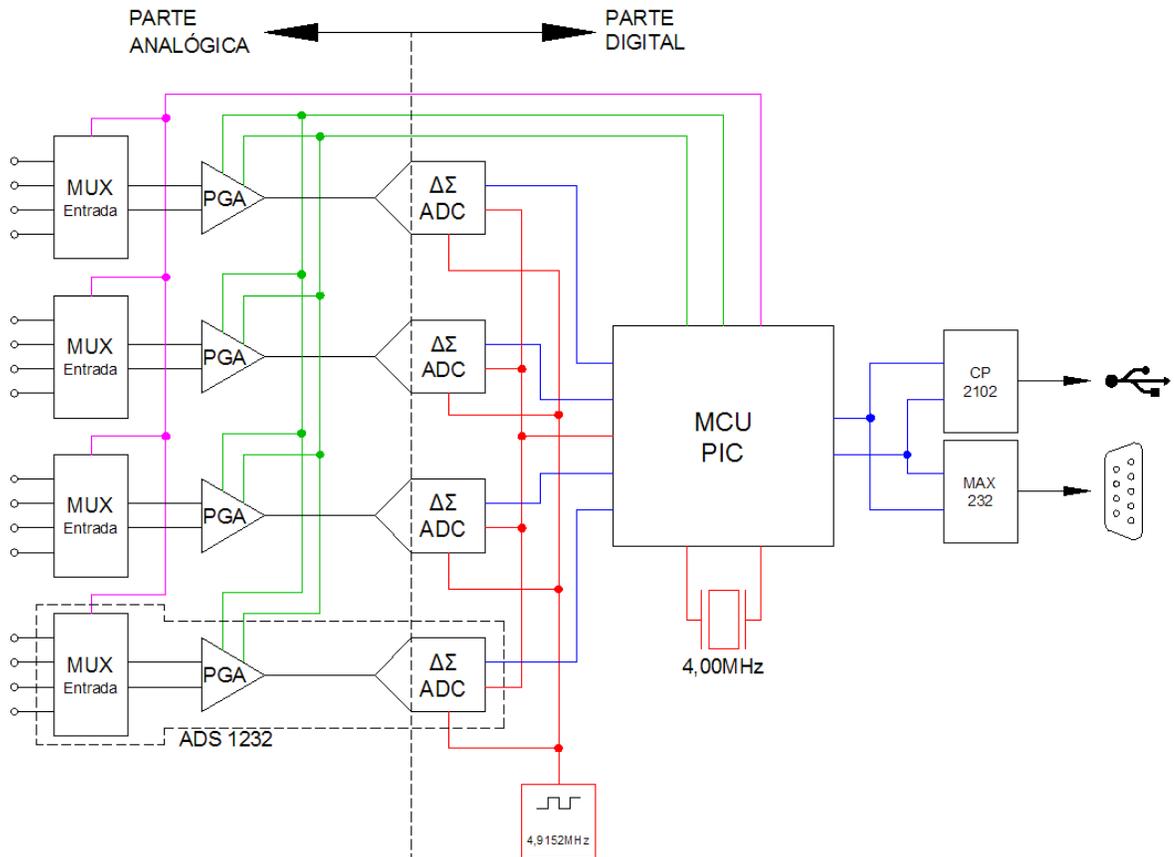
La plaqueta electrónica será la encargada de tomar y digitalizar los datos de los sensores y enviarlos a la computadora.

La cantidad máxima de sensores que se necesitan simultáneamente son tres, por lo que se incluirá un canal analógico más en la plaqueta por si en un futuro surge un ensayo en el que sea necesario utilizar cuatro sensores.

Se diseñará la plaqueta para que no solo se le puedan conectar los sensores diseñados en este proyecto, sino que también se le puedan conectar celdas de cargas o cualquier sensor cuya salida sea en tensión continua y no superior a los 5V.

# PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

## Esquemático



La electrónica se encuentra dividida en dos zonas, una analógica y otra digital. En la primera la señal es tomada del sensor, pasa por un filtro analógico de primer orden con una frecuencia de corte de 720Hz e ingresa a un amplificador que es capaz de multiplicar la señal de entrada por 1; 2; 64 o 128.

Esta señal amplificada es luego convertida por un conversor analógico-digital y, ya en formato digital, es nuevamente filtrada para quitar todo tipo de ruido eléctrico que el sensor pueda captar.

Una vez realizado todo el procesado de la señal, esta es enviada a la computadora a través de un puerto serie RS-232 o por USB 2.0.

Programación microcontrolador

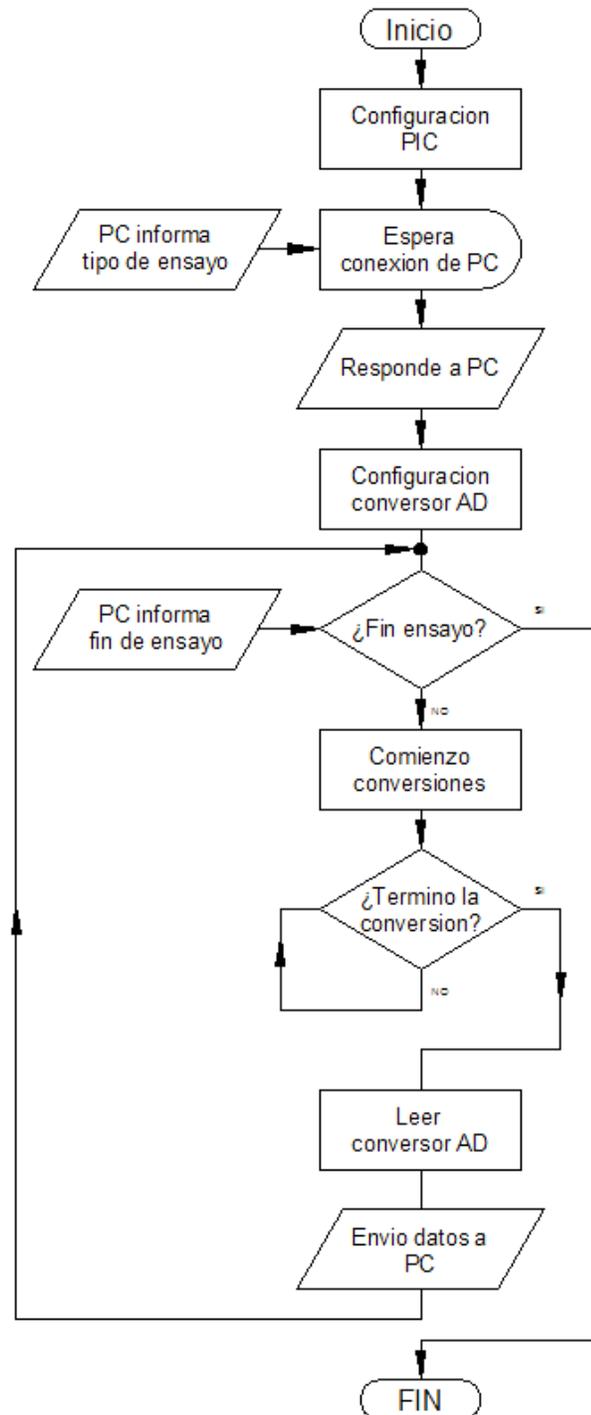


Figura 6: diagrama flujo microcontrolador



Diagrama de flujo

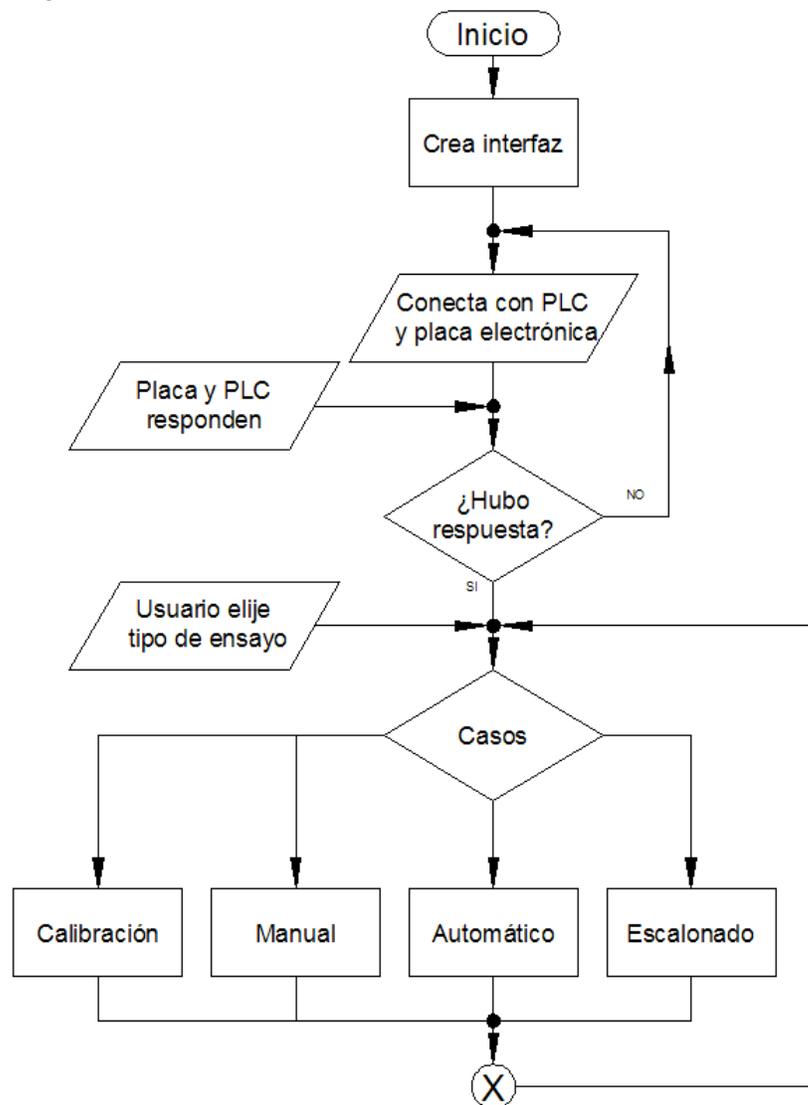


Figura 8 Diagrama flujo general SCADA

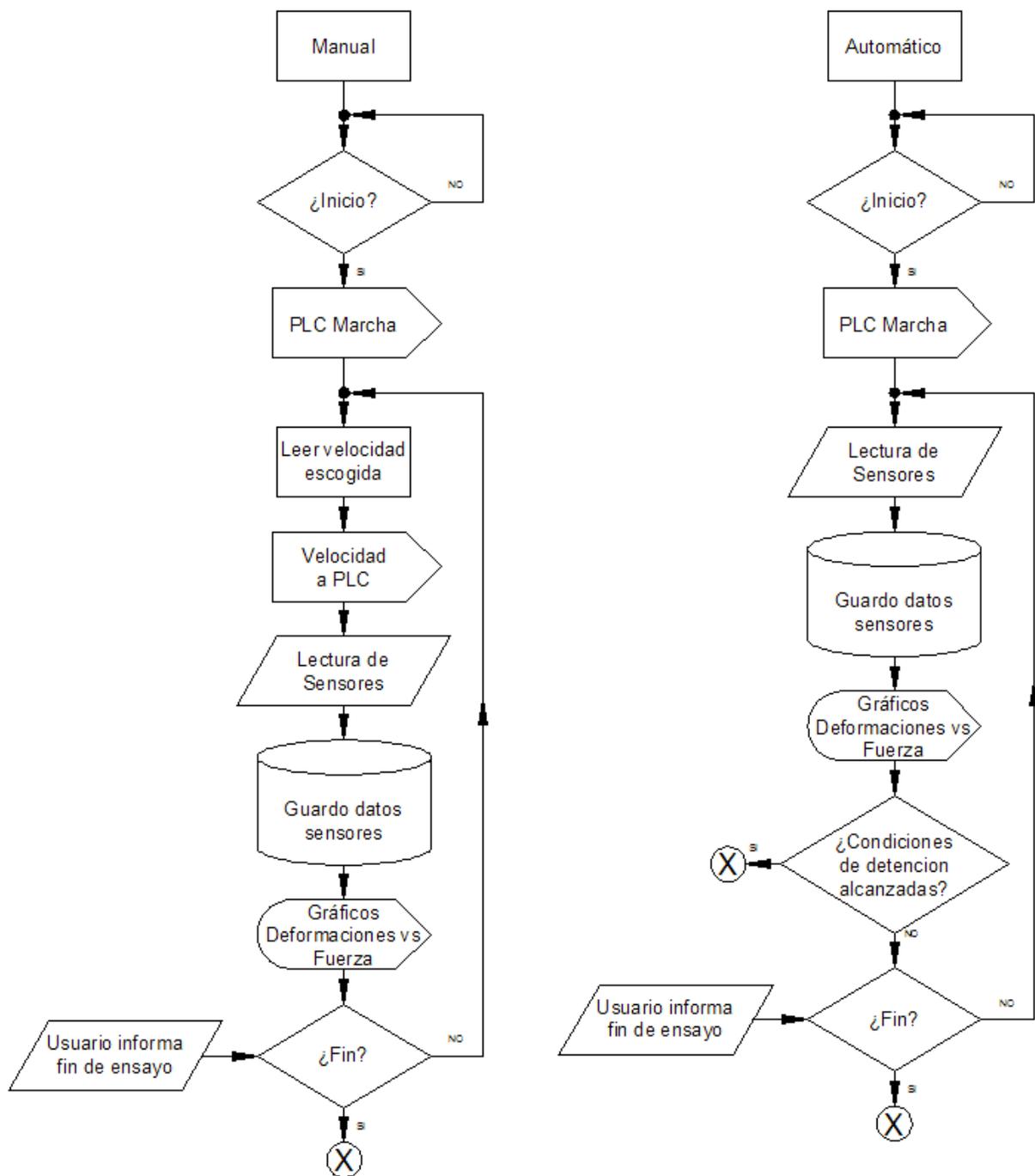


Figura 9 Diagrama flujo casos Manual y Automático

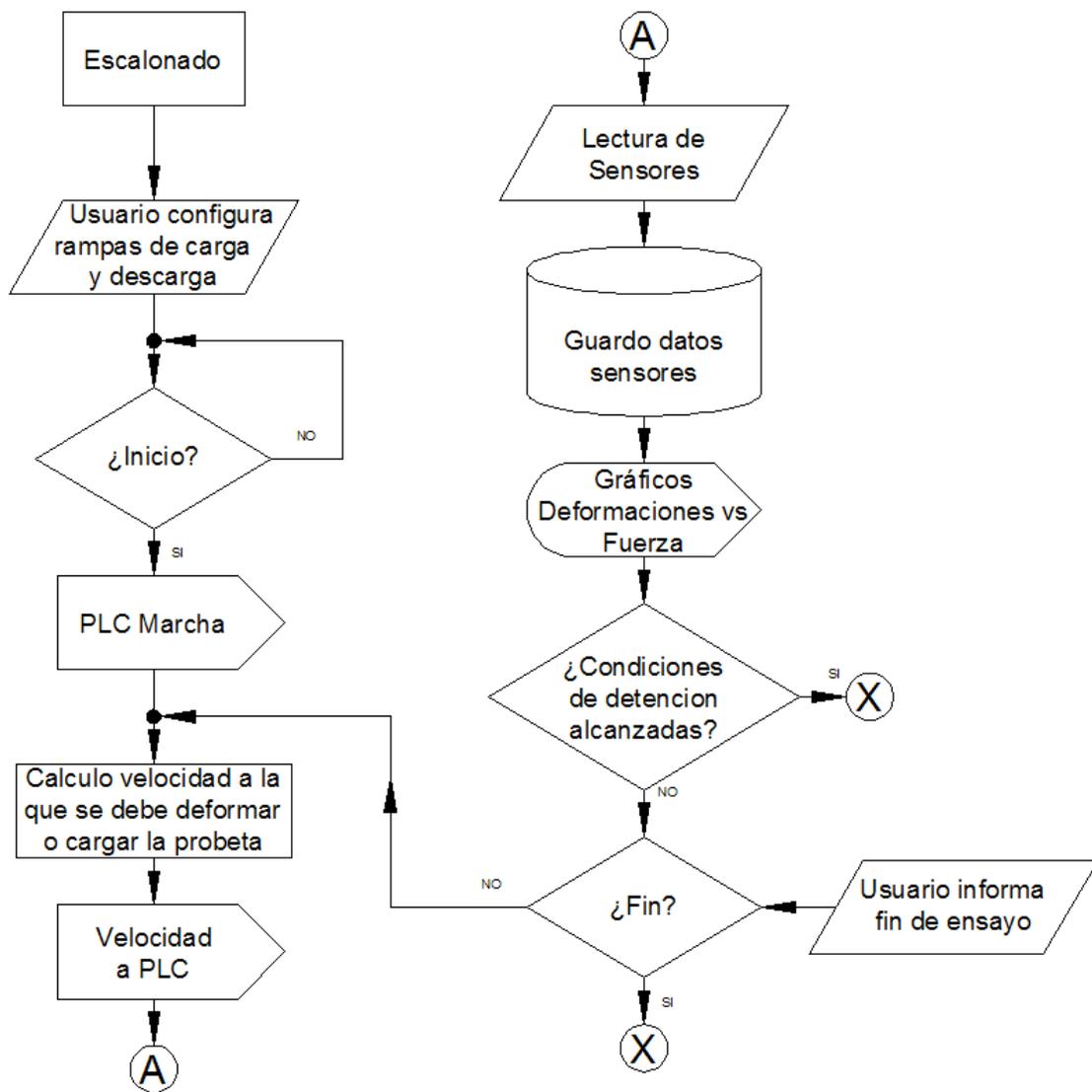


Figura 10 Diagrama flujo caso Escalonado

## 2.4 Anclajes

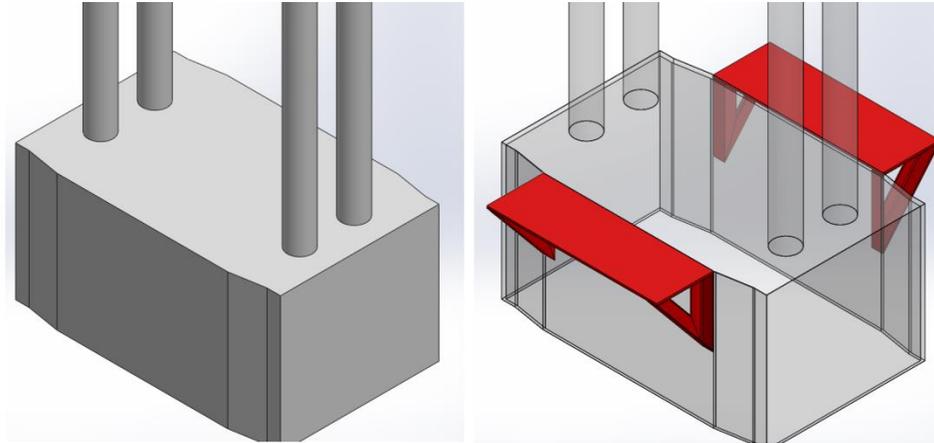


Figura 11 Esquema de la mesa de la máquina de ensayo y la ampliación propuesta

La mesa de la máquina de ensayos mide 700mm y se propone extenderla para que alcance los 1200mm. Permitiendo así apoyar las vigas de 1100mm de longitud.

Las vigas ensayadas son de pequeña sección y no soportan cargas de más de 5.000 Kg. Lo que supone unos 2.500 Kg por apoyo.

El perfil utilizado actualmente para extender la mesa sufre una deformación cercana al milímetro cuando se aplica la carga de rotura de las vigas. Se propone que las ménsulas utilizadas para extender la mesa se deformen menos de 5 centésimas de mm al aplicarle 2.500Kg.

## Parte III

# INGENIERÍA DE DETALLES

### III INGENIERIA DE DETALLES

3.1	Transductores.....	18
3.2	Sensor pequeñas deformaciones .....	18
	Mecanizado del sensor.....	18
	Armado del sensor .....	19
3.3	Sensor grandes deformaciones .....	20
	Placa.....	20
	Fleje.....	21
	Armado del sensor .....	22
	Conexión eléctrica de los sensores.....	23
3.4	Electrónica.....	24
	Componentes.....	24
	Plaqueta .....	24
3.5	Programación.....	24
	Microcontrolador .....	24
	Interfaz.....	24
3.6	Anclajes .....	25
	Ménsulas.....	25
	Bastidor.....	25
3.7	Costos.....	25
	Electrónica .....	25
	Anclajes.....	26
	Sensores.....	26
	Total .....	26

### 3.1 Transductores

Las galgas extensiométricas que se usan son:

Marca: HBM

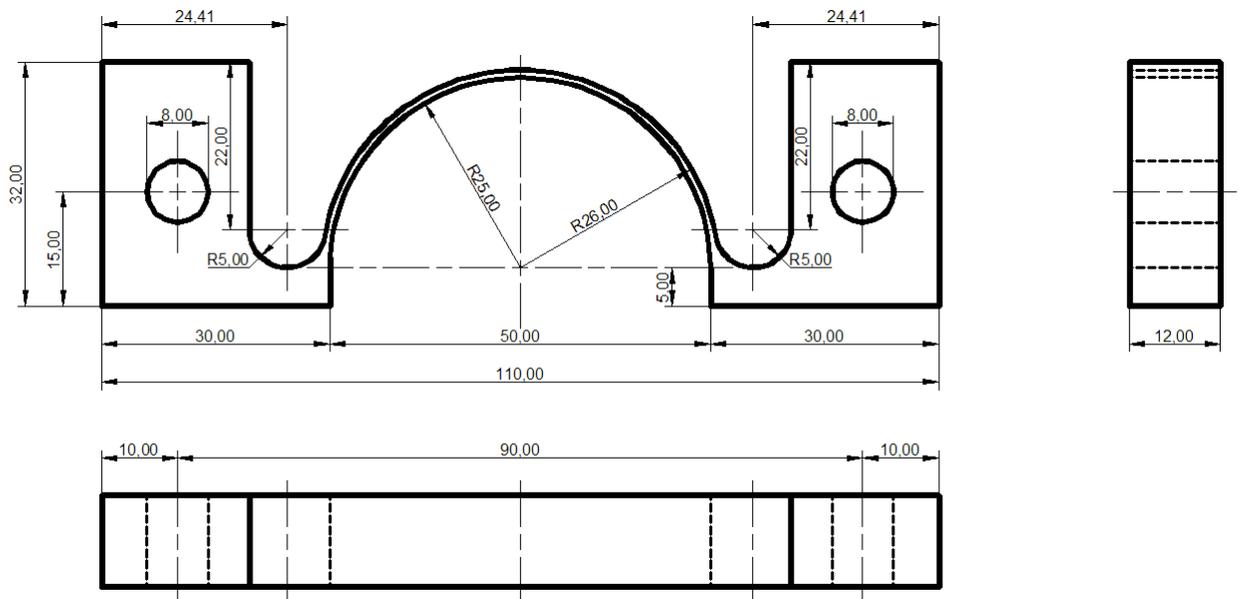
Modelo 1-LY11-6/120

Sus características principales son 6mm de grilla y 120Ω de resistencia eléctrica.

### 3.2 Sensor pequeñas deformaciones

#### Mecanizado del sensor

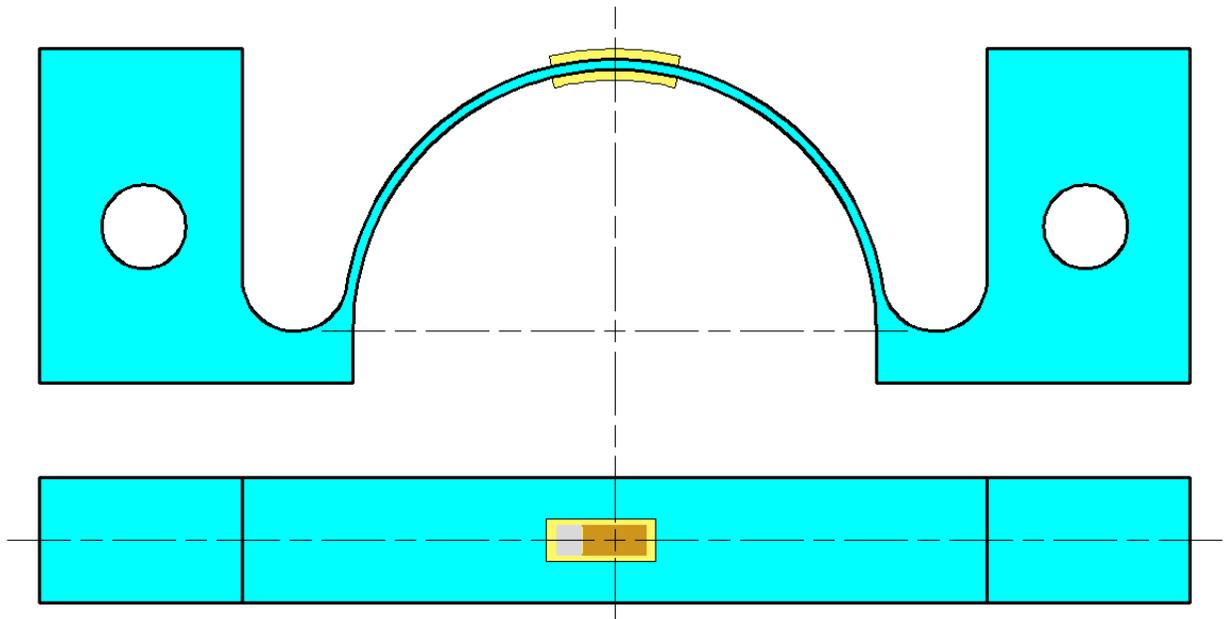
Fabricado a partir de SAE 1040 recocido a 850°C.



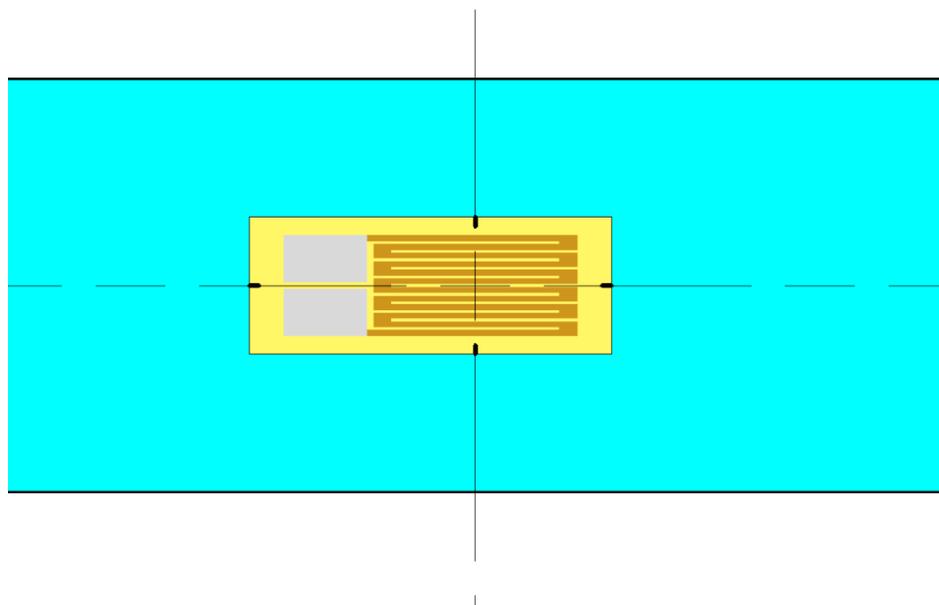
El código G para el fresado del sensor así como de la base para sujetarlo a la fresa se encuentra en el anexo I.

### Armado del sensor

Se deben adherir dos galgas extensiométricas por sensor.



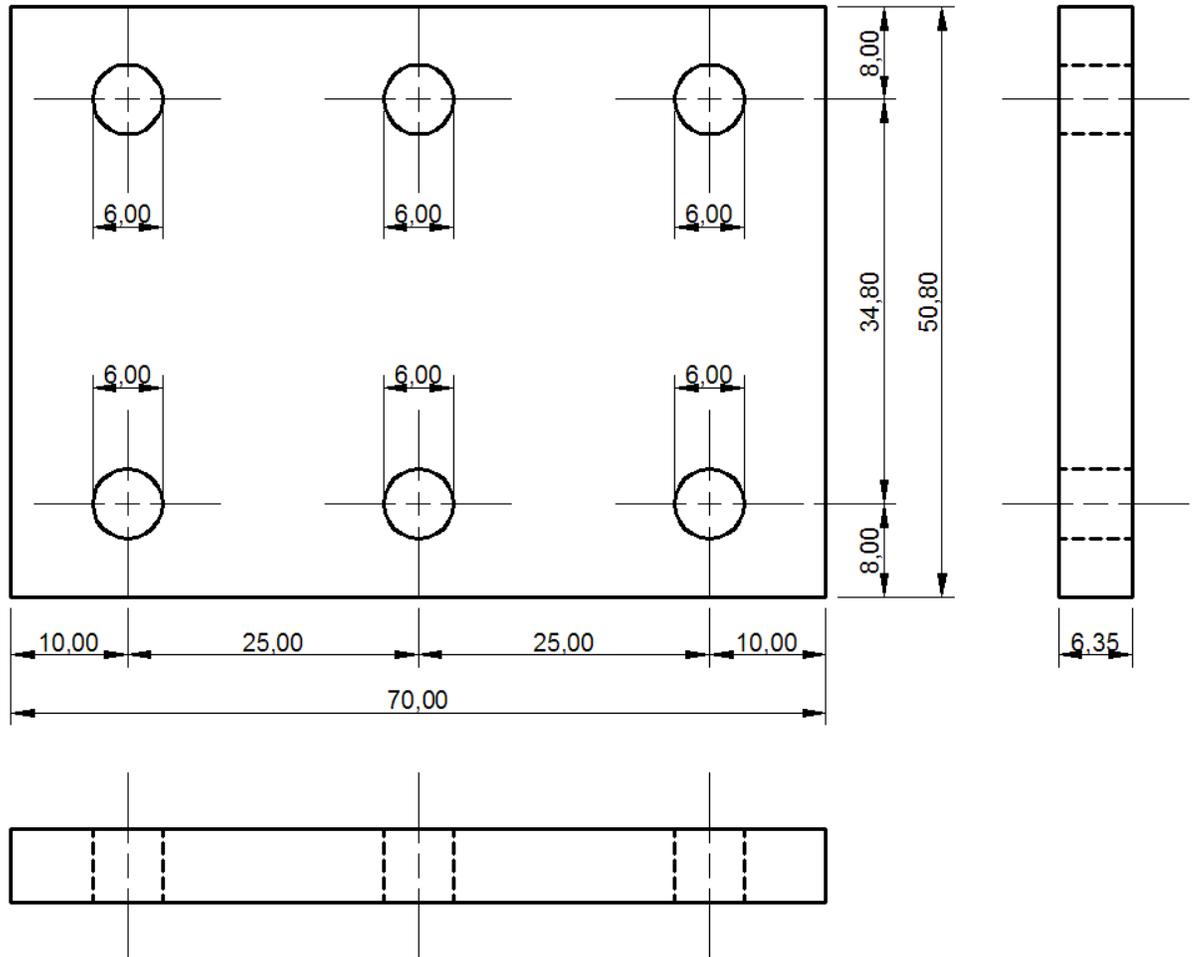
Se debe hacer coincidir las marcas de la galga con los ejes de simetría de la omega.



Previo al pegado de las galgas. Se debe lijar la zona con una lija N°100 y limpiar la superficie con alcohol. El adhesivo recomendado es el cianoacrilato (La gotita).

### 3.3 Sensor grandes deformaciones

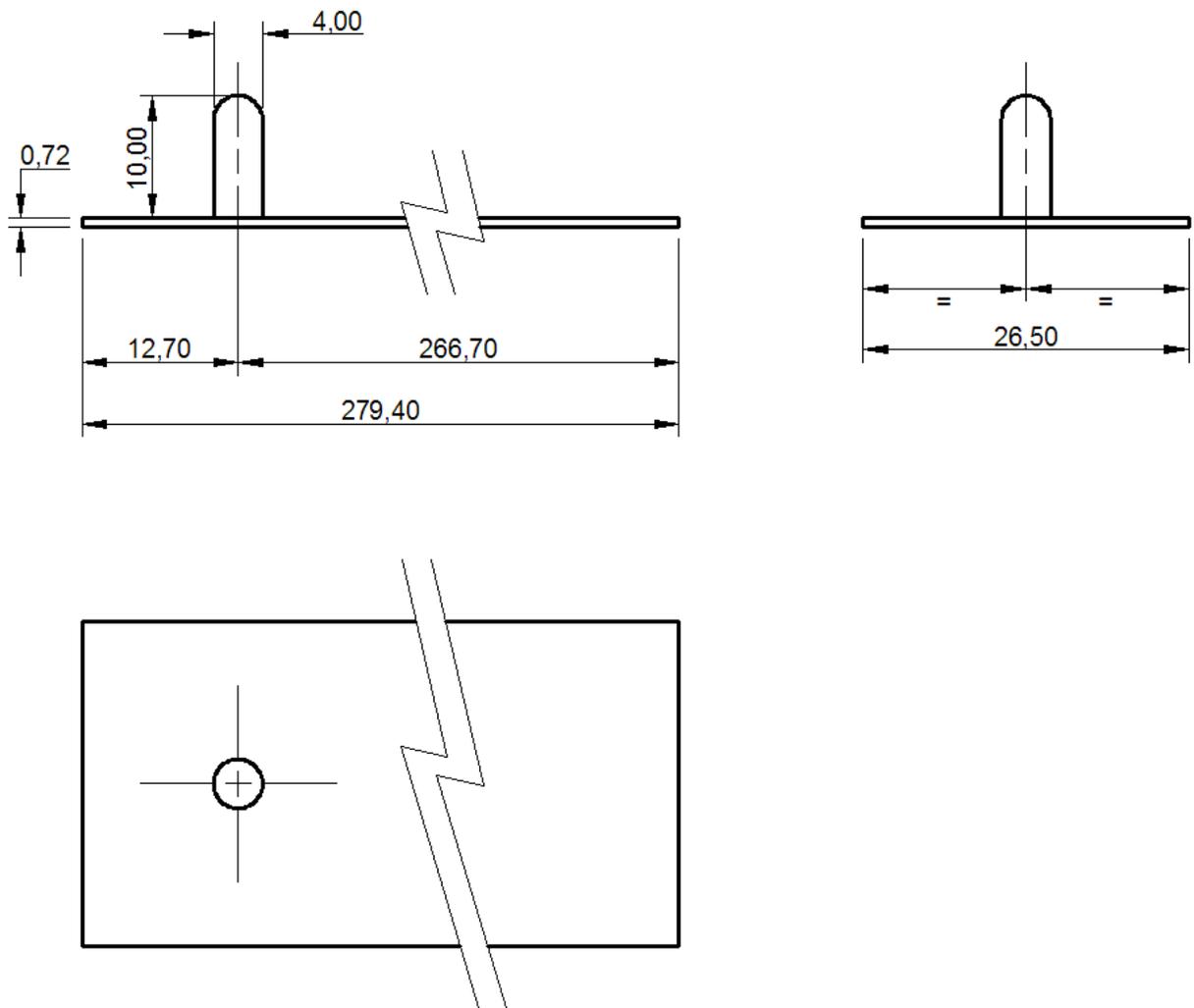
Placa



PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

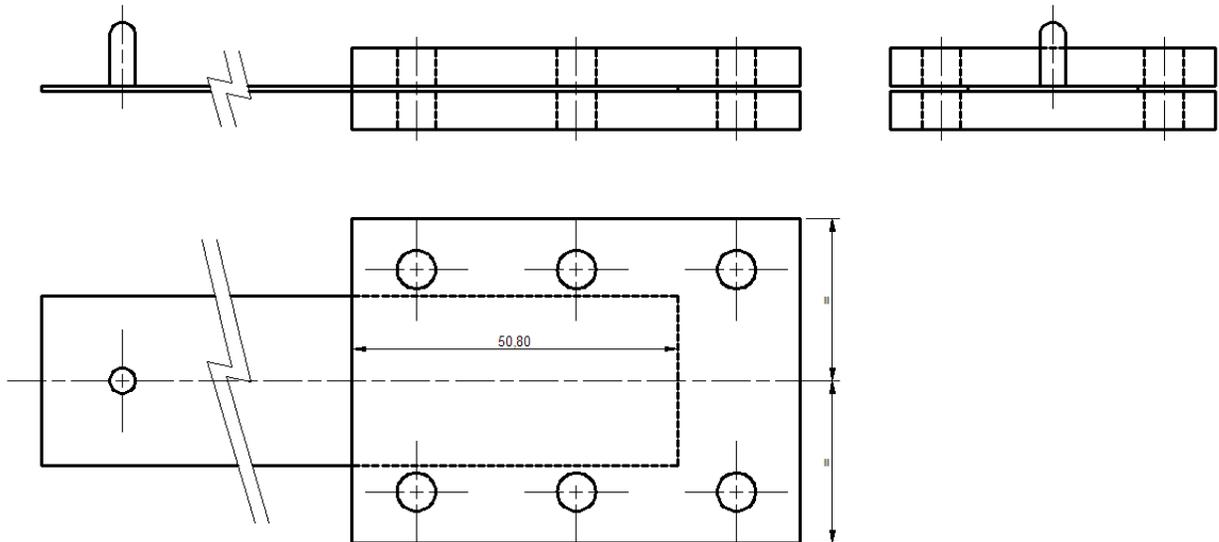
---

Fleje



## PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

### Armado del sensor

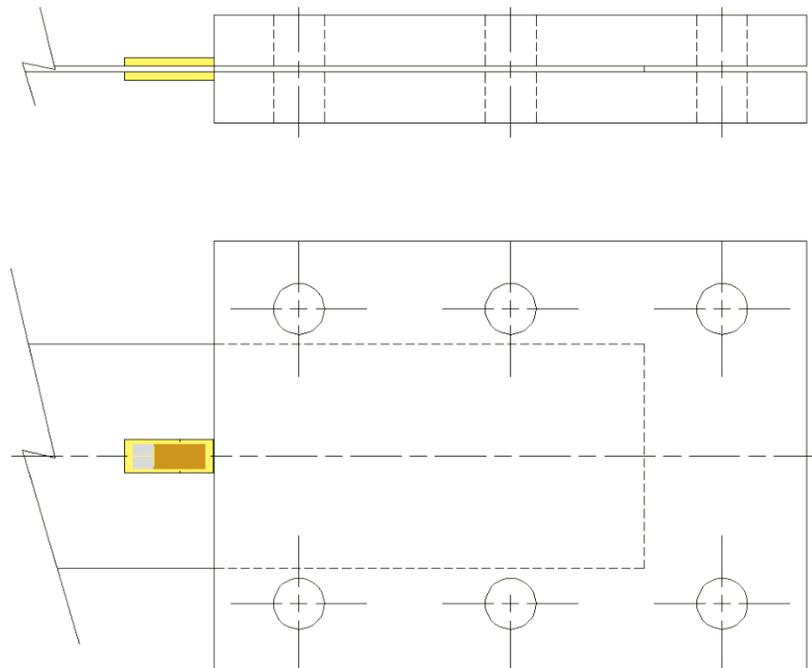


El fleje se inserta dentro de las dos placas y se asegura con el uso de 6 bulones allen de 6mm.

Las galgas se deben adherir al fleje tan cerca del empotramiento como sea posible, dejando los terminales de soldadura hacia el lado más lejano del empotramiento.

Al igual que en las omegas, se deben colocar dos galgas, una en la cara superior y otra en la inferior.

Previo al pegado de las galgas. Se debe lijar la zona con una lija N°100 y limpiar la superficie con alcohol. El adhesivo recomendado es el cianoacrilato (La gotita).

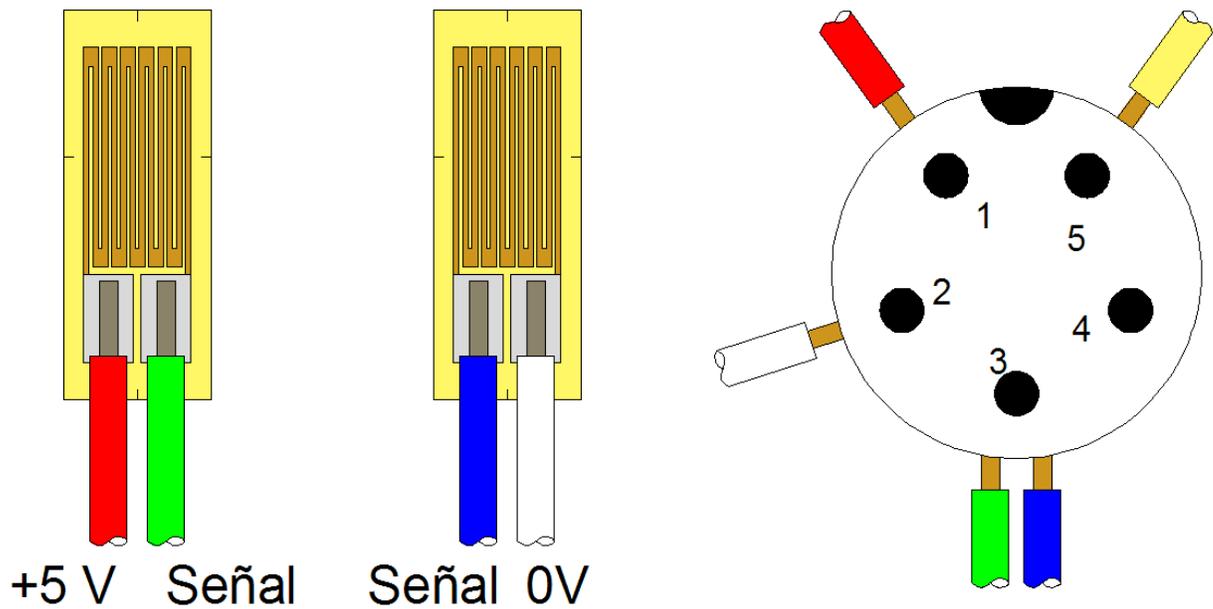


## Conexión eléctrica de los sensores

Se utiliza cable de instrumentación como el usado para las celdas de carga.

Estos cables se encuentran mallados y poseen 5 conductores internamente. Los de color rojo y blanco se encargan de excitar el puente con 5V. Los de color verde y azul transportan la señal de salida del puente. En este caso se puentean en el pin 3 del conector.

El conductor restante, el amarillo, se encuentra conectado a la malla que posee el cable y se conecta al pin 5 del conector.



Las dos galgas son las que se encuentran adheridas al sensor.

El conector que se utiliza es el GX 16/5 hembra.



## 3.4 Electrónica

### Componentes

<b>1 MÓDULO</b>		
Cantidad	Referencia	Descripción
1	CP2102	UART a USB
<b>20 CAPACITORES</b>		
Cantidad	Referencia	Descripción
4	C1-C4	100nF cerámico
2	C5;C6	15pF cerámico
1	C7	22nF cerámico
1	C8	1μF electrolítico
8	C9;C11;C12;C14	100pF cerámico
4	C10;C13;C16;C19	100nF cerámico
<b>4 RESISTENCIAS</b>		
3	R1-R3	10K
1	R4	470
<b>5 CIRCUITOS INTEGRADOS</b>		
1	U1	PIC 16F877
4	U2-U5	ADS1232
<b>7 VARIOS</b>		
1	J1	USB-B
4	J2-J5	GX 16/5
1	X1	4Mhz
1	X2	4,9152Mhz

### Plaqueta

El proyecto en Proteus que contiene el diseño de la electrónica se encuentra en el anexo II.

Los fabricantes de PCB requieren un archivo denominado GERBER. Estos archivos se encuentran dentro del anexo III bajo los nombres Cara\_Superior, Cara\_Inferior y Componentes.

El único cuidado que se debe tener es que previo al soldado del microcontrolador, éste debe estar programado.

## 3.5 Programación

### Microcontrolador

El código en lenguaje assembler, el archivo de MPLAB (software de Microchip para programar PICs) y el archivo en formato hexa (archivo en binario que se carga al microcontrolador) se encuentran en el anexo IV en el CD adjunto a este proyecto.

### Interfaz

Tanto el instalador de la interfaz de usuario así como el código de la misma se encuentran dentro del anexo V del CD adjunto.

### 3.6 Anclajes

#### Ménsulas

Los planos de la ménsula, las partes que conforman ésta y el armado de la misma se encuentran en los Anexos bajo el nombre de Plano N°1, Plano N°2y Plano N°3 respectivamente.

Estos planos también se encuentran en formato digital dentro del anexo VI del CD adjunto.

#### Bastidor

Los planos del bastidor, las partes que lo conforman y el armado de éste se encuentran en los Anexos bajo el nombre de Plano N°4, Plano N°5 y Plano N°6 respectivamente.

Estos planos también se encuentran en formato digital dentro del anexo VI del CD adjunto.

### 3.7 Costos

#### Electrónica

<b>1 MÓDULO</b>				
Cantidad	Referencia	Descripción	Precio unitario	Total
1	CP2102	UART a USB	1,4 U\$S	1,4 U\$S
<b>20 CAPACITORES</b>				
Cantidad	Referencia	Descripción	Precio unitario	Total
4	C1-C4	100nF cerámico	0,25 \$	1 \$
2	C5;C6	15pF cerámico	0,25 \$	0,5 \$
1	C7	22nF cerámico	0,25 \$	0,25 \$
1	C8	1µF electrolítico	0,25 \$	0,25 \$
8	C9;C11;C12;C14	100pF cerámico	0,25 \$	2 \$
4	C10;C13;C16;C19	100nF cerámico	0,25 \$	1 \$
<b>4 RESISTENCIAS</b>				
3	R1-R3	10K	0,25 \$	0,75 \$
1	R4	470	0,25 \$	0,25 \$
<b>5 CIRCUITOS INTEGRADOS</b>				
1	U1	PIC 16F877	3 U\$S	3 U\$S
4	U2-U5	ADS1232	2,75 U\$S	11 U\$S
<b>7 VARIOS</b>				
1	J1	USB-B		
4	J2-J5	GX 16/5	1,01 U\$S	4,04 U\$S
1	X1	4Mhz	10 \$	10 \$
1	X2	4,9152Mhz	10 \$	10 \$
2	Plaqueta	Bifaz 10x10 cm	10 U\$S	20 U\$S
			<b>Total</b>	<b>50 U\$S</b>

PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

---

Anclajes

Parte	Cantidad	Precio
Bastidor	1	\$3.700
Ménsula	2	\$5.600
<b>Total</b>		<b>\$14.900</b>

Sensores

Parte	Cantidad	Precio
Galga	2	15 U\$S
Conector GX 16/5	1	1,01 U\$S
Cable	1 m	2 U\$S
<b>Total</b>		<b>35 U\$S</b>

Total

Parte	Cantidad	Precio
Electrónica	1	50 U\$S
Anclajes	1	\$5.600
Sensores	4	35 U\$S
<b>Total</b>		<b>\$18.000</b>

## Parte IV

# MEMORIAS DE CÁLCULO

## IV MEMORIAS DE CÁLCULO

4.1	Transductores.....	29
	Galgas extensiométricas.....	29
	Medición de la galga .....	29
	Deformación máxima de la galga y voltaje máximo del puente .....	31
4.2	Sensor pequeña deformación .....	32
4.3	Mecanizado del sensor.....	33
	Diseño de la base .....	35
	Fases del mecanizado.....	36
	Calibración .....	39
4.4	Sensor grandes deformaciones .....	40
	Calibración .....	41
4.5	Electrónica analógica.....	43
	Prototipo .....	44
4.6	Electrónica digital .....	46
4.7	Electrónica.....	48
	Esquemático.....	48
	Placa 1 .....	50
	Placa 2 .....	51
	Listado de materiales .....	53
4.8	Programación PIC .....	53
4.9	Interfaz .....	53
4.10	Anclajes .....	54
4.11	Costos.....	57
	Omega .....	57
	Sensor grandes deformaciones .....	57
	Electrónica .....	57
	Anclajes.....	58
4.12	Conclusiones .....	58

## 4.1 Transductores

Los transductores son los encargados de transformar una señal mecánica, de temperatura, eléctrica, etc. en otra de distinta naturaleza.

En este caso es necesario un transductor electromecánico, el cual es capaz de convertir un cambio de la longitud en una variación de tensión eléctrica.

Los más comunes y económicos son las galgas extensiométricas y por lo tanto son las que se utilizarán.

### Galgas extensiométricas

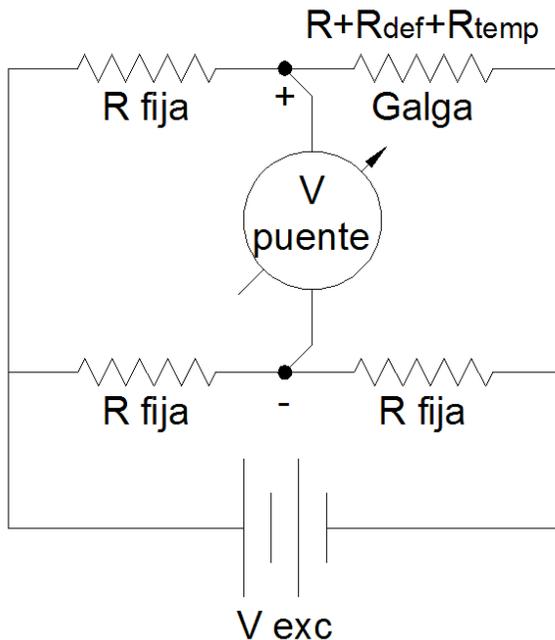
También conocidas por sus nombres en inglés Strain Gage o Strain Gauge, consiste en un fino alambre metálico dispuesto en un patrón de rejilla. Comercialmente se consiguen en valores de resistencia de 30  $\Omega$  hasta 3000  $\Omega$ , siendo 120  $\Omega$  el valor más común y que se consigue fácilmente en el mercado.

Se adhieren directamente al espécimen a ensayar y transforman la variación de longitud en un cambio proporcional en su resistencia eléctrica.

### Medición de la galga

Para conocer el cambio de resistencia el método más sencillo es utilizar un puente de Wheatstone. Existen tres formatos distintos.

- Cuarto Puente



Ecuación

$$\frac{V_{\text{puente}}}{V_{\text{Exc}}} = \frac{GF \cdot \varepsilon}{4} \cdot \frac{1}{1 + \frac{GF \cdot \varepsilon}{2}}$$

Dónde:

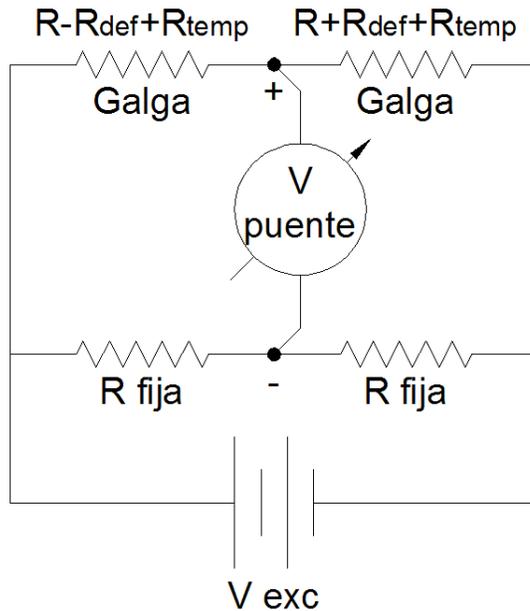
$GF$  : factor de galga

$$\varepsilon = \Delta L / L$$

## PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

Al utilizar una única galga, esta disposición es la más económica, pero no brinda una salida lineal y es sensible a la dilatación del material y al auto calentamiento debido a la corriente que circula por ella.

- Medio Puente



Ecuación

$$\frac{V_{Puenete}}{V_{Exc}} = \frac{GF \cdot \varepsilon}{2}$$

Dónde:

$GF$  : factor de galga

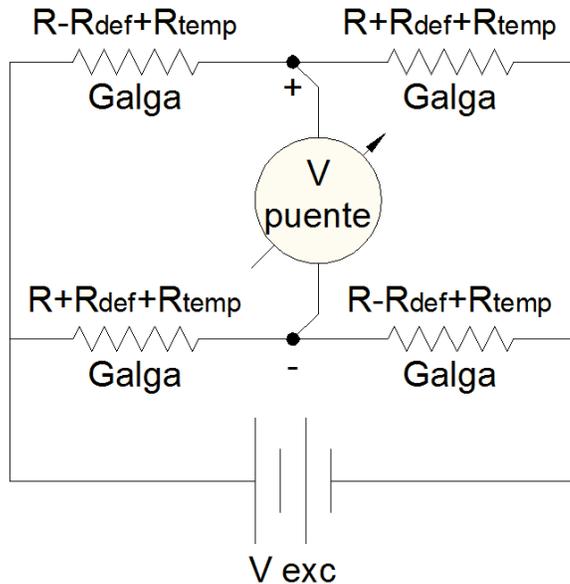
$$\varepsilon = \Delta L / L$$

Uno de los brazos del puente está formado por dos galgas y el otro por dos resistencias fijas.

Como la corriente que atraviesa las dos galgas es la misma, el efecto de auto calentamiento es anulado. Tampoco es sensible a la dilatación del material ya que ambas galgas se deforman junto con este.

Su salida es lineal siempre que no se supere el límite elástico de la galga.

- Puente Completo



Ecuación

$$\frac{V_{Puente}}{V_{Exc}} = GF \cdot \varepsilon$$

Dónde:

$GF$  : factor de galga

$$\varepsilon = \Delta L / L$$

Posee las mismas propiedades que el medio puente, pero con el doble de sensibilidad por estar conformado por dos pares de galgas.

En conclusión, se descarta la disposición de cuarto puente porque las mediciones serían dependientes de la temperatura y sería necesario incorporar un sensor para conocerla. Además de tener que agregarle al código del software el algoritmo para linealizar la salida, haciéndolo más complejo y ocupando capacidad de cálculo.

Se decidió entonces utilizar la disposición de medio puente por poseer una respuesta lineal, ser más económico que el puente completo y permite diseñar un sensor más compacto.

La única desventaja que posee es su sensibilidad reducida frente al puente completo, pero como la salida de cualquiera de los dos puentes debe ser amplificada, en ambos casos es necesario el uso de amplificadores operacionales de instrumentación.

### Deformación máxima de la galga y voltaje máximo del puente

Los distintos fabricantes recomiendan no sobrepasar los  $2.000 \mu\varepsilon$  o  $2.500 \mu\varepsilon$  de deformación para no entrar en la zona de fluencia de la galga y no producirle deformaciones permanentes a la misma. Por lo tanto se toma un factor de seguridad de 2, para asegurarnos de trabajar siempre en la zona elástica de la galga.

Por lo tanto  $\varepsilon_{max} = 1000 \mu\varepsilon$  y si tomamos un factor de galga  $GF=2$ . Reemplazando en la ecuación del medio puente (3.2) tenemos que:

$$\frac{V_{Puenete}}{V_{Exc}} = \frac{GF \cdot \varepsilon}{2} \Rightarrow \frac{V_{Puenete}}{V_{Exc}} = \frac{2 \cdot 1000\mu\varepsilon}{2} \Rightarrow \frac{V_{Puenete}}{V_{Exc}} = 1000 \frac{\mu V}{V}$$

Como se observa en la ecuación anterior la tensión máxima que entrega el puente es una señal sumamente débil (10mV para una excitación de 10V). Por lo tanto se deberá amplificar mediante el uso de amplificadores operacionales.

## 4.2 Sensor pequeña deformación

El diseño se basó en los anillos dinamométricos.

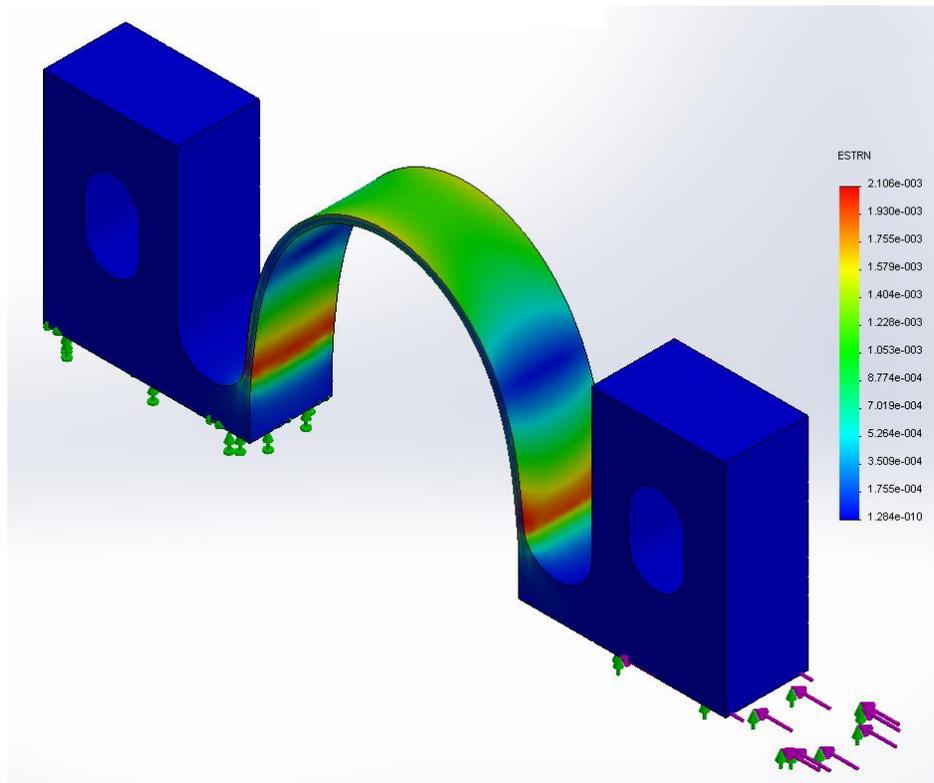


En estos anillos, gracias a su forma circular, la deformación es proporcional a la fuerza que se aplica. Por lo tanto se simuló un sensor con forma de media circunferencia y los resultados mostraban que se comportaba igual que el círculo completo.

Entonces se diseñó un sensor con forma de omega y se ajustaron las distintas dimensiones hasta obtener una deformación específica de  $1.000\mu\varepsilon$  en la zona donde se aplica la galga extensiométrica cuando el sensor se comprime o estira 2 mm.

Fabricado en SAE 1040 recocido para quitar todo tipo de tensiones internas.

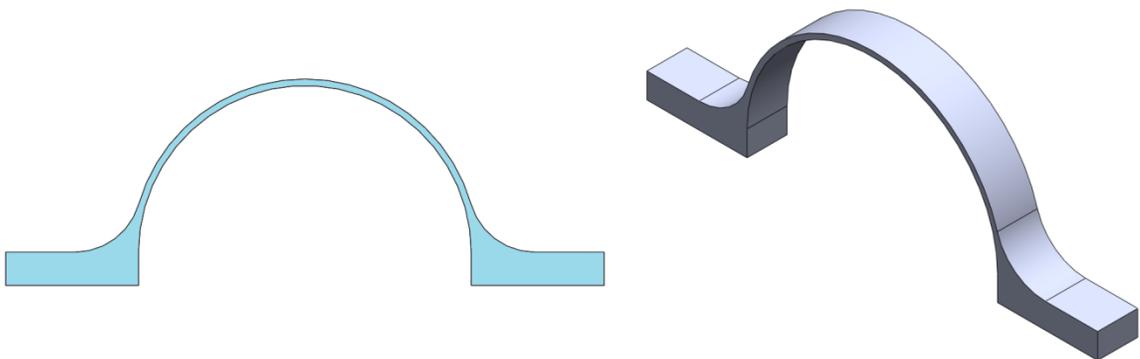
La geometría final luego de varias simulaciones y cambios para facilitar el mecanizado quedo como muestra la figura.



Se puede observar que la deformación específica en la parte superior es de  $1.000\mu\epsilon$  para una deformación de 2mm

### 4.3 Mecanizado del sensor

El diseño original de la omega es el que se muestra en la figura.



Esta forma del sensor cumple con los requisitos de deformación pero es sumamente complicada de mecanizar ya que no puede ser sujeta firmemente a la mesa de la fresa. A causa de esto y de las tensiones internas del material, la omega se deforma y alabea durante el mecanizado y no se consiguen las dimensiones correctas de la pieza.

## PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

---

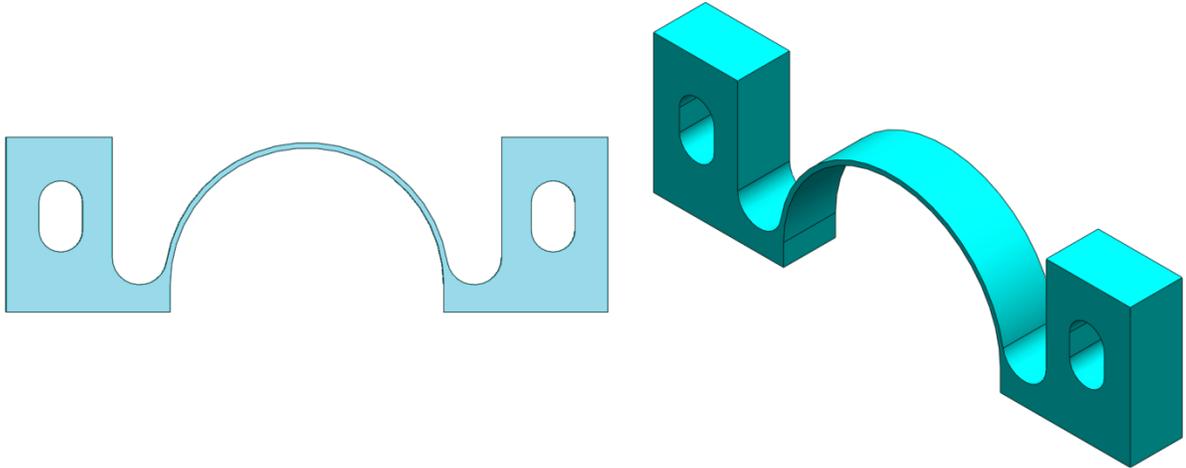


La omega de la foto superior se torció durante el mecanizado y la herramienta de corte fresó por demás y produjo la mueca que se ve en el círculo rojo



Las tres primeras omegas mecanizadas. Solo la de más abajo no presenta signos de haberse deformado durante el mecanizado

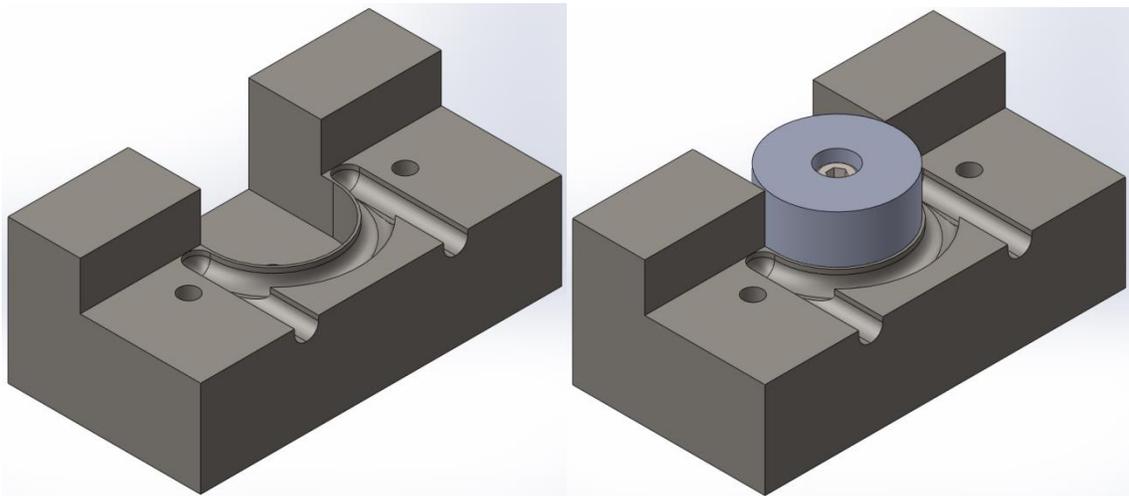
Se modificó el diseño original al siguiente.



Con esta nueva geometría, la parte activa del sensor conserva las mismas dimensiones, por lo que sigue comportándose de la misma forma que lo hacía el diseño original. Y posee los agarres necesarios para ser montado sobre una base al momento de mecanizar la pieza. Además se liberó de tensiones al acero previo a su mecanización para evitar deformaciones.

### Diseño de la base

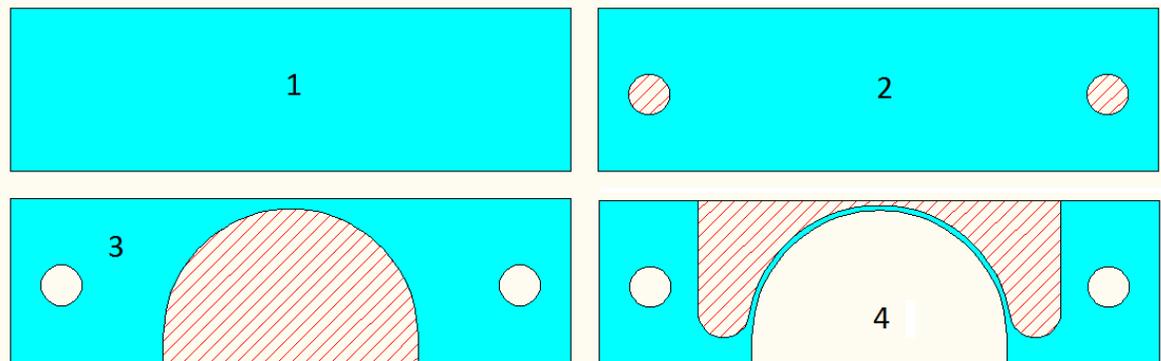
La base es la pieza de acero sobre la cual se monta la planchuela que se convertirá en la Omega. Esta base es tomada por la morsa de la fresa, por lo que debe tener dos caras replanadas paralelas. Además se replanó la superficie sobre la que apoya la Omega y se tallo un canal para que la herramienta de corte talle la planchuela y no la base.



Esta posee tres agujeros roscados, dos para poder sujetar la planchuela con el uso de bulones. Y el tercero para colocar un cilindro encargado de hacer de respaldo de la Omega durante una fase del mecanizado.



### Fases del mecanizado



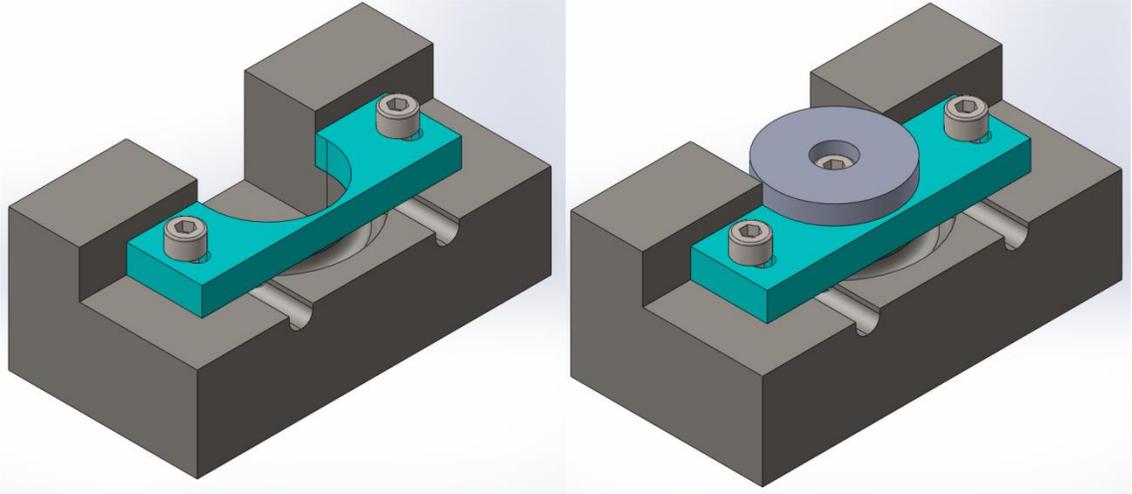
En la fase 1 se corta la planchuela de las medidas necesarias y se replana la cara que se transformará en la base de la Omega.

Luego se hacen los agujeros necesarios para poder sujetar la planchuela en la base.

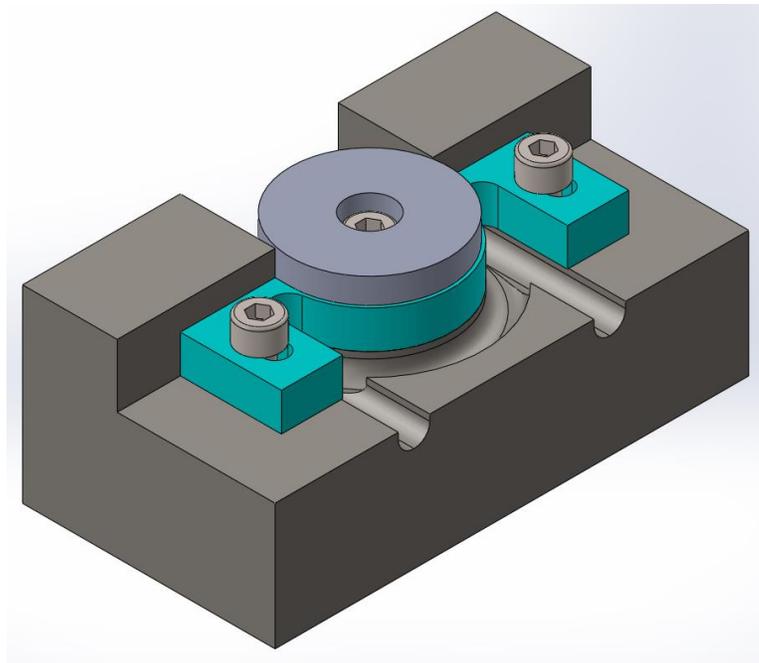
## PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

---

En la etapa 3 la fresa quita todo el material del interior de la Omega. Una vez finalizada la etapa 3 del mecanizado se debe colocar el cilindro de respaldo.



En la etapa 4 se mecaniza la parte exterior de la omega



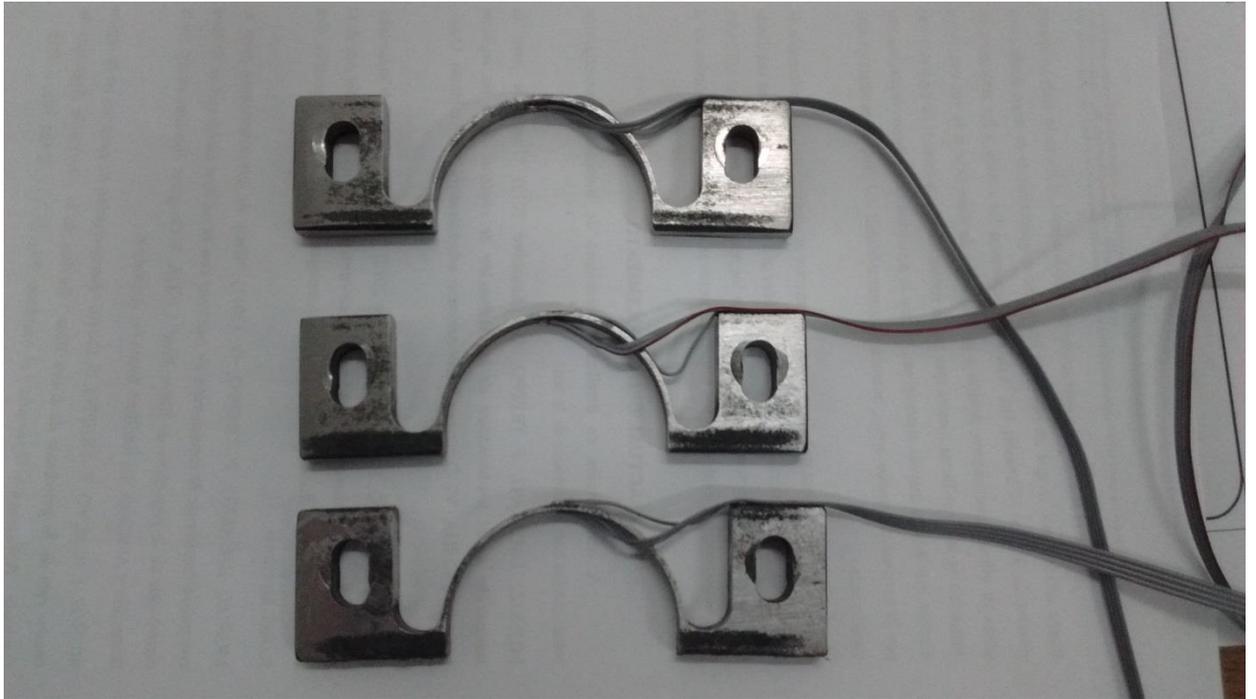


Figura 12 Omegas armadas

# PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

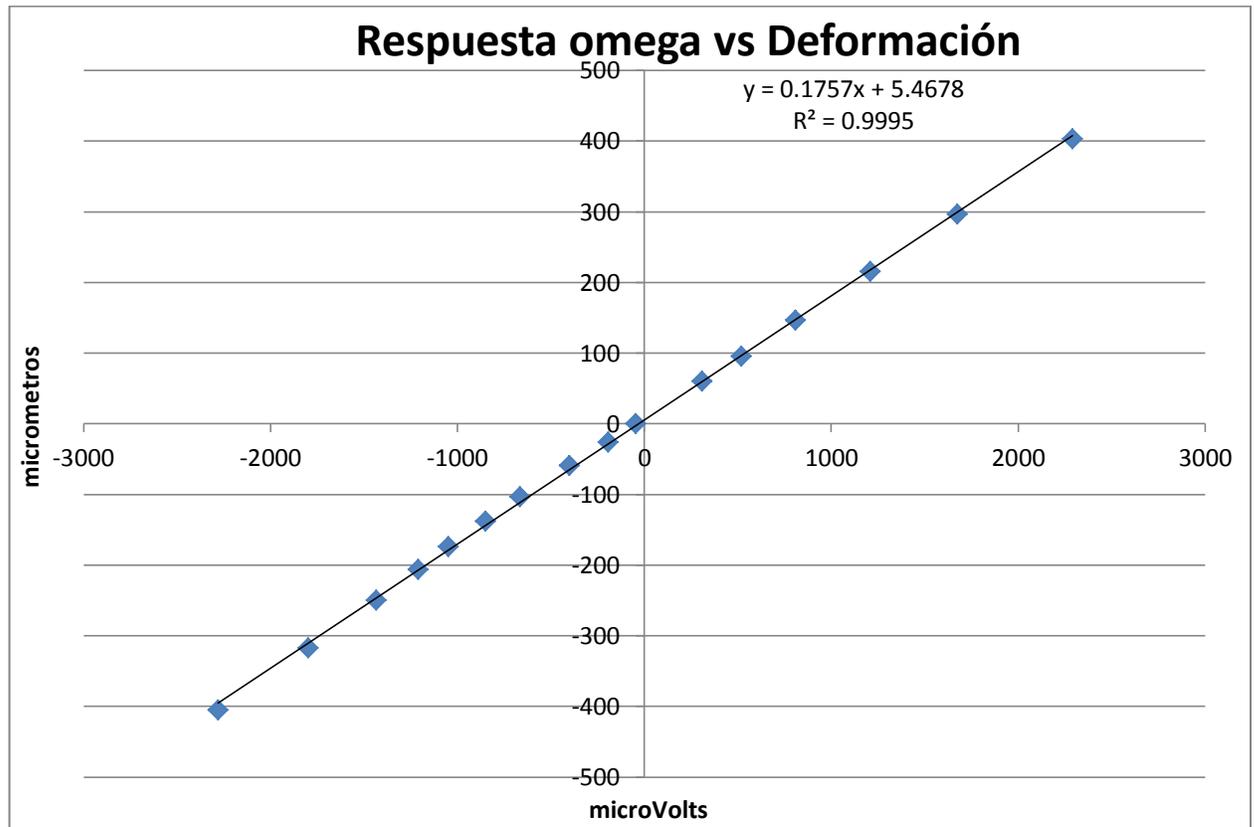
## Calibración

La calibración se realizó adhiriendo las omegas a una morsa y comparando las lecturas de voltaje en los sensores contra la deformación que acusaba un comparador al abrir o cerrar la morsa.



Datos tomados para uno de los sensores.

Compresión		Tracción	
[ $\mu$ V]	[ $\mu$ m]	[ $\mu$ V]	[ $\mu$ m]
-45	0	-194	-26
310	60	-402	-59
520	96	-665	-103
810	147	-849	-138
1210	216	-1049	-174
1675	297	-1209	-206
2290	403	-1434	-250
		-1799	-317
		-2279	-405



Se puede apreciar que la respuesta del sensor es lineal.

Debido al ruido captado por la electrónica se podría tener un error de más menos 0,1 micrones en la lectura de las omegas. Pero como la facultad no posee instrumentos con precisión mayor a más menos un micrón, la mayor fidelidad que se puede obtener es la de más menos un micrómetro.

#### 4.4 Sensor grandes deformaciones

El diseño consiste en una viga empotrada. Las galgas se adhieren lo más cerca posible del empotramiento ya que es la zona que sufre la mayor deformación.

El prototipo armado con una regla (pie metálico) arrojó tan buenos resultados que no se construyó un sensor nuevo.

# PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

---

## Calibración

La calibración se realiza con la ayuda de un tornillo micrométrico de la facultad.



En la figura superior se puede apreciar el sensor y el tornillo micrométrico.

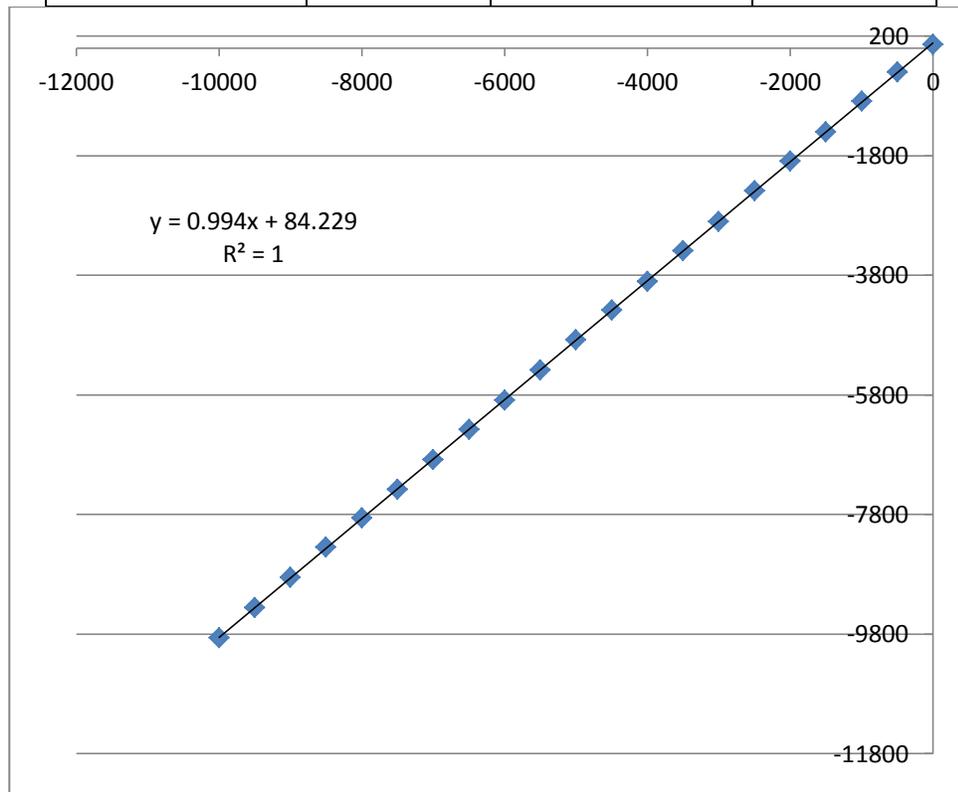
La figura inferior muestra al vástago del tornillo actuando sobre el palpador del sensor.



# PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

Datos tomados

Deformación [ $\mu\text{m}$ ]	Voltaje [ $\mu\text{V}$ ]	Deformación [ $\mu\text{m}$ ]	Voltaje [ $\mu\text{V}$ ]
0	60	-5.500	-5.384
-500	-405	-6.000	-5.892
-1.000	-895	-6.500	-6.378
-1.500	-1.408	-7.000	-6.886
-2.000	-1.890	-7.500	-7.381
-2.500	-2.390	-8.000	-7.861
-3.000	-2.903	-8.500	-8.348
-3.500	-3.395	-9.000	-8.853
-4.000	-3.905	-9.500	-9.361
-4.500	-4.384	-10.000	-9.862
-5.000	-4.884		



Se aprecia que el sensor presenta una respuesta lineal.

## 4.5 Electrónica analógica

Es la parte encargada de amplificar la señal y quitar parte del ruido eléctrico captado por los cables y los sensores. Dentro de esta parte de la electrónica se encuentra también el convertor analógico digital.

Se buscó en el mercado que convertidores A/D existen y se encontró que Analog Devices y Texas Instruments son los dos fabricantes que ofrecen integrados de alta precisión (más de 22 bits). Se escogió Texas Instruments por brindar un asesoramiento personal ante cualquier duda o problema que surja a través de su página [e2e.ti.com](http://e2e.ti.com). Y porque envían muestras gratuitas de sus componentes, lo cual es una gran ventaja cuando se cuenta con presupuesto limitado y es necesario probar diferentes configuraciones para ver cuál es el convertor que mejor se adapta a nuestras necesidades.

El otro problema que existía con los convertidores de Analog Devices era que había que importarlos y podían quedar demorados en la Aduana o nunca ser entregados.

Se probaron los convertidores ADS1232, ADS1234, ADS1246 y ADS1248.

Los ADS1246 y ADS1248 fueron descartados por no poseer la capacidad de filtrar el ruido que tienen los ADS1232 y ADS1234.

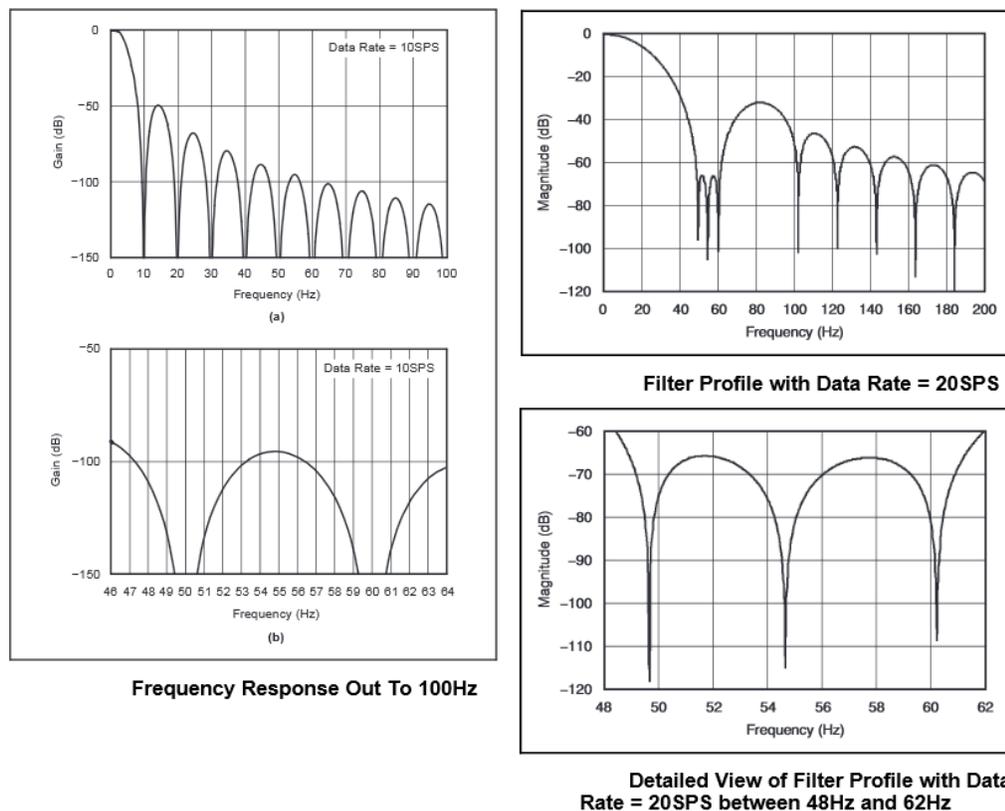


Figura 13 Izquierda filtro ADS1232/34 Derecha filtro ADS1246/48.

Como se ve en la figura los ADS1232 y ADS1234 tienen menos de -150dB tanto en los 50Hz como en los 60 Hz frente a los casi -80dB de los ADS1246 y ADS1248.

Si

$$-150dB = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{Sale}}{V_{Entra}}\right) \Rightarrow \frac{V_{Sale}}{V_{Entra}} = 10^{\left(\frac{-150}{20}\right)} = 10^{-7,5} \Rightarrow \frac{V_{Sale}}{V_{Entra}} = 0,0316 \frac{\mu V}{V}$$

Para el ADS1232

$$-80dB = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{Sale}}{V_{Entra}}\right) \Rightarrow \frac{V_{Sale}}{V_{Entra}} = 10^{\left(\frac{-80}{20}\right)} = 10^{-4} \Rightarrow \frac{V_{Sale}}{V_{Entra}} = 100 \frac{\mu V}{V}$$

Para el ADS1246

Como lo demuestran los cálculos anteriores los ADS1232/4 atenúan el ruido de 50 y 60 Hz 3.000 veces más que los ADS1246/8

## Prototipo

El primer prototipo consistió en un solo ADS1234 por poseer cuatro entradas analógicas. Pero en la práctica se detectó que el tiempo que tarda en pasar de leer un canal a otro es de 3 segundos aproximadamente. Mientras que el datasheet aseguraba menos de medio segundo. Los ADS1232 también poseen el mismo problema.

Entonces se decidió utilizar cuatro ADS1232 en paralelo, uno por sensor. Quedando la opción de que sean ocho canales analógicos en total si no es inconveniente tener una lectura cada tres segundos.

## 24-Bit Analog-to-Digital Converter For Bridge Sensors

### FEATURES

- Complete Front-End for Bridge Sensors
- Up to 23.5 Effective Bits
- Onboard, Low-Noise PGA
- RMS Noise:  
17nV at 10SPS (PGA = 128)  
44nV at 80SPS (PGA = 128)
- 19.2-Bit Noise-Free Resolution at Gain = 64
- Over 100dB Simultaneous 50Hz and 60Hz Rejection
- Flexible Clocking:  
Low-Drift Onboard Oscillator ( $\pm 3\%$ )  
Optional External Crystal
- Selectable Gains of 1, 2, 64, and 128
- Easy Ratiometric Measurements—  
External Voltage Reference up to 5V
- Selectable 10SPS or 80SPS Data Rates
- Two-Channel Differential Input with Built-In  
Temperature Sensor (ADS1232)
- Four-Channel Differential Input (ADS1234)
- Simple Serial Digital Interface
- Supply Range: 2.7V to 5.3V
- $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+105^{\circ}\text{C}$  Temperature Range

### APPLICATIONS

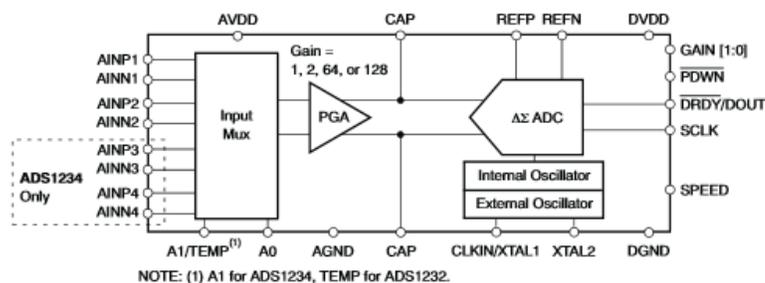
- Weigh Scales
- Strain Gauges
- Pressure Sensors
- Industrial Process Control

### DESCRIPTION

The ADS1232 and ADS1234 are precision 24-bit analog-to-digital converters (ADCs). With an onboard, low-noise programmable gain amplifier (PGA), precision delta-sigma ADC and internal oscillator, the ADS1232/4 provide a complete front-end solution for bridge sensor applications including weigh scales, strain gauges and pressure sensors.

The input multiplexer accepts either two (ADS1232) or four (ADS1234) differential inputs. The ADS1232 also includes an onboard temperature sensor to monitor ambient temperature. The onboard, low-noise PGA has a selectable gain of 1, 2, 64, or 128 supporting a full-scale differential input of  $\pm 2.5\text{V}$ ,  $\pm 1.25\text{V}$ ,  $\pm 39\text{mV}$ , or  $\pm 19.5\text{mV}$ . The delta-sigma ADC has 23.5-bit effective resolution and is comprised of a 3rd-order modulator and 4th-order digital filter. Two data rates are supported: 10SPS (with both 50Hz and 60Hz rejection) and 80SPS. The ADS1232/4 can be clocked externally using an oscillator or a crystal. There is also an internal oscillator available that requires no external components. Offset calibration is performed on-demand and the ADS1232/4 can be put in a low-power standby mode or shut off completely in power-down mode. All of the features of the ADS1232/4 are operated through simple pin-driven control. There are no digital registers to program in order to simplify software development. Data are output over an easily-isolated serial interface that connects directly to the MSP430 and other microcontrollers.

The ADS1232 is available in a TSSOP-24 package and the ADS1234 is in a TSSOP-28. Both are fully specified from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+105^{\circ}\text{C}$ .



Como se observa en las características anteriores otra ventaja que poseen estos convertidores por sobre los demás es que traen incorporados amplificadores operaciones de instrumentación sumamente precisos que introducen un error de  $\pm 17\text{nV}$  y que poseen un rechazo de modo común (CMR) de 110 dB.

Con este convertidor se consiguen 10 muestras por segundo. Un ensayo promedio dura alrededor de 6 minutos. Por lo tanto se tendrán unas 3.600 mediciones por sensor frente a las 20 o 30 que se tienen ahora con el método manual.

Para asegurar la correcta conexión de los sensores a la plaqueta, ambos poseen un conector MC-5 macho, la conexión entonces se realiza mediante un cable de instrumentación de cinco hilos.

Estos cables vienen mallados y los conectores, al ser metálicos, conectan esta malla a la masa de la plaqueta, asegurando así que se capte la menor cantidad posible de ruido electromagnético.

### 4.6 Electrónica digital

Para que los cuatro conversores trabajen de forma sincrónica se descartó el uso del oscilador interno que poseen y se colocó un único cristal de 4,9152 MHz.

La lectura de los datos del ADS1232 se debe hacer mediante un microcontrolador. Este es además el encargado de conectarse con la PC, ver qué tipo de ensayo se va a realizar y configurar el conversor para ello. Los microcontroladores elegidos son marca Microchip debido a que en la facultad se tienen los elementos necesarios para programarlos y no poseen grandes diferencias técnicas o económicas con los de otras marcas como Atmega o Texas Instruments.

El primer prototipo se fabricó utilizando un PIC 18F2550. Se escogió este microcontrolador por poseer USB 2.0 incorporado.

Se descartó al final, porque la conexión USB nunca fue estable.

Dentro de los primeros 10 minutos era común que el dispositivo se desconecte de la computadora y si se estaba realizando un ensayo se perdía información. El tiempo máximo que alcanzó sin desconectarse fue de 35 minutos.

Nunca se pudo determinar el porqué de esta falla, se invirtieron dos semanas en refinar y hacer lo más robusto posible el código del programa dentro del PIC.

La prueba final consistió básicamente en una plaqueta nueva que contenía únicamente el PIC18F2550 y el programa lo único que hacía era conectarse a la PC por USB y enviar números del 1 al 10 cada 100ms. En esta prueba también se desconectaba de forma aleatoria.

Se cree que la falla se debe a que el protocolo del USB 2.0 exige trabajar a 48Mhz y a esta frecuencia cualquier pista de la plaqueta, por más corta que sea, hace las veces de antena y no transmite de forma efectiva los datos necesarios.

Se optó entonces por un PIC 16F877A, por ser un PIC económico, que se consigue fácilmente en la zona y con el cual he realizado varios proyectos anteriormente. Este posee un puerto UART, que sin mayores problemas se puede transformar en un puerto serie RS-232. Y los conversores de puerto serie a USB son sencillos de fabricar o económicos si se va a adquirir.

# PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

Las características más importantes del PIC 16F877A son:

## 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F876A
- PIC16F874A
- PIC16F877A

### High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input  
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,  
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),  
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin  
PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,  
can be incremented during Sleep via external  
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period  
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™  
(Master mode) and I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver  
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address  
detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with  
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for  
Brown-out Reset (BOR)

### Analog Features:

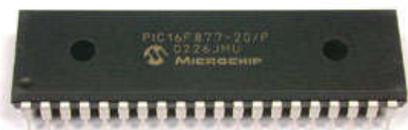
- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital  
Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
  - Two analog comparators
  - Programmable on-chip voltage reference  
(VREF) module
  - Programmable input multiplexing from device  
inputs and internal voltage reference
  - Comparator outputs are externally accessible

### Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash  
program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM  
memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)  
via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC  
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

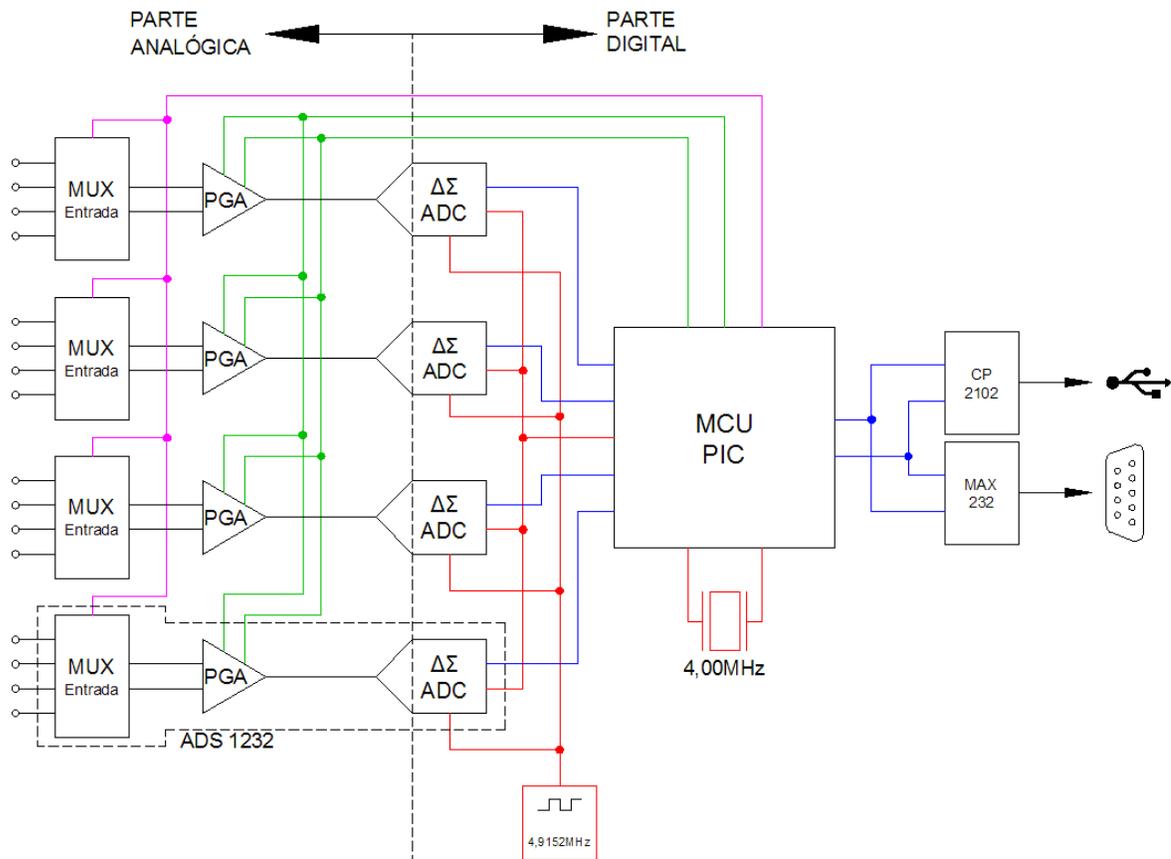
### CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM  
technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption



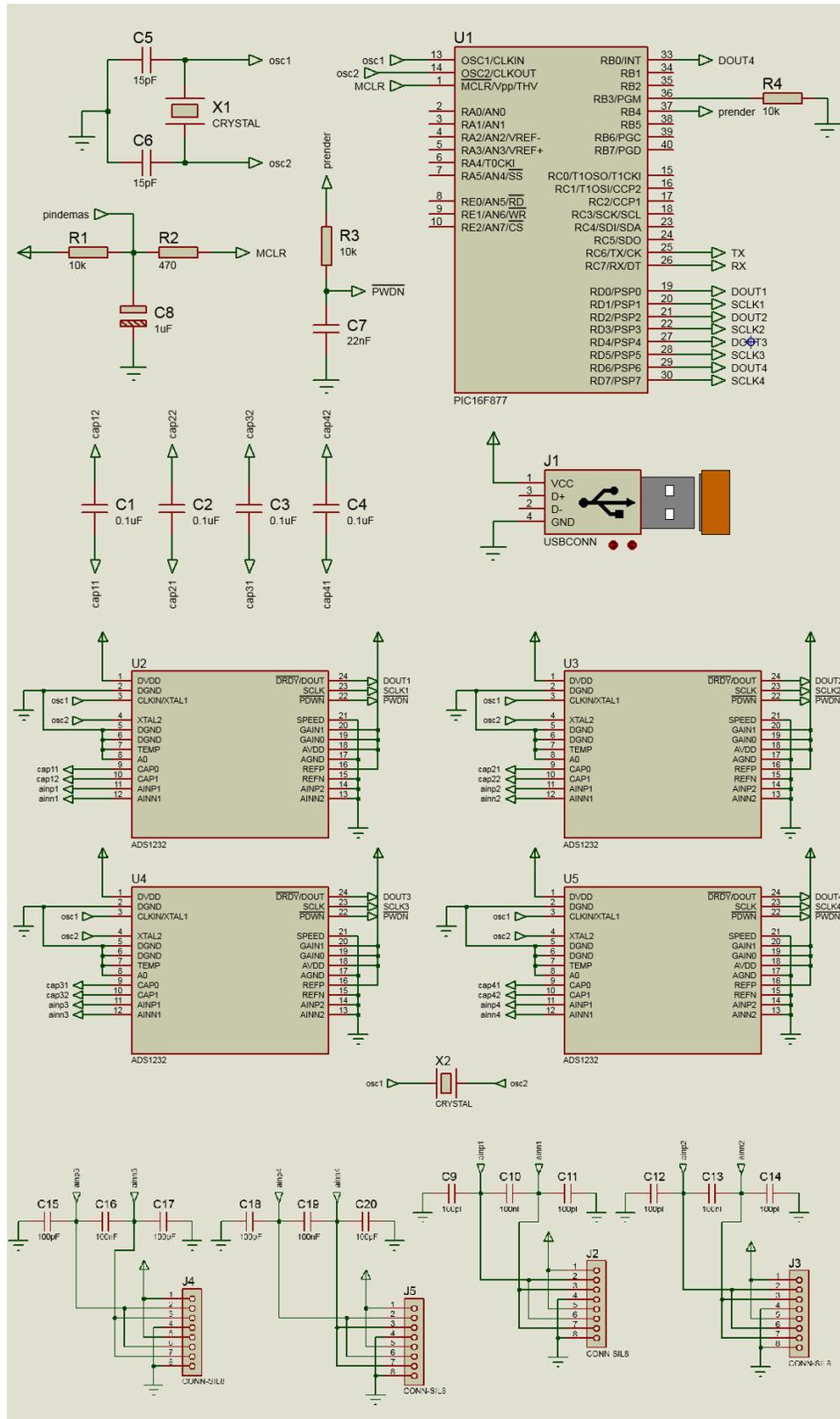
## 4.7 Electrónica

### Esquemático

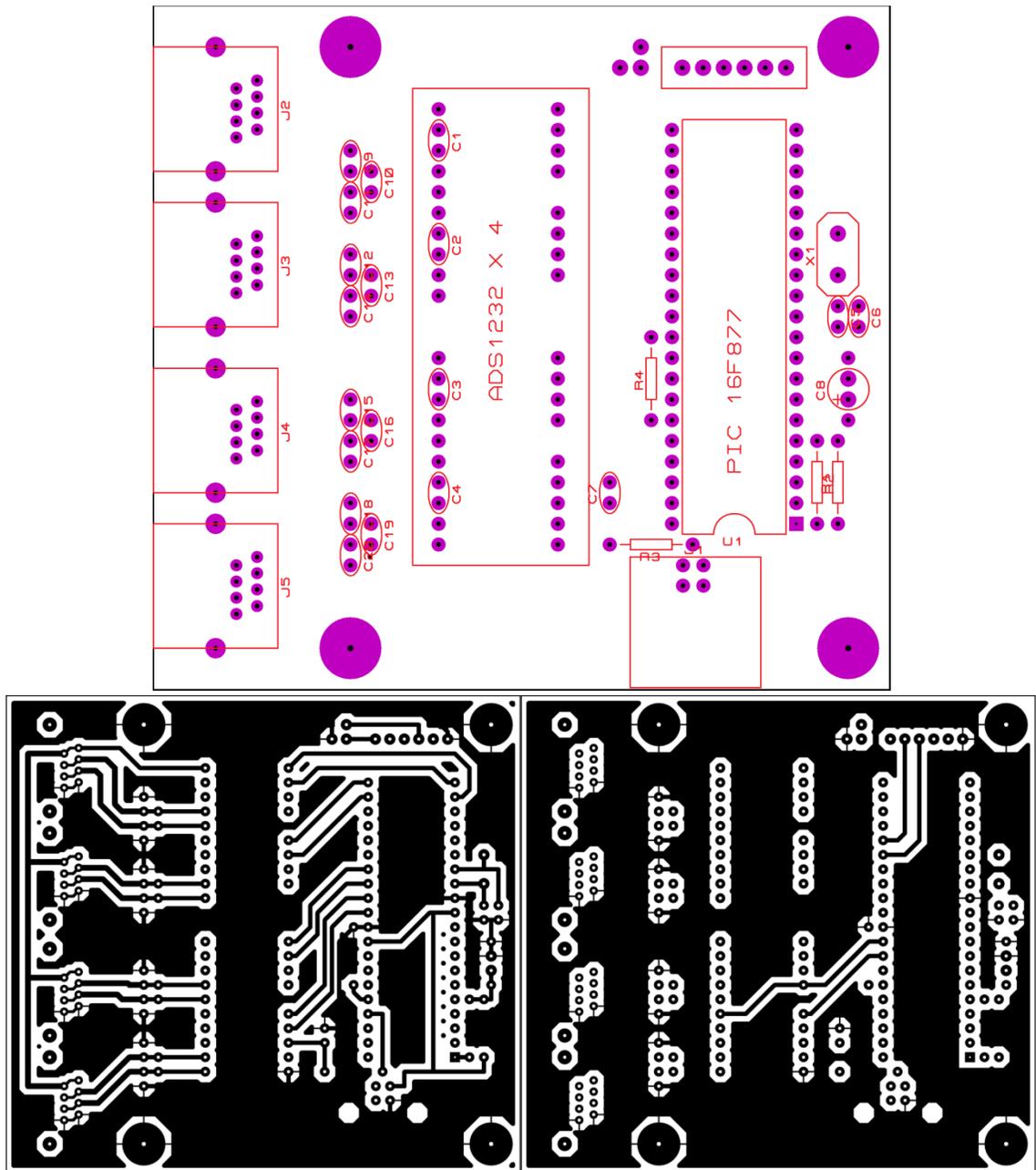


# PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

Se diseñó la plaqueta con Proteus 8.1.



Primer placa



Este diseño se descartó debido a la dificultad que tiene soldar la placa que porta los 4 ADS1232 a la placa principal.

Se optó por diseñar dos placas. Una con la parte analógica y otra con la digital.

Segunda placa

Analógica.

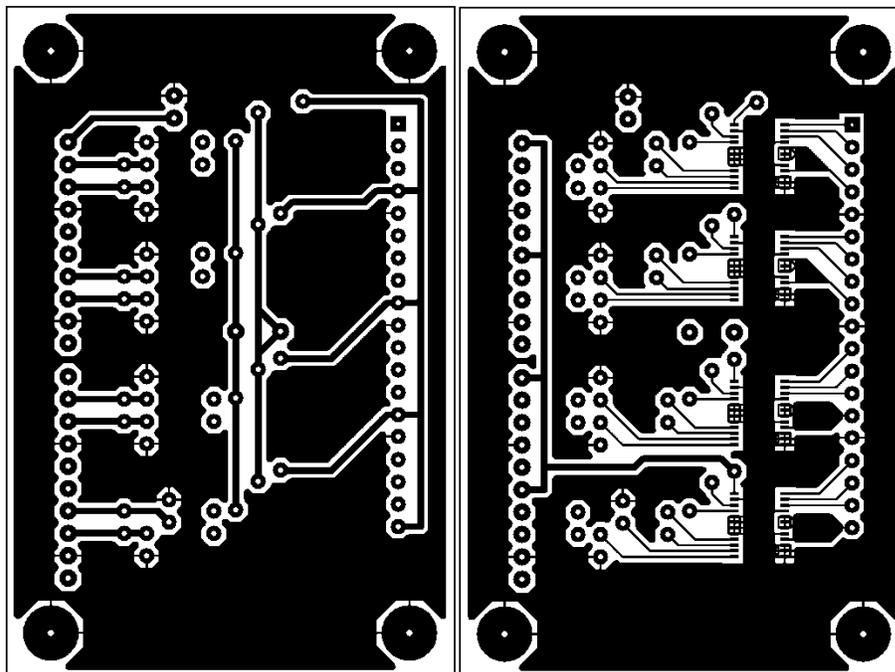


Figura 14 Diseño de la parte inferior y superior de la placa Analógica.

Digital.

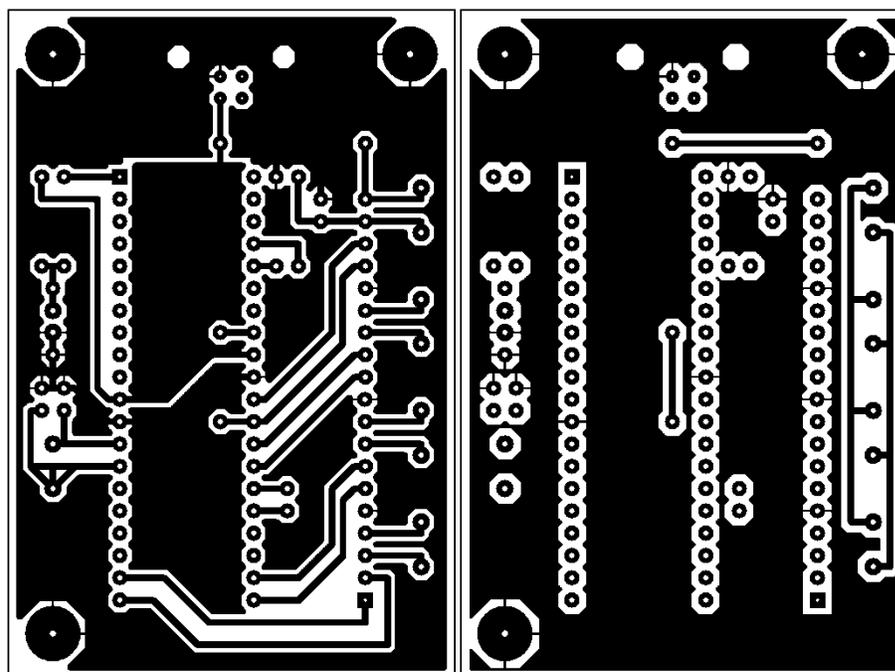
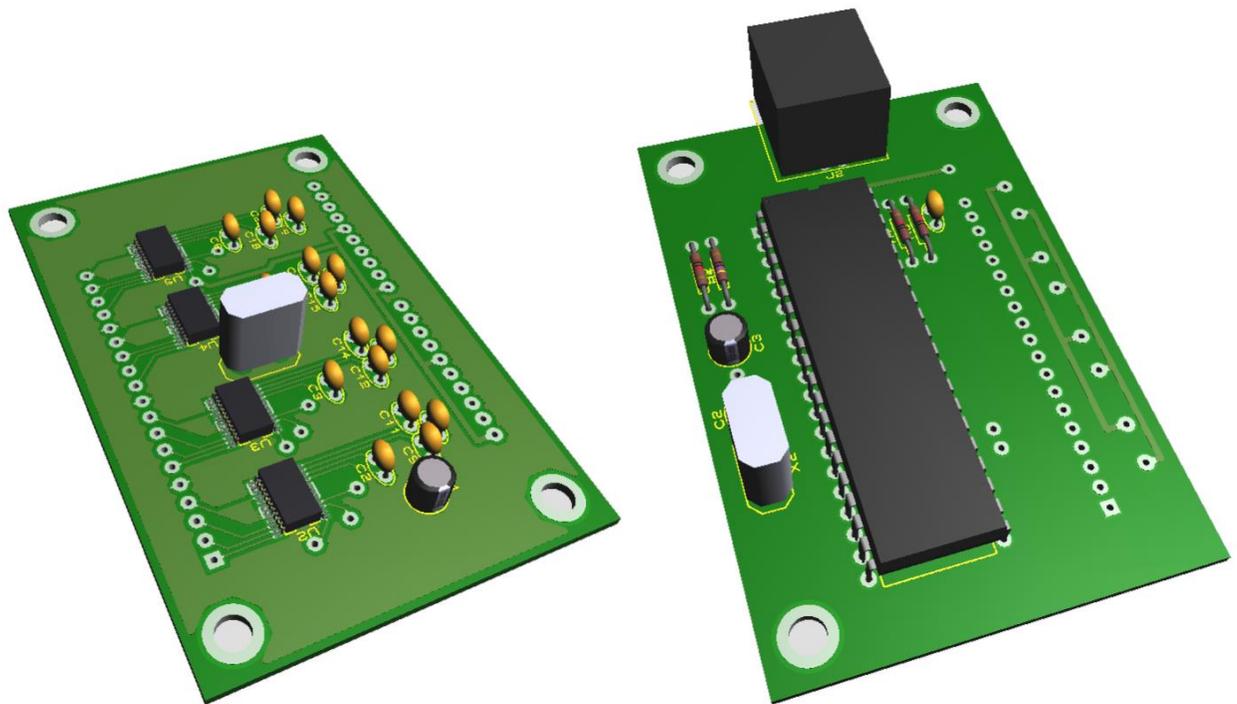


Figura 15 Diseño de la parte inferior y superior de la placa Analógica.

## PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

---



La comunicación entre ambas placas se realiza mediante un cable IDE de 40 hilos.

Ambas placas miden 3 pulgadas de largo y 2 pulgadas de ancho. Se montan una encima de la otra dentro de una caja estanca de aluminio de 10x10x5 cm. En esta caja se montan además el conector USB B y los cuatro conectores GX 16/5 hembra.

### Listado de materiales

<b>1 MÓDULO</b>		
Cantidad	Referencia	Descripción
1	CP2102	UART a USB
<b>20 CAPACITORES</b>		
Cantidad	Referencia	Descripción
4	C1-C4	100nF cerámico
2	C5;C6	15pF cerámico
1	C7	22nF cerámico
1	C8	1μF electrolítico
8	C9;C11;C12;C14	100pF cerámico
4	C10;C13;C16;C19	100nF cerámico
<b>4 RESISTENCIAS</b>		
3	R1-R3	10K
1	R4	470
<b>5 CIRCUITOS INTEGRADOS</b>		
1	U1	PIC 16F877
4	U2-U5	ADS1232
<b>7 VARIOS</b>		
1	J1	USB-B
4	J2-J5	GX 16/5
1	X1	4Mhz
1	X2	4,9152Mhz
1	Caja aluminio	10x10x5 cm
1	Cable	IDE x 40 hilos

## 4.8 Programación PIC

Se programó en assembler. La programación es un poco más tediosa que en C o en C++ pero los códigos quedan 4 veces más cortos. Lo que significa que el bucle que realiza el programa se ejecuta 4 veces más rápido y además se tiene un control byte a byte de la memoria RAM.

Además nos permite utilizar un microcontrolador con cuatro veces menos memoria para el programa, lo que se traduce en una ventaja económica, porque usamos un microcontrolador mucho más chico.

## 4.9 Interfaz

La primera interfaz diseñada era un anexo a la interfaz que ya poseía la máquina de ensayo. Estaba programada en Visual C# y se encargaba de graficar y guardar los datos de deformación de los sensores.

Como se decidió renovar toda la electrónica de la máquina de ensayos mientras se realizaba este proyecto, la interfaz original y el anexo programado pasaron a ser obsoletos.

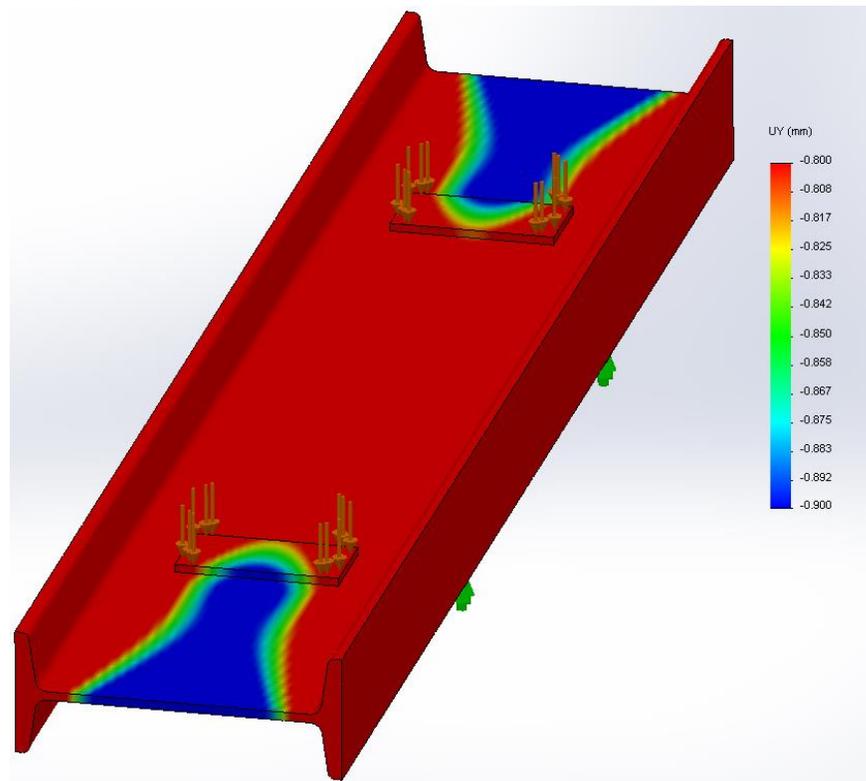
La interfaz final se programó utilizando LabView. En esta se combina el control de la máquina de ensayos junto con la toma de datos de los sensores, el gráfico en tiempo real de los esfuerzos y deformaciones y al finalizar el ensayo se crea una planilla de Excel con los datos.

## 4.10 Anclajes

Actualmente la mesa se extiende con la ayuda de un perfil doble T de 400mm. Mide unos 3,5m y pesa 300Kg aproximadamente. Cada vez que se realiza un ensayo a una probeta se debe quitar el perfil de la mesa y cuando se ensaya una viga se debe volver a colocar el doble T sobre la misma.



La simulación en solidworks determinó que el perfil se deforma 0,85 mm al aplicar 2500Kg sobre cada uno de los apoyos.



Se realizó un ensayo y se midió la deformación del perfil y esta fue de 0,83mm. Se llegó a la conclusión de que los datos arrojados por la simulación en Solidworks son precisos y que se puede diseñar la ménsula usando esta herramienta.

## PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

El diseño de la ménsula se fue ajustando hasta que la deformación máxima fue cercana a una centésima de mm. Esta deformación representa solo el 1,25% de lo que se deformaba la mesa previamente al utilizar el perfil.

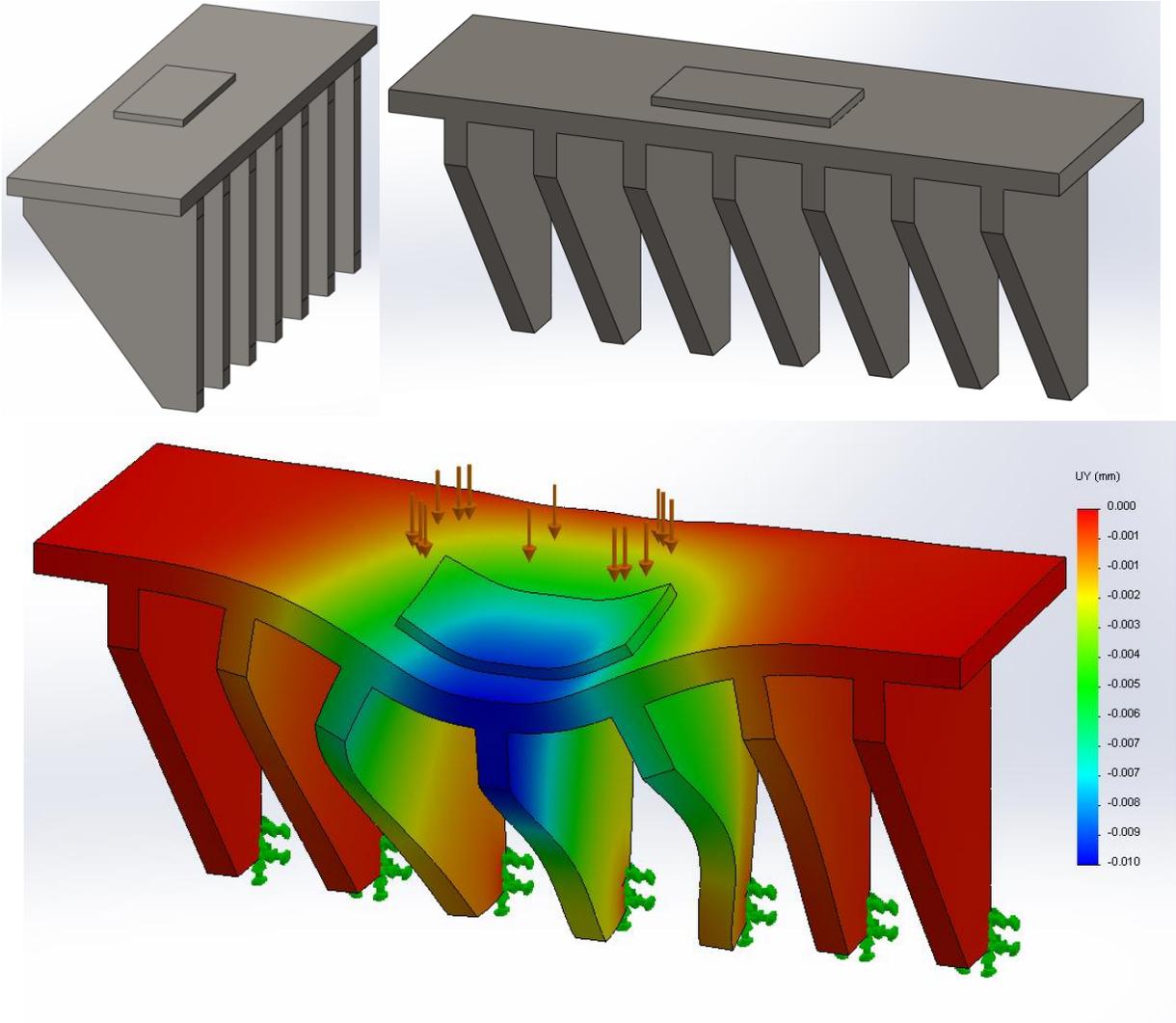


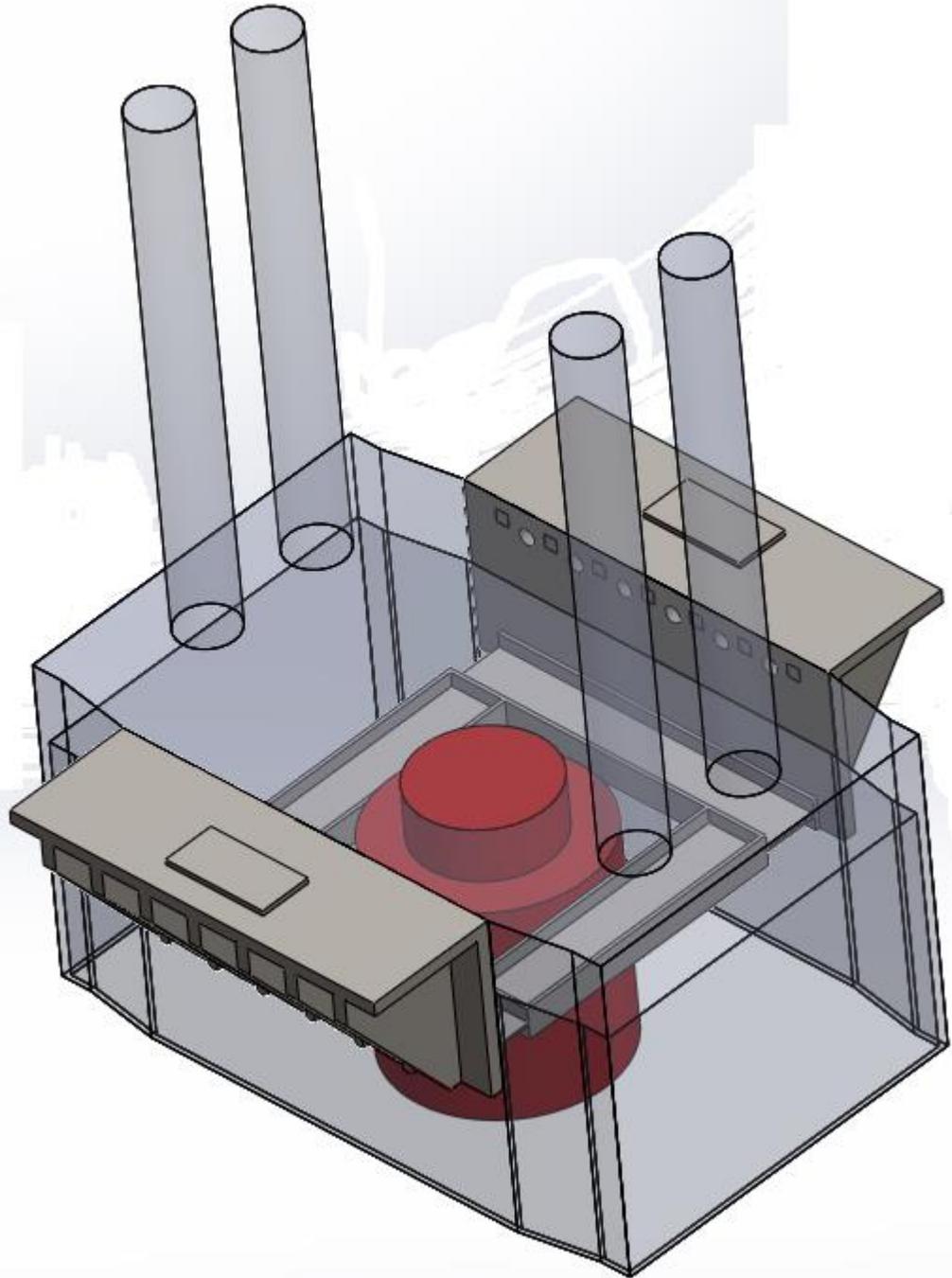
Figura 16 Deformación de la ménsula aplicando 5.000 Kg

Estas ménsulas se abulonon a la mesa de la máquina y a un bastidor que soporta la parte inferior de las mismas.

## PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

---

El conjunto armado (Mensulas y Bastidor) se aprecian en la figura inferior.



El cilindro rojo es el pistón hidráulico de la máquina de ensayos. El bastidor queda alrededor de éste.

Tanto el encoder de posición como los sensores de desplazamiento máximo de la máquina deben ser retirados a la hora del montaje. Pero su ubicación y anclajes siguen siendo los mismos después de colocar el bastidor.

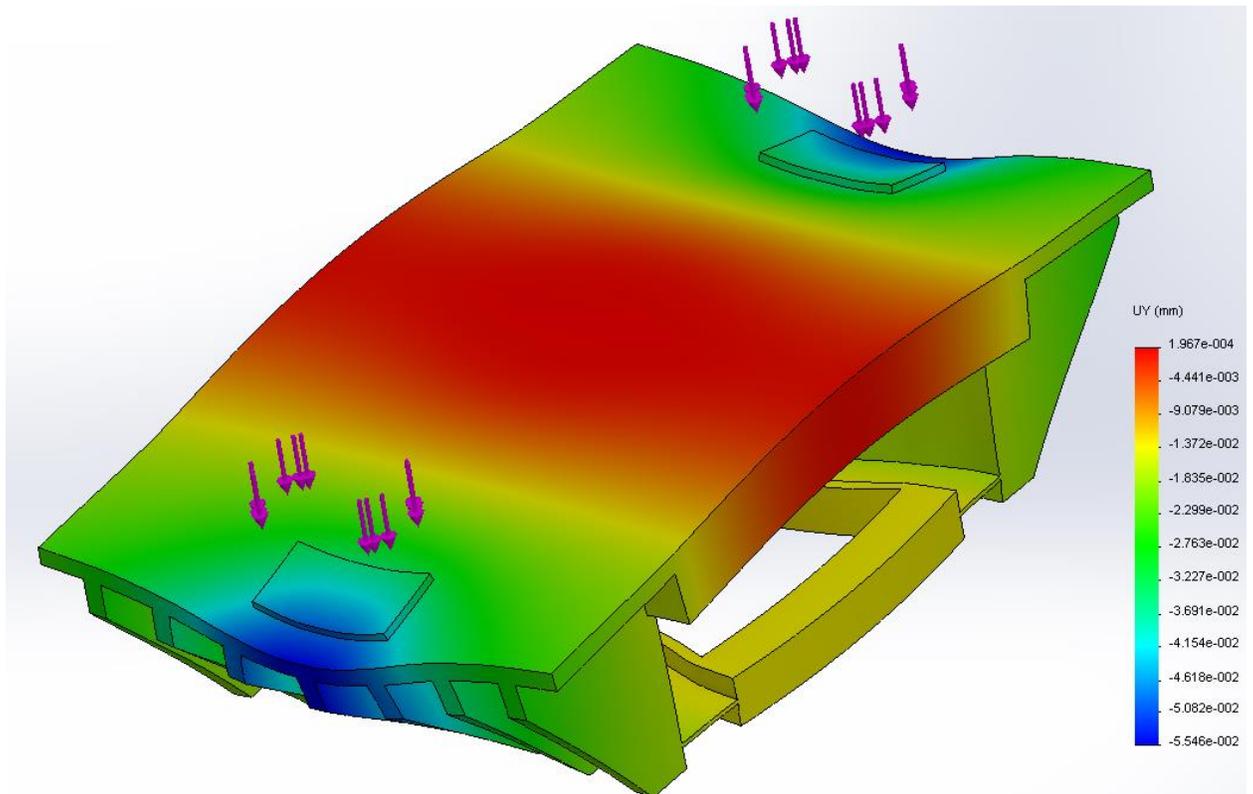


Figura 17 Deformación del conjunto armado

## 4.11 Costos

### Omega

Como es un trabajo hecho en la universidad y para la universidad la regional de La Plata aceptó realizar el mecanizado de las omegas. Por lo tanto el único costo que tiene este sensor es el de los materiales eléctricos.

Parte	Cantidad	Precio
Galga	2	15 U\$S
Conector GX 16/5	1	1,01 U\$S
Cable	1 m	2 U\$S
<b>Total</b>		<b>35 U\$S</b>

### Sensor grandes deformaciones

En este sensor sucede lo mismo que con las omegas. Por lo tanto el costo es el mismo.

## PFC-1510D – DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACION EN PROBETAS Y VIGAS DE HORMIGON ARMADO

### Electrónica

1 MÓDULO				
Cantidad	Referencia	Descripción	Precio unitario	Total
1	CP2102	UART a USB	1,4 U\$S	1,4 U\$S
20 CAPACITORES				
Cantidad	Referencia	Descripción	Precio unitario	Total
4	C1-C4	100nF cerámico	0,25 \$	1 \$
2	C5;C6	15pF cerámico	0,25 \$	0,5 \$
1	C7	22nF cerámico	0,25 \$	0,25 \$
1	C8	1µF electrolítico	0,25 \$	0,25 \$
8	C9;C11;C12;C14	100pF cerámico	0,25 \$	2 \$
4	C10;C13;C16;C19	100nF cerámico	0,25 \$	1 \$
4 RESISTENCIAS				
3	R1-R3	10K	0,25 \$	0,75 \$
1	R4	470	0,25 \$	0,25 \$
5 CIRCUITOS INTEGRADOS				
1	U1	PIC 16F877	3 U\$S	3 U\$S
4	U2-U5	ADS1232	2,75 U\$S	11 U\$S
7 VARIOS				
1	J1	USB-B		
4	J2-J5	GX 16/5	1,01 U\$S	4,04 U\$S
1	X1	4Mhz	10 \$	10 \$
1	X2	4,9152Mhz	10 \$	10 \$
2	Plaqueta	Bifaz 10x10 cm	10 U\$S	20 U\$S
			<b>Total</b>	<b>50 U\$S</b>

### Anclajes

De acuerdo a los precios ofrecidos por una metalúrgica de la zona.

Parte	Cantidad	Precio
Bastidor	1	3.700
Ménsula	2	5.600
	Total	14.900

## 4.12 Conclusiones

Con este trabajo no solo se consiguió cumplir con los objetivos planteados sino que en lo personal adquirí conocimientos en adquisición de datos, digitalización y filtrado de los mismos.

Con la experiencia ganada en el uso de galgas extensiométricas pude asesorar a otros grupos de investigación y actualmente están utilizando galgas en sus ensayos.