

# Medición de fuerza, potencia y eficiencia tracción de máquinas agrícolas\*

Proyecto realizado conjuntamente con la Facultad de Ciencias Agrónomas - UNC

Bongiovanni Pablo\*\*  
Cosiansi Fernando\*\*\*  
Guanuco Luis Alberto\*\*\*\*  
Sanso Marco\*\*\*\*\*  
Vassia Gonzalo Luis\*\*\*\*\*

Facultad Regional Cordoba - Universidad Tecnológica Nacional

## Resumen

*La disponibilidad de energía en forma de hidrocarburo fósil tiende a desaparecer y su reemplazo por biocombustibles compete con la producción de alimentos para una población creciente. De esta manera ser eficientes en su uso se torna cada vez más exigente.*

*Nuestro país agricultor por excelencia emplea gran cantidad de energía para producir alimentos, de la cual una buena proporción se emplea en los tractores para remolcar las máquinas operadoras.*

*El tractor, transformador de la energía disponible en los hidrocarburos en trabajo pone a disposición con diferentes combinaciones los factores de la potencia y posibilidades mecánicas, hidráulicas, eléctricas y neumáticas por medio de distintos dispositivos. Uno de los usos más comunes es como sistema de arrastre de máquinas operadoras.*

## Parte I. Informe<sup>1</sup>

### 1. Introducción

El comportamiento de un tractor se mide a través de un indicador denominado “Eficiencia” que se calcula relacionando proporcionalmente la potencia útil con aquella disponible.

Los factores que determinan la potencia en un cuerpo con movimiento rectilíneo son la fuerza empleada “**F**” la distancia recorrida “**e**” y el tiempo empleado “**t**”, en cualquiera de ellos se puede tener una pérdida. Por o cual se deben cuantificar todos ellos durante la operación agrícola.

La distancia recorrida posible es aquella que determina el número de revoluciones del motor, la relación de transmisión y el tamaño de la rueda, que es más o menos diferente de la real dependiendo del tipo de suelo y del esfuerzo solicitado por la máquina para ser arrastrada, del peso

del tractor, del área de contacto (rueda-suelo).

De esta manera se tiene que medir:

1. El esfuerzo ( $R_o$ ) que tiene que utilizar para moverse a si mismo, remolcándolo.

---

\*proyecto4r2@gmail.com

\*\*Leg. 48969

\*\*\*Leg. 48384

\*\*\*\*Leg. 49544

\*\*\*\*\*Leg. 46988

\*\*\*\*\*Leg. 49283

---

<sup>1</sup> La edición de éste documento fue realizado integramente bajo el editor LyX[7], el cual es una herramienta L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X conocido en el ambiente de la edición de documentos. LyX es una de los editores mas utilizados por su facil manejo, accesibilidad al ser un software GPL y como también de las capacidades que posee[8].

2. El esfuerzo ( $F$ ) que tiene que utilizar para remolcar otra máquina.
3. El espacio que recorre el tractor, cuando se mueve solo ( $E_t$ ) y cuando arrastra una máquina ( $E_r$ ).

El tiempo empleado para realizar dicho trabajo ( $t$ ).

Diferenciando el trabajo útil de aquel parásito podemos saber cual es la proporción que emplea cada uno, concepto conocido como Eficiencia.

Eficiencia es:

$$\varepsilon = \frac{T_u}{T_t} = \frac{T_u}{T_u + T_p} \therefore \varepsilon = \frac{\text{potencia util}}{\text{potencia disponible}}$$

$$\begin{aligned} \text{Trabajo util :} & T_u = F \cdot e \\ \text{Trabajo perdido por esfuerzo :} & T_p = R_o \cdot e \\ \text{Trabajo perdido por espacio :} & T_p = (F + R_o) \cdot e_{pv} \end{aligned}$$

## 1.1. Objetivo

En términos generales los objetivos de la medida pueden ser: la vigilancia o seguimiento de procesos, como es el caso de la medida de la temperatura ambiente, de los contadores de gas y de agua, de la monitorización climática, etc.; el control de un proceso, como en una necesidad de la ingeniería experimental, como sucede con el estudio de la distribución de temperaturas en el interior de una pieza irregular, o de la fuerza sobre el conductor simulado de un vehículo cuando éste choca contra un objeto. Por el volumen o la naturaleza de la información deseada, los sistemas CAD no permiten por el momento prescindir de este tipo de estudios. Las medidas en prototipos son además necesarias para verificar los resultados de los modelos desarrollados en un ordenador.

En este caso, se desarrolla un sistema que permita cuantificar la eficiencia del tractor en los distintos puntos del lote de forma de llegar a concretar en un mapa de eficiencia y caracterizar el comportamiento del tractor.

Elementos de Medición Directa e Indirecta:

- Celda de carga
- Contador de vueltas
- Reloj

## 1.2. Aplicación

La Ingeniería electrónica trata de poder resolver todo tipo de problema mediante la aplicación de técnicas, para llevar el problema físico al ámbito electrónico en el cual se desea manipular con todos los conocimientos que se dispone. Este caso es uno de ellos, ya que mediante el uso de transductores y demás dispositivos, observamos como se manifiestan éstos parámetros descritos en los párrafos anteriores. La resolución del mismo se describe en la figura 1.

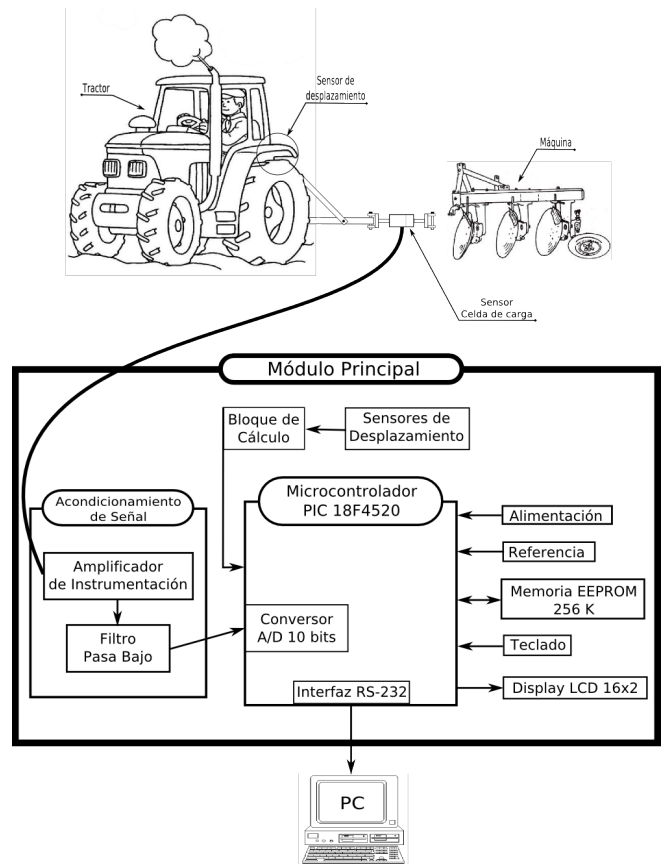


Fig. 1: Representación gráfica de la aplicaciones electrónicas al proyecto.

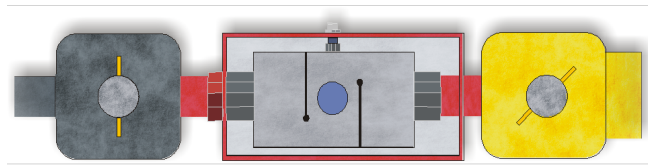
De manera que se manipulan algunos parámetros físicos como:

Fuerza: Se utiliza una celda de carga.

- e: Distancia recorrida, aplicando un dispositivo conocido comúnmente como cuenta vuelta.
- T: Tiempo empleado, se lleva un sincronismo de proceso gobernado por un reloj o clock dispuesto internamente en el microprocesador y es el encargado de realizar todo los procesos.

## 2. Fuerza

El acoplamiento de las máquinas agrícolas al tractor se realiza mediante el dispositivo que se muestra en la figura 2.



(a) Disposición de celda de carga entre el tractor y la máquina agrícola.

Fig. 2: Celda de carga.

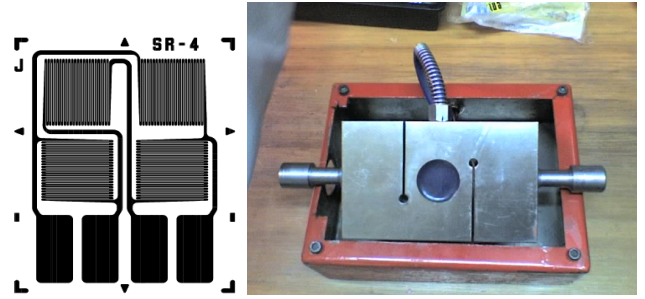
### 2.1. Celda de carga

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida. La celda de carga es un transductor que convierte las señales provenientes de unas galgas extensométricas, en configuración puente, donde la deformación que sufre la celda al aplicarle una fuerza axial desequilibra el puente. Esta característica fundamental es aprovechada por las galgas extensométricas que varían su resistencia en correspondencia su deformación mecánica.

#### 2.1.1. Strain gages o galgas extensométricas

Las galgas extensométricas se basan en la variación de la resistencia de un conductor o un semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico. Este efecto fue descubierto por Lord kelvin en 1856. Si se considera un hilo metálico de longitud  $l$ , sección  $A$  y resistividad  $\rho$ , su resistencia eléctrica  $R$  es

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$



(a) Disposición de los strain gages en la celda de carga. (b) Fotografía de la celda de carga en el gabinete a ser usado.

Fig. 3: Dispositivos fundamentales para la adquisición de la fuerza o carga.

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada uno de las tres magnitudes que intervienen en el valor de  $R$  experimenta un cambio y, por lo tanto,  $R$  también cambia de la forma

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (2)$$

El cambio de la longitud que resulta de aplicar una fuerza  $F$  a una pieza unidimensional, siempre y cuando no se entre en la zona de fluencia figura 4, viene dado por la ley de Hooke,

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E\frac{dl}{l} \quad (3)$$

Donde  $E$  es una constante del material, denominada módulo de Young,  $\sigma$  es la tensión mecánica y  $\varepsilon$  es la deformación unitaria.  $\varepsilon$  es adimensional, pero para mayor claridad se suele dar en “microdeformaciones” (1 microdeformación =  $1\mu\varepsilon = 10^{-6}m/m$ ).

Si se considera ahora una pieza que además de la longitud  $l$  tenga una dimensión transversal  $t$ , resulta que como consecuencia de aplicar un esfuerzo longitudinal no sólo cambia  $l$  sino que también lo hace  $t$ . La relación entre ambos cambios viene dada por la ley de Poisson, de la forma

$$\mu = -\frac{dt/t}{dl/l} \quad (4)$$

donde  $\mu$  es el denominado coeficiente de Poisson. Su valor está entre 0 y 0,5, siendo, por ejemplo, de 0,17 para la fundición maleable, de 0,303 para el acero y de

0,33 para el aluminio y cobre. Obsérvese que para que se conservara constante el volumen debería ser  $\mu = 0,5$ .

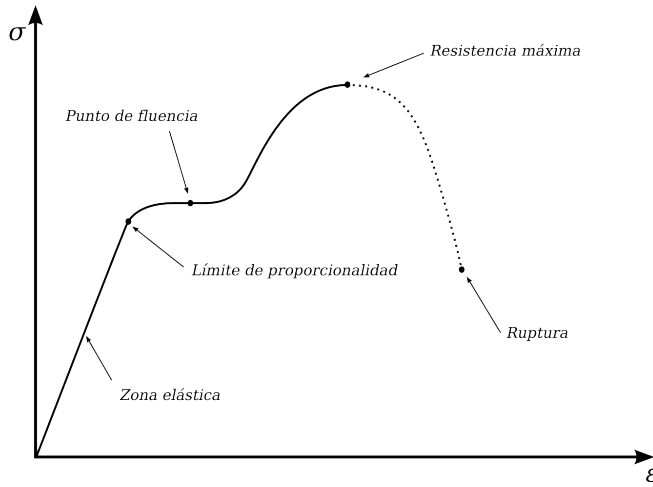


Fig. 4: Relación entre esfuerzos y deformaciones. La escala de la zona elástica está muy ampliada.

Para el hilo conductor considerado anteriormente, si se supone una sección cilíndrica de diámetro  $D$ , se tendrá

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad (5)$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{dD}{D} = -2\mu \frac{dl}{l} \quad (6)$$

La variación que experimenta la resistividad como resultado de un esfuerzo mecánico es lo que se conoce como efecto piezorresistivo. Estos cambios se deben a la variación de la amplitud de las oscilaciones de los nudos de la red cristalina del metal. Si éste se tensa, la amplitud aumenta, mientras que si se comprime, la amplitud disminuye. Si la amplitud de las oscilaciones de los nudos aumenta, la velocidad de los electrones disminuye, y  $\rho$  aumenta. Si dicha amplitud disminuye,  $\rho$  también disminuye. Para el caso de los metales, resulta que los cambios porcentuales de resistividad y de volumen son proporcionales.

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad (7)$$

donde  $C$  es la denominada constante de Bridgman, cuyo valor es de 1,13 a 1,15 para las aleaciones empleadas comúnmente en galgas, y de 4,4 para el platino.

Aplicando la ecuación 6, el cambio de volumen se puede expresar como

$$V = \pi l \frac{D^2}{4} \quad (8)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + 2 \frac{dD}{D} = \frac{dl}{l} (1 - 2\mu) \quad (9)$$

y, por lo tanto, si el material es isótropo y no se rebasa su límite elástico, la ecuación 2 se transforma finalmente en

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} [1 + 2\mu + C] = K \frac{dl}{l} \quad (10)$$

donde  $K$  es el denominado factor de sensibilidad de la galga, definido directamente como el factor dentro del corchete es la expresión anterior. A partir de los valores dados se ve que  $K$  es del orden de 2, salvo para el platino ( $K = 6$ ) y el isoelástico ( $K = 3,5$ ).

Así pues, para pequeñas variaciones la resistencia del hilo metálico deformado puede ponerse de la forma

$$R = R_0 (1 + x) \quad (11)$$

donde  $R_0$  es la resistencia en reposo y  $x = K\epsilon$ . El cambio de resistencia no excede del 2%.

En caso de un semiconductor, al someterlo a un esfuerzo predomina el efecto piezorresistivo [1]. Las expresiones de la relación resistencia-deformación son para un caso concreto [2]:

- para un material tipo  $p$

$$\frac{dR}{R_0} = 119,5\epsilon + 4\epsilon^2 \quad (12)$$

- para un material tipo  $n$

$$\frac{dR}{R_0} = -110\epsilon + 10\epsilon^2 \quad (13)$$

donde  $R_0$  es la resistencia en reposo a 25°C, y se supone una alimentación a corriente constante.

Vemos, pues, que existe una relación entre el cambio de resistencia de un material y la deformación que experimente éste. Si se conoce la relación entre esta deformación y el esfuerzo que la provoca [3], a partir de la medida de los cambios de resistencia se podrán conocer los esfuerzos aplicados y, en su caso, las magnitudes que provocan dichos esfuerzos en un sensor apropiado. Un resistor dispuesto de forma que sea sensible a la deformación constituye una galga extensométrica.

Las limitaciones que cabe considerar en las aplicación de este principio de medida son numerosas y conviene conocerlas en detalle, pues de lo contrario es difícil obtener información útil con este método que durante años ha demostrado ser sumamente valioso.

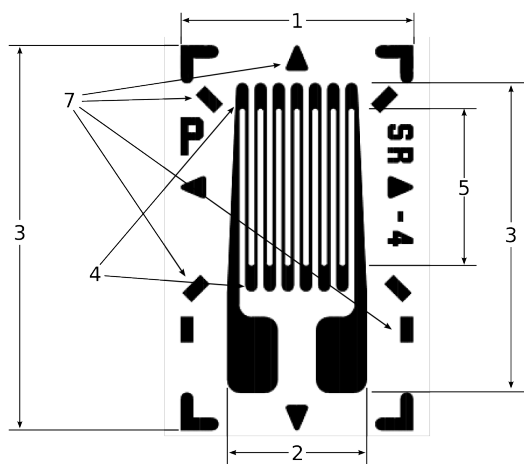


Fig. 5: Parámetros de una galga impresa: 1 Anchura del soporte; 2 anchura de la galga; 3 longitud del soporte; 4 extremos ensanchados; 5 longitud activa; 6 longitud total de la galga; 7 marcas de alineación.

En primer lugar, el esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico de deformación. Éste no excede del 4 % de la longitud de la galga y va desde unos  $3000\mu\epsilon$  para las semiconductoras a unos  $40000\mu\epsilon$  para las metálicas.

En segundo lugar, la medida de un esfuerzo sólo será correcta si es transmitido totalmente a la galga. Ello se logra pegando ésta cuidadosamente mediante un adhesivo elástico que sea suficientemente estable con el tiempo y la temperatura. A la vez, la galga debe estar aislada eléctricamente del objeto donde se mide y protegida del ambiente.

Se supone también que se está en un estado plano de deformaciones, por ejemplo que no hay esfuerzos en la dirección perpendicular a la superficie de la galga. Para que la resistencia eléctrica de ésta sea apreciable se disponen varios tramos longitudinales y en el diseño se procura que los tramos transversales tengan mayor sección, ver figura 5, pues así se reduce la sensibilidad transversal a un valor de sólo el 1 o el 2 % de la longitudinal.

La temperatura es una fuente de interferencias por varias razones. Afecta a la resistividad y módulo de elas-

ticidad del material, a sus dimensiones y las del soporte. Como resultado de todo ello, una vez la galga está dispuesta en la superficie de medida, si hay un cambio de temperatura, antes de aplicar ningún esfuerzo se tendrá ya un cambio de resistencia. en galgas metálicas este cambio puede ser hasta  $50\mu\epsilon/^{\circ}C$ .

Esta interferencia se compensa con el método de la entrada “opuesta”. Consiste en este caso en el empleo de las denominadas galgas “pasivas”, que son galgas iguales a la de medida dispuestas junto a ésta, de forma que experimentan el mismo cambio de temperatura, pero que no están sometidas a esfuerzos mecánicos. En cualquier caso, para evitar dilataciones diferenciales excesivas, en cada material a ensayar hay que emplear galgas previstas para él, es decir, que tengan un coeficiente de dilatación similar.

En galgas semiconductoras este efecto de la temperatura es muy acusado. En las denominadas galgas auto-compensadas se compensa el aumento de la resistividad con la temperatura con una disminución de la resistencia debido a la expansión del material soporte. Se logran deformaciones térmicas de sólo  $5\mu\epsilon/^{\circ}C$  en un margen de temperatura de unos  $20^{\circ}C$ .

un factor que puede provocar el calentamiento de la galga es la propia potencia que disipa cuando, al medir la resistencia, se haga circular por ella una corriente eléctrica. En las galgas metálicas la corriente máxima es de unos 25 mA si el soporte es buen conductor de calor (acero, cobre, aluminio) y de 5 mA si es mal conductor (plástico, madera). La potencia permitida aumenta con el área de la galga y va desde  $0,77W/cm^2$  a  $0,15W/cm^2$ , según el soporte. En las galgas semiconductoras, la potencia máxima disipable es de unos 250 mW.

Otra fuente de interferencia son las fuerzas termoelectromotrices presentes en la unión de dos metales distintos, ya que pueden dar una tensión de salida superpuesta a la de interés si se alimenta la galga con corriente continua. Su presencia se reconoce si cambia la salida al variar la polaridad de la alimentación. Deben corregirse bien mediante el método de insensibilidad intrínseca, por selección de materiales, bien mediante filtrado, a base de alimentar la galgas con corriente alterna.

Idealmente, las galgas deberían ser puntuales para poder medir los esfuerzos en un punto concreto. En la práctica sus dimensiones son apreciables, y se supone que el “punto” de medida es el centro geométrico de la galga. Si se van a medir vibraciones, la longitud de onda de éstas debe ser mayor que la longitud de la galga. Si, por ejemplo, ésta es de 5 mm y se mide en acero, donde

la velocidad del sonido es de unos 5900 m/s, la máxima frecuencia medible es del orden de 100 KHz que es ciertamente muy alta.

Si se mide en una superficie no uniforme, como el hormigón, puede interesar, en cambio, realizar un promediado de deformaciones para no caer en error debido a una singularidad en la superficie.

Las galgas extensométricas de silicio son sensibles a la luz, si bien la magnitud de los efectos ópticos probablemente sean despreciable en las condiciones de iluminación habituales [4].

Frente a todas estas posibles limitaciones, por su pequeño tamaño, gran linealidad y también por su baja impedancia, las galgas extensométricas son uno de los sensores con mayor aplicación.

## 2.2. Acondicionamiento de señal

Los acondicionadores de señal, adaptadores o amplificadores, en sentido amplio, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, un a señal apta para ser presentada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar. Consisten normalmente en circuitos electrónicos que ofrecen, entre otras funciones, las siguientes: amplificación, filtrado, adaptación de impedancia.

Dado que la mayor parte de los puentes de sensores se alimentan con una fuente de tensión o de corriente que tiene un terminal puesto a tierra, el amplificador conectado a su salida no puede tener ninguno de sus terminales de entrada puesto a tierra (ver figura). Por razones que se verán luego, conviene, además, que la impedancia desde cada uno de los terminales de entrada del amplificador a tierra sea igual y alta. A un amplificador de estas características se le denomina amplificador diferencial (AD).

La señal que proporciona una configuración como la de la galgas es de un nivel muy bajo, esto se debe principalmente a que la celda de carga esta diseñada para experimentar variaciones de carga de hasta 5 [T], por lo tanto para pequeñas variaciones de carga se experimenta variaciones infinitesimales en el desequilibrio del puente. Para procesar los datos obtenidos por la celda de carga, se debe acondicionar la señal.

### 2.2.1. Amplificador de Instrumentación

Se denomina amplificador de instrumentación a todo circuito que posea simultáneamente; alto rechazo del modo común; ganancia estable que sea a la vez variable con una única resistencia y sin que se contrapongan directamente ganancia-ancho de banda (como sucede en un AO); tensión y corrientes de desequilibrio (offset) bajas y con pocas derivas; e impedancia de salida también baja. Comercialmente se dispone de circuitos monolíticos, estructura que deriva de una de dos básicas, que se van a denominar “circuito con dos AO” y “circuito con tres A” [5].

Para éste proyecto se ha optado por emplear el amplificador de instrumentación INA118 de Brow Brown.

El INA118 es un amplificador de instrumentación de propósitos generales de baja potencia y ofrece una excelente exactitud. Su versátil diseño con tres AO y su pequeño tamaño lo hace ideal para un gran rango de aplicaciones.

Un resistor externo determina cualquier valor de ganancia de 1 a 10000. Posee una protección comprendido hasta  $\pm 40V$  sin perjuicio alguno.

El INA118 es ajustable para obtener muy bajos voltajes de offset ( $50\mu V$ ), deriva térmica ( $0,5\mu V/^{\circ}C$ ) y una RRMC de (110 dB a  $G=1000$ ). Esto operando con una fuente de alimentación bajo hasta  $\pm 1,35V$ , y requiere poca corriente  $350\mu A$ , ideal para aplicaciones en sistemas a batería.

El INA118 esta disponible en 8-pin encapsulado plástico DIP, y SO-8 de montaje superficial, específico en un rango de temperatura de  $-40^{\circ}C$  a  $+85^{\circ}C$ .

La figura 6 muestra una representación simplificada del INA118. Cada entrada es protegida por dos transistores FET que proporciona una baja resistencia en serie bajo condiciones normales de la señal. Preserva un excelente performance de ruido. Cuando se aplica una tensión excesiva, estos transistores limitan la corriente de entrada, aproximadamente 1,5 a 5mA.

La tensión de entrada diferencial pasa por unos buffers (Q1 y Q2), causando una señal de corriente a través de  $R_g$ ,  $R_1$  y  $R_2$ . El amplificador diferencial de salida, A3, elimina la componente a modo común de la señal de entrada y refiere la señal de salida al terminal Ref.

Igualmente en la figura se describe la tensión de salida de A1 y A2. La  $V_{be}$  y  $I_r$  producen perdidas de carga a través de  $R_1$  y  $R_2$  sobre el voltaje de salida de A1 y A2 que es aproximadamente 1V menos que el voltaje de entrada.

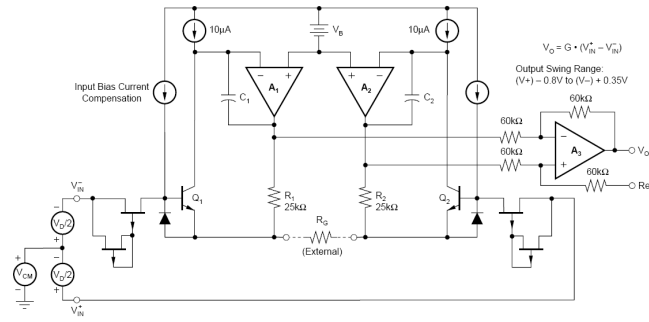


Fig. 6: Circuito interno del Amplificador de Instrumentación INA118 de Brow Brawn.

### 2.2.2. Circuito

Una vez elegido el amplificador lo que se deberá hacer es la determinación del modo de funcionamiento de dicho funcionamiento, lo que quiere decir que bajo una serie de experimentación y demás llegaremos al circuito con el cual se realiza la adquisición de datos de la celda de carga.

En primera instancia se debe determinar el rango de tensión que se podrá a la salida del puente formado por las galgas extensométricas. Esto es una de las características otorgada por el fabricante, he aquí unos de las dificultades que se nos presentaron. Por razones que se desconoce la facultad de ciencias agrónomas no tiene dato alguno del fabricante de la celda de carga que fue entregada a este grupo de trabajo, por lo tanto, se ha realizado una serie de experimentos a dicha celda para obtener este dato fundamental, esto se muestra en el apéndice A.

Con las características del AI se lleva a cabo el diseño de la etapa de acondicionado de la señal según hoja de dato, como se ve en la figura 7. Para la determinación de la ganancia del AI se realiza los siguientes cálculos

$$G = 1 + \frac{50K\Omega}{R_G} \quad (14)$$

$$R_G = \frac{50K\Omega}{G - 1} \quad (15)$$

$$R_G|_{G=1000} = 50\Omega \quad (16)$$

La resistencia  $R_1$  de la figura 7 cumple la función de proporcionar un nivel de continua que no causa problema alguno ya que este será eliminado como toda tensión a modo común que se encuentre en la entrada del AI. Para alimentar el puente se toma como dato importante

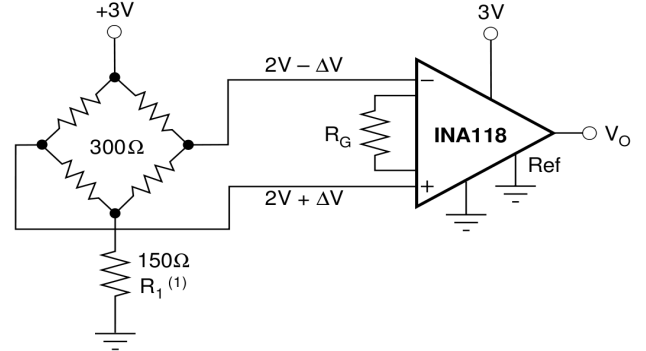


Fig. 7: Aplicación típica de un amplificador de instrumentación para medición en puentes resistivos.

la sensibilidad de la celda que es  $2mV/V$  por lo tanto con una alimentación de 3V en el puente se tendrá una buena excursión en la entrada del AI, lo que luego de ser amplificado se tendrá una tensión máxima menos de 5V.

Como ya se expuso con anterioridad, el INA118 dispone de un nivel bajo de tensión de offset, pero debe tenerse en cuenta que este nivel varía según la ganancia a la que este diseñado. En el apéndice B se realiza la medición del nivel de offset que se tiene para nuestro diseño, en donde se lo considera dentro de los rangos de error que se desea obtener. La decisión de presumir que este valor no es problemático se debe a que es corregible en la etapa que sigue en este proyecto, es decir, la conversión AD del microprocesador. El nivel que se obtuvo es de 32mV, esto representa un "0000000110" en el conversor, luego en el programa que realiza el almacenamiento de los datos en la memoria se resta este valor que correspondería al offset. Se reduce el rango de adquisición pero es una solución más fácil de lograr. Otra opción era referenciar la masa del AI a un nivel de tensión tal que corrigiera el offset pero esto llevaba a un problema que es la estabilidad del potenciómetro que regulase este nivel, y otra forma de corregir es bajar la ganancia del AI y de esta forma se reduciría la tensión de offset en la misma medida donde se tendría que utilizar otro amplificador pero en este caso tan solo para aumentar en nivel de tensión ya que la señal es acondicionada por el AI, esto se podría hacer utilizando por ejemplo el OP177 de Analog Device que es un amplificador operacional de ultra precisión ideal para esta situación.

### 3. Firmware del Microcontrolador

El Módulo Principal de nuestro proyecto cuenta con un MCU (Micro Controller Unit) PIC18F4520, que hemos programado en un híbrido de lenguajes entre C y ensamblador utilizando el IDE MPLAB V8.0 de Microchip y el compilador C18. Si bien no fue de nuestro agrado utilizar un IDE y compilador que no fueran licenciados bajo la GPL (General Public License), decidimos hacerlo debido a la escasa disponibilidad de alternativas y el poco tiempo con el que contábamos. En un futuro desearíamos implementar nuestro trabajo utilizando únicamente herramientas GPL.

El programa realizado muestra una serie de menús al usuario para que este seleccione la tarea que desea realizar. En la figura 8 se muestra un esquema aproximado del “flujo” de menús a través del programa

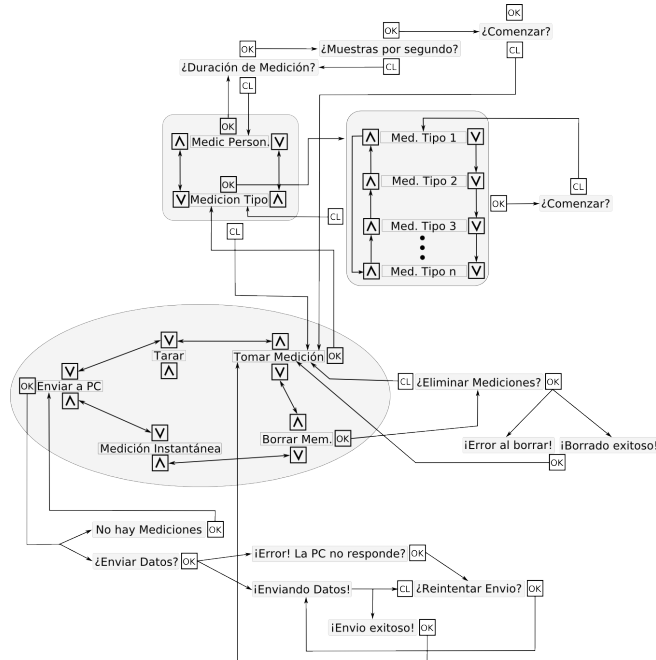


Fig. 8: Esquema representativo de flujo del menú principal.

En la figura 8, cada menú está representado por el texto que muestra encerrado dentro de un rectángulo alrededor del cual se muestran los botones que el usuario puede utilizar en él. Los menús que están dentro del ovalo corresponden al menú principal y a partir de ellos se desprenden los distintos submenús. Con las flechas se representa el flujo del programa al presionar un botón.

Por simplicidad se han obviado algunos submenús. El significado de algunos de estos menús es el siguiente:

**Tomar Medición:** Este menú permite al usuario realizar una medición. En la siguiente sección se explica el significado de la misma.

**Medición Instantánea:** Muestra en el display los valores actuales de fuerza y velocidad que toman los sensores.

**Enviar a PC:** Permite que los datos guardados en la memoria sobre las mediciones realizadas se envíen a la PC para ser graficados y analizados.

**Tarar:** Esta opción considera el valor actual de fuerza como cero.

**Borrar Memoria:** Este menú posibilita el borrado de las mediciones que se han hecho y así liberar la memoria.

**Medición Personalizada:** En este tipo de medición el usuario tiene la libertad de seleccionar la Duración de la Medición en segundos y la Cantidad de Muestras por segundo (o frecuencia de muestreo).

**Medición Tipo:** Este menú presenta 10 tipos distintos de combinaciones de valores pre grabados para la Duración de la Medición y la Cantidad de Muestras, permitiendo una mayor rapidez al tomar la medición.

**Duración de Medición:** Cuadro en el que el usuario debe ingresar un valor en segundos correspondiente a la duración de la medición.

**Muestras por segundo:** Cuadro en el que el usuario debe ingresar un valor correspondiente a la cantidad de muestras por segundo que desea tomar.

**Medición Tipo n:** Menús para la selección de un par de valores pre grabados de la Duración de la Medición y la Cantidad de Muestras.

**No hay Mediciones:** No hay mediciones en la memoria que se puedan enviar por el puerto serie.

**¡Error! La PC no responde:** No se ha recibido respuesta desde el PC, esto puede ser porque en la PC no se ha conectado el puerto o porque el cable no está conectado o tiene defectos.

**¡Envío exitoso!:** Los datos se han enviado y recibido correctamente.



### 3.1. Medición

Uno de los objetivos del sistema del que trata nuestro proyecto es adquirir y almacenar la serie de valores de fuerza y velocidad arrojados por los sensores. Cada grupo de valores Fuerza-Velocidad (que definen el estado del sistema en el tiempo que fueron tomados) recibe el nombre de Muestra. El conjunto de muestras que se adquieren y almacenan durante el período que dura un experimento es denominado Medición. Antes de realizar una Medición, el usuario deberá ingresar los siguientes valores:

- Tiempo durante el cual se realizará la Medición ( $T_{med}$ ):  $1seg \leq T_{med} \leq 1525seg$ .
- Cantidad de Muestras por segundo:  $5 \leq Mps \leq 1000$

Para el intervalo  $158 \leq Mps \leq 1000$ , el AD sub-muestrea la señal cada  $99,2\mu seg = T_{mc}$ , suma estos valores y los promedia cuando se cumple el tiempo de muestra  $T_m$  (para una explicación más detallada de esto véase la sección Muestreo). Para  $5 \leq Mps \leq 157$  se toman valores cada intervalos de tiempo  $T_{sm} = kT_{mc}$  distintos de  $T_{mc}$  para luego promediarlos cuando se cumpla  $T_m$ .

Debido a que la cantidad de memoria disponible es limitada, luego de que el usuario ingrese la duración en segundos, el MCU calculará la máxima cantidad de muestras por segundos que pueden ser tomadas para que la Medición ocupe el resto de memoria disponible. El usuario podrá seleccionar un valor menor al máximo si desea realizar mediciones futuras.

### 3.2. Almacenamiento de Datos

Los datos tomados de los sensores se almacenarán en la memoria 24LC256 de Microchip. Esta es una memoria EEPROM con 256 Kbytes de capacidad que funciona a 400 Khz y se comunica con el MCU a través del bus I2C. Este protocolo de comunicación (I2C) utiliza 2 líneas para establecer la comunicación, estas son SDA (SIGNAL DATA) y SCL (SIGNAL CLOCK). Para agilizar y facilitar la escritura de datos en la memoria, en ciertos casos hemos usado las características de escritura por página y Acknowledge polling que posee ésta. Esto nos permitió enviar un mayor volumen de datos en un menor tiempo. La transferencia de datos es controlada por el MCU actuando como maestro. Para el caso particular de la escritura de página (64 bytes) el procedimiento seguido por el MCU es el siguiente:

**Condición de inicio – Byte de control –  
Word address – Data byte-1 – Data byte-  
2 ... Data byte-n – Condición de parada**

donde:

**Condición de inicio:** consiste en una transición de nivel alto a bajo de la (SDA) mientras el clock (SCL) esta en alto.

**Byte de control:** Consta de un código de control (4 bits), la dirección del chip seleccionado (3 bits) y un bit indicando lectura o escritura.

**Word address:** Es la dirección de memoria en la que se quieren escribir los datos. En nuestro caso es de 2 bytes.

**Data byte's:** Son los bytes con los datos que se escribirán en la memoria.

**Condición de Parada:** Es el estado que el maestro (el MCU) pone en la líneas para indicar el final de la transmisión.

### 3.3. Estructura de los datos en la memoria

La capacidad de la memoria utilizada es de 32000 bytes. Estos a su vez pueden ser divididos en 500 páginas de memoria con 64 bytes cada una. Esto es así debido a que la memoria posee un buffer interno de 64 bytes que permite el grabado de páginas completas de una sola vez, evitando las etapas de inicio, byte de control y parada cada vez que se envía un nuevo byte de datos. Hemos aprovechado este hecho para estructurar por páginas los datos grabados. Para ayudar a entender esta estructura se ha realizado un gráfico con la posición y significado de cada byte en la memoria, ésta figura se encuentra en el apéndice 25.

La primera página contiene información general sobre lo que se espera encontrar en la memoria, específicamente en ella podemos encontrar los siguientes datos:

**Byte 0:** Código de datos válidos: 1 byte (un unsigned char con el valor 142 decimal).

**Byte 1:** Cantidad de Mediciones realizadas: 1 byte (unsigned char).

**Byte 2:** Byte bajo correspondiente al valor unsigned int de la página de inicio de la primera medición (este valor es siempre 1).

Byte 3: Byte alto correspondiente al valor unsigned int de la página de inicio de la primera medición (este valor es siempre 0).

Byte 4: Byte bajo correspondiente al valor unsigned int de la página de inicio de la segunda medición

Byte 5: Byte alto correspondiente al valor unsigned int de la página de inicio de la segunda medición.

⋮

Byte (n-1): Byte alto correspondiente al valor unsigned int de la página de inicio de la última medición.

Byte n: Byte bajo correspondiente al valor unsigned int de la página de inicio de la última medición<sup>2</sup>.

La segunda página de memoria contiene los datos generales de la primera medición y las primeras muestras de ésta. Como datos generales hacemos referencia a 2 valores antes mencionados:

Byte j+0: Byte bajo correspondiente al unsigned int de la duración de la medición.

Byte j+1: Byte alto correspondiente al unsigned int de la duración de la medición.

Byte j+2: Byte bajo correspondiente al unsigned int de la cantidad de muestras por segundos.

Byte j+3: Byte alto correspondiente al unsigned int de la cantidad de muestras por segundos<sup>3</sup>.

Cuando se agrega una nueva medición, se calcula en que página ha terminado la última para empezar desde allí agregando los datos generales de esa medición y las primeras muestras de la misma. Si una medición termina antes de completar la última página que ocupa, el espacio que resta para llenar esa página es ignorado y queda vacío. Esto se muestra en la imagen explicativa de la estructura de la memoria. Para almacenar los datos de fuerza y velocidad de cada muestra se utiliza un arreglo de estructuras con los siguientes datos por elemento:

Byte k+0: Byte bajo correspondiente al valor unsigned int de la Fuerza.

<sup>2</sup> Debido a que se determinó una cantidad máxima de 10 Mediciones, el n utilizado arriba no puede ser mayor que  $n = (Mediciones \cdot 2) + 2 = 10 \cdot 2 + 2 = 22bytes$ .

<sup>3</sup> j es el índice de página.

Byte k+1: Byte alto correspondiente al valor unsigned int de la Fuerza.

Byte k+2: Byte cuyo valor es proporcional a la velocidad del tractor.

Byte k+3: Byte cuyo valor es proporcional a la velocidad del máquina<sup>4</sup>.

### 3.4. Muestreo

Para digitalizar la señal proveniente del Módulo de Acondicionamiento de señal hemos utilizado el conversor de 10 bits que trae integrado el 18F4520. El circuito de entrada del A/D se muestra en la figura 9.

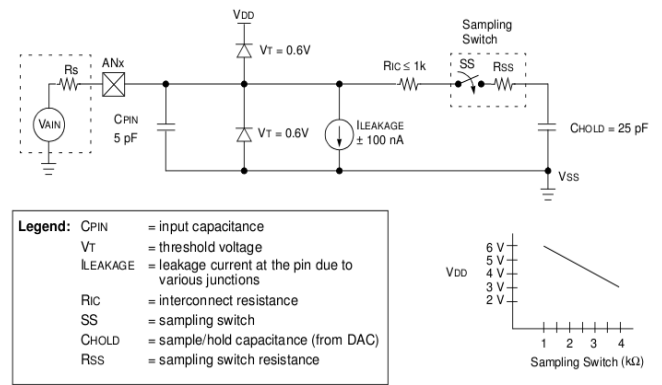


Fig. 9: Circuito interno de conversor A/D del microprocesador 18F4520.

En la hoja de datos del MCU utilizado se encuentran las expresiones de cálculo para el mínimo tiempo de adquisición de nuestro circuito. Debido a que  $V_{dd} = 5V$ , se considera que  $R_{ss} = 2K\Omega$ , por lo que se tiene:

$$T_{ACQ} = T_{AMP} + T_C + T_{COFF} \quad (17)$$

Para temperaturas menores a  $25^\circ C$  el coeficiente de temperatura ( $T_{COFF}$ ) es nulo, sin embargo, para asegurar el correcto funcionamiento en un mayor rango de temperatura, se considerara para éste un valor de  $1,2\mu seg$ . Entonces se llega a:

$$T_{AMP} = 0,2\mu seg \quad (18)$$

<sup>4</sup> k es el índice de muestras y toma valores en el rango  $0 \leq k \leq 60$ , siendo estos siempre pares y múltiplos de 4, salvo para  $k=0$ .

$$T_C = -(C_{HOLD})(R_{IC} + R_{SS} + R_S) \ln \left( \frac{1}{2047} \right) \mu s$$

$$T_C = -(25pF)(1k\Omega + 2k\Omega + 2,5k\Omega) \dots$$

$$\dots \ln(0,0004883) \mu s = 0,76 \mu s \quad (19)$$

$$T_{ACQmin} = 0,2s + 0,76s + 1,2s = 2,16s \quad (20)$$

donde:

$R_S$ : Impedancia de salida de nuestro amplificador de instrumentación

$T_{ACQmin}$ : Tiempo mínimo necesario para una correcta Adquisición.

$T_{AMP}$ : Tiempo de seteo del amplificador.

$T_C$ : Tiempo de carga del capacitor de retención.

Como frecuencia del AD hemos seleccionado  $F_{osc}/64$ , donde  $F_{osc}$  es la frecuencia de oscilación del MCU, que vale 20 MHz. Esto nos da una frecuencia de clock para el A/D de:

$$F_{AD} = \frac{F_{OSC}}{64} = \frac{20 \cdot 10^6}{64} = 312,5 KHz \quad (21)$$

$$T_{AD} = \frac{1}{F_{AD}} = 3,2 \mu s \quad (22)$$

El tiempo de adquisición fue configurado a 20 TAD, por lo tanto tendremos:

$$T_{ACQ} = 20 T_{AD} = 20 \cdot 3,2 \mu s = 64 \mu s \quad (23)$$

La conversión se realiza en un tiempo de 11 TAD (1 TAD por bit, más 1). Luego tendremos un tiempo de conversión de:

$$T_{CONV} = 11 T_{AD} = 11 \cdot 3,2 \mu s = 35,2 \mu s \quad (24)$$

El A/D tardará en tener lista una muestra, desde el momento en que se la solicita (seteando GO/DONE), un tiempo igual a la suma del tiempo de adquisición y el de conversión, es decir:

$$T_{mc} = T_{CONV} + T_{ACQ} = 35,2 \mu s + 64 \mu s = 99,2 \mu s \quad (25)$$

donde  $T_{mc}$  es el tiempo de Muestra del Conversor, es decir el tiempo que tarda hasta tener el valor digital de la conversión.

El tiempo que tarda el AD en realizar una muestra es muy pequeño, es por ello que decidimos hacer varias “sub-muestras” en un período de muestra, sumarlas y luego almacenarlas en la memoria para luego promediarlas. Es decir que cuando el AD interrumpe al MCU con prioridad alta, inmediatamente largamos una nueva conversión y procesamos el dato antes de salir de la interrupción. El procesamiento implica la acumulación progresiva del valor de conversión en un acumulador al que llamaremos CONVERSIONES. Antes de seguir explicando el proceso de muestreo que hemos implementado es conveniente definir las siguientes variables/constantes:

- $F_m = M_{ps}$ <sup>5</sup> = Muestras por segundo = Frecuencia de muestreo =  $\frac{1}{T_m}$
- $T_{med}$  = Período o duración total de la medición
- $T_m$  = Período de Muestreo =  $\frac{1}{M_{ps}} = \frac{1}{F_m}$
- $T_{mc}$  = Tiempo de conversión del AD =  $99,2 \mu s$
- $T_{sm}$  = Período de sub-muestreo =  $\frac{1}{F_{sm}}$
- $F_{sm}$  = Frecuencia de sub-muestreo =  $\frac{1}{T_{sm}}$

Todas las magnitudes de interés en este proceso están en función de  $F_m$ ,  $T_{med}$  y  $T_{mc}$ . Cuando el usuario ingresa los dos primeros valores se realiza el siguiente cálculo:

$$F_{sm} = \frac{T_m}{T_{mc}} = \frac{1}{F_m \cdot 99,2 \mu s} \quad (26)$$

$F_{sm}$  indica la cantidad de muestras que podemos tomar en un período de muestra  $T_m$ . Como el acumulador CONVERSIONES es de tipo unsigned int (2 bytes) el rango de valores que puede tomar es  $0 \leq \text{CONVERSIONES} \leq 65535$ . Este hecho trae consigo el inconveniente de que si  $F_{sm}$  es mayor que 64 el producto de este por el valor máximo desbordaría el acumulador CONVERSIONES. Para evitar esto ignoramos una cierta cantidad de muestras MI dadas por la siguiente expresión:

<sup>5</sup> En el programa hemos utilizado el sinónimo informal “Muestras por segundo” para referirnos a  $F_m$  porque consideramos que el usuario podría familiarizarse más fácilmente con esta designación.

$$MI = \frac{1023F_{sm}}{65535} + 1 \quad (27)$$

donde  $MI$  son las Muestras Ignoradas. Luego, para cada  $T_m$  se sumarán  $MS$  valores de conversión del AD, siendo:

$$MS = \frac{F_{sm}}{MI + 1} \quad (28)$$

donde  $MS$  la cantidad de Muestras Sumadas.

En resumen, el conversor tomará un valor cada  $99,2\mu s$ , este valor se sumará o no al acumulador dependiendo de  $MI$ ; cuando se hayan sumado  $MS$  valores de conversión, se grabará CONVERSIONES en un buffer para luego ser copiado a la memoria. Este proceso se repite una cantidad de veces dada por el producto  $F_m \cdot T_{med}$  y luego la medición termina. La figura 10 muestra algunas de las magnitudes explicadas.

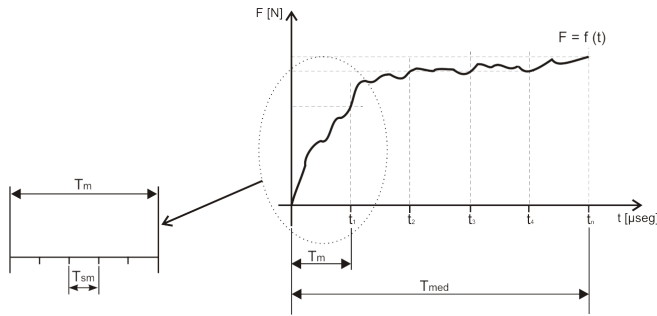


Fig. 10: Grafica explicativa del significado de cada magnitud.

#### 4. Comunicación Serial

Se transmitirán los datos desde la memoria 24LC256 (conectada al MCU principal) hacia la computadora mediante el puerto COM1 de un PC. Para ello el MCU 18F4520 cuenta con un módulo llamado EUSART. Hemos configurado este módulo para que transmita una trama de 8 bits sin paridad a 19200 kbps. Para asegurar que los datos lleguen bien, enviamos la memoria completa (32000 bytes) 3 veces, es decir, leemos cada página y la enviamos 3 veces seguidas, con lo cual podemos verificar en la computadora, a medida que esta recibe los datos, si las tres copias de cada página recibidas son iguales. Además de esto, antes de comenzar el envío de datos, solicitamos respuesta desde la PC,

esto nos permite reconocer posibles problemas de comunicación como un cable mal conectado, que el software del PC no esté listo para recibir los datos, etc.

#### 5. Criterios para la eleccion del MCU

Hemos optado por utilizar el microcontrolador 18F4520 de la empresa Microchip ya que este tiene varias características de nuestro interés, como por ejemplo:

- Conversor de 10 bits integrado.
- Gran disponibilidad de puertos de entrada-salida.
- Módulo MSSP para comunicaciones I2C y SPI.
- Módulo EUSART para comunicación serial.
- 2 prioridades de interrupción.
- Frecuencia de funcionamiento relativamente alta (20 Mhz).
- Suficiente memoria para nuestros requerimientos.
- Posibilidad de programación en lenguaje C.

#### 6. Velocidad

Para poder obtener la velocidad del tractor y de la máquina agrícola se toma de las en las ruedas, un sensor magnético con un circuito como se puede ver en la figura 11.

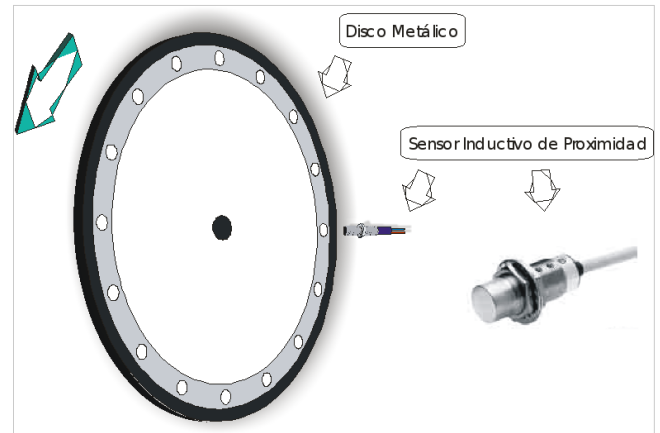


Fig. 11: Dispositivo detector de desplazamiento del tractor y maquina agrícola.

Cuando uno de los huecos del disco metálico cruza por el sensor, el circuito magnético se interrumpe y la dispositivo conduce. Ésta variación se transforma (utilizando una técnica similar a la del acondicionamiento de señal aplicado en la celda de carga), luego es modulada y transmitida a un receptor que está conectado directamente al microprocesador.

### 6.1. Sensor

En nuestro proyecto medimos la velocidad de arrastre de la maquina y la velocidad de tracción del tractor. Para poder realizar la medición de ambas velocidades precisábamos un sensor que nos envié los datos que requeriáramos. El primer sensor que se nos ocurrió fue un sensor óptico, pero fue descartado rápidamente. Para elegir nuestro sensor necesitábamos uno que cumpla con ciertas características. En primer lugar debía adaptarse a las características del campo. Por lo tanto el polvo, agua o sedimentos de plantas no debería generar falsas lecturas del sensor. Como segunda condición tenía que ser versátil y de fácil aplicación a la rueda del tractor o maquina (según la necesidad). Por lo tanto tampoco debía tener un gran tamaño. Ante esta circunstancia pensamos en un sensor inductivo. El cual nos brindaría las características que nosotros precisábamos. Ya que el mismo capta la diferencia en la distancia entre secciones de un mismo material. Sin importar que exista polvo, barro o lo que sea sobre el mismo material. Pero a este tipo de sensor también lo terminamos descartando por su elevado precio. Por lo tanto terminamos eligiendo un sensor magnético que cumple muy bien con las condiciones antes mencionadas y su precio de mercado es muy favorable.

El sensor que escogimos fue el 177 que actúa con efecto hall. Cuando un cuerpo magnético pasa a cierta distancia del mismo el sensor envía una señal eléctrica. El sensor esta diseñado para que funcione de esta forma gracias al circuito de la figura 12.

El componente que esta con una X viene a ser el elemento que actúa con el efecto hall. El mismo no posee diferencia de potencial entre sus extremos cuando no existe campo magnético cerca. Por lo tanto a la salida 3 va a estar en corte. Ya que el transistor no es excitado para que entre en saturación. Cuando existe un campo magnético cercano a este elemento el mismo genera una diferencia de potencial entre sus extremos generando así que el A.O. sature y al pasar por el Trigger Schmitt se obtiene una señal más exacta que hace saturar al tran-

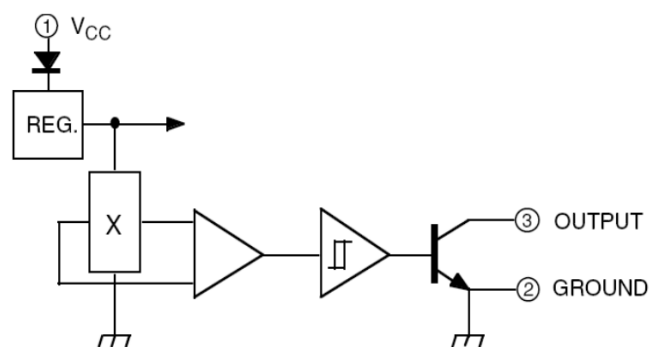


Fig. 12: Circuito interno del sensor magnético.

sistor y obtener señal de voltaje a la salida 3.

Con estos datos del funcionamiento del sensor ya podíamos probar si nos iba a servir para nuestro proyecto. Lo primero que hicimos fue armar un circuito contador para comprobar que el sensor media bien por cada imán que pasaba cerca del mismo. Al armar este circuito pudimos corroborar que el sensor contaba bien por cada imán que pasaba si ambos imanes pasaban con el mismo polo.

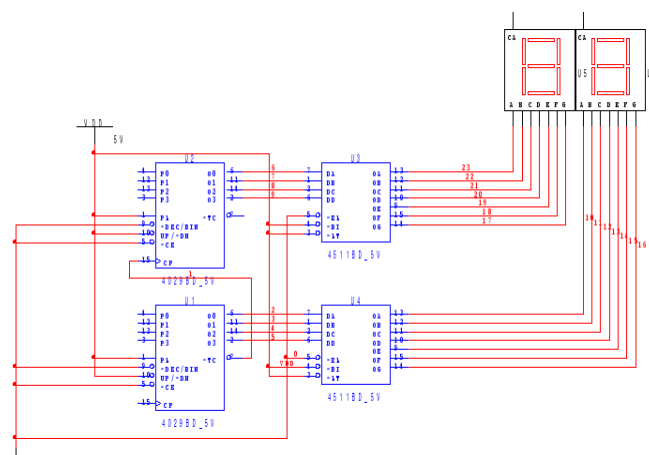


Fig. 13: Circuito utilizado para realizar experimentación, vea aparte el apéndiceC.

Con el circuito contador hecho el siguiente paso era simular la rueda de la máquina cosechadora o el tractor, para así poder probar el sensor como se comporta a distintas velocidades y distancias mínimas entre imanes. Para realizar dicha mediciones colocamos en primer lugar 4 imanes en una rueda de cartón en un radio de 71 mm. A esta rueda la adaptamos a un motor paso a

paso para poder probarla a distintas velocidades. Con estos cuatro imanes el sensor captaba bien a cada uno sin problemas de velocidad. Ya que llegamos a velocidades muy altas y seguía sensando bien. A continuación aumentamos la cantidad de imanes (ocho) distribuidos de forma equidistante por la rueda. Con esta cantidad de imanes y la velocidad máxima a la cual podíamos alcanzar el conteo de los imanes seguía siendo perfecto por el sensor. Por ultimo colocamos 16 imanes y vimos que con esta cantidad y el radio de solo 71 mm con un pequeño movimiento de un imán ya se atraía con el que le seguía en el radio. Por ende esta cantidad era nuestro limite para 71 mm de radio. Cuando realizamos la prueba para los 16 imanes nos dimos cuenta que el sensor ya no contaba exactamente bien para velocidades altas. Pero no les dimos importancia ya que en nuestro proyecto el tractor o la maquina nunca van a superar los 25 km/h (velocidad por debajo de la velocidad en la cual el sensor fallaba en la cuenta de algunos imanes). Por lo que decidimos después de estas pruebas utilizar 16 imanes en un radio de 71 mm para nuestro proyecto. Ya que así obtendríamos mayor exactitud para medir la velocidad instantánea del tractor o maquina.

## 6.2. Toma de datos PIC16F84

La velocidad es unas de las magnitudes que nos permitirán calcular magnitudes fundamentales para nuestro proyecto como ser: **Fuerza, Potencia, Eficiencia**. Se tendría que lograr obtener dos velocidades: una correspondiente al Tractor y otra a la Máquina agrícola. El sensor es un dispositivo que detecta La elección del microprocesador para este problema fue simple ya que no se requerían de grandes capacidades como ser procesamiento y memoria. Esto se podrá observar con mayor claridad cuando se realice la descripción del programa.

La situación en la que se aplica un microprocesador de estas características es la siguiente: Se debe realizar el cálculo del tiempo en que tarda en realizar el paso de dos sensores consecutivos. Esto permite realizar, mediante el empleo de tablas en memoria del microprocesador PIC18F4520, el cálculo de la velocidad instantánea del tractor como así también de la máquina agrícola la cuál es arrastrada por el tractor. En realidad lo que el microprocesador PIC16F84A realiza es el cálculo del tiempo que tarda en activar el paso de dos sensores magnéticos consecutivos y aplicando conceptos de física (movimientos circular) se llegará al valor del tiempo en unidades binarias, esto es, el valor de una variable de 8-bits.

## 7. Tiempo

El tiempo en el que algún fenómeno físico ocurre, es uno de los parámetros más susceptibles a errores por diferentes circunstancias. En éste caso se utiliza un reloj que oscila a un tiempo aproximadamente de  $0,2\mu\text{seg}$ , por lo tanto se está hablando de una base de tiempo muy baja. Éste reloj es el mismo con el que el microprocesador trabajará, ya que todo el funcionamiento de la máquina a medir debe estar sincronizada.

## 8. Software de análisis de datos

Al programa lo hemos desarrollado para un entorno Windows, utilizando como base el compilador C++ Builder 6.0. El objetivo principal fue crear una herramienta que le brinde al usuario la posibilidad de visualizar en la pantalla de su PC todo lo referido a las mediciones realizadas. Es decir, en forma general consta de un entorno visual que ofrece las siguientes opciones:

- Observar la totalidad de las mediciones y sus contenidos.
- Almacenamiento de las mediciones en un archivo ".txt".
- Visualización gráfica del comportamiento temporal de los parámetros.
- Impresión del gráfico.

### 8.1. Funcionamiento

Como se muestra en la figura , el programa está constituido por una ventana principal que contiene

1. Constantes a Ingresar: Hace referencia a las magnitudes de ciertas constantes que el usuario debe ingresar para que se realice el cálculo de la Eficiencia.
2. 2. Seleccione la Medición: En esta herramienta se cargan la totalidad de las mediciones efectuadas, dándole lugar (al operador) de optar por cualquiera de éstas.
3. Graficar: Al hacer click en las opciones que contiene (velocidad, fuerza, potencia y eficiencia), el usuario habilita el gráfico de dos dimensiones.

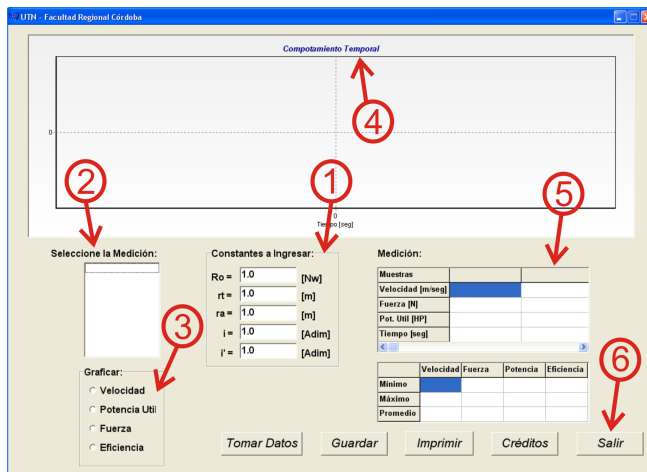


Fig. 14: Imagen principal del software compilado.

4. Gráfico en 2D: Representa y describe el comportamiento de los parámetros seleccionados en relación con el tiempo.
5. Tablas: En ellas se vuelca el contenido de la totalidad de las muestras (por medición seleccionada) con sus correspondientes magnitudes de: fuerza, velocidad, potencia útil, tiempo; y los máximos, mínimos y promedios de: velocidad, fuerza, potencia y eficiencia.
6. Botones: Ellos ofrecen al operador las siguientes opciones.
  - a) Tomar Datos: Realiza la descarga de datos del conversor AD.
  - b) Guardar: Guarda en el directorio C:\ un archivo con nombre Mediciones.txt con el contenido de las tablas y la fecha correspondiente que contenga la PC.
  - c) Imprimir: Envía una llamada de impresión con la gráfica cargada en la pantalla.
  - d) Créditos.
  - e) Salir

Una vez que el usuario ejecuta el archivo .exe correspondiente al programa y luego de la presentación, se muestra una ventana de diálogo denominada "Administrador de Configuración" (figura 15) que le indica los modos y referencias de operación.

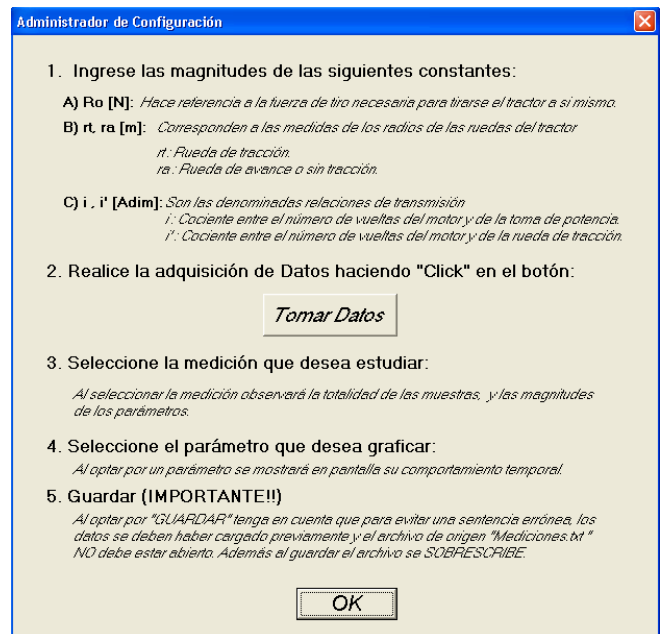


Fig. 15: Información que se muestra al usuario.

De manera que al tomar los datos, el programa completa la cantidad de mediciones realizadas, y al seleccionar una de éstas el operador observará todo lo descrito anteriormente, vea la figura 16.

Para finalizar, en las figuras 17 se exponen las ventanas de diálogo que pueden surgir luego de la sentencia "GUARDAR" y la generación del archivo .txt.

## 9. Otras características

Los detalles mas relevantes de este proyecto se encuentran centrados en el acondicionamiento de la señal obtenida por la celda de carga, los dispositivos que proporcionarán los desplazamientos de las máquinas agrícolas como así también el microprocesador que es el encargado de procesar dichas señales.

Para la alimentación del puente se considera el empleo de una batería. Esto nos permitirá que no se introduzca el ruido de la red de alimentación, 50 [Hz].

La resistencias a utilizar son de film metal con una tolerancia de 1 % para disminuir los errores en la variaciones de los parámetros de los componentes a usar.

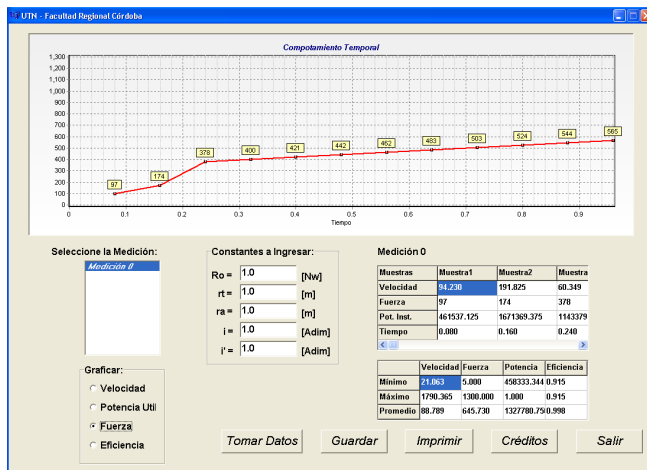
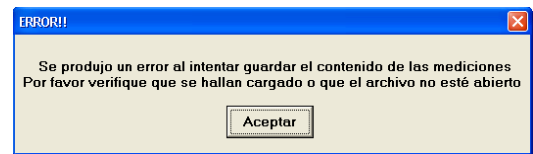
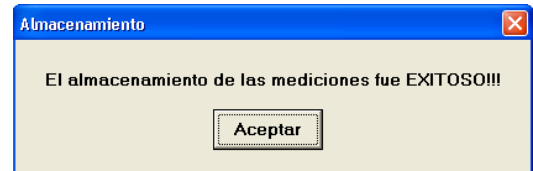


Fig. 16: Ejemplo del contenido de la ventana principal



(a) Ventana que anuncia el error en la transmisión de datos a la PC.



(b) En este caso la transferencia fue realizada en forma exitosa.

## 10. Conclusiones

### 10.1. Cosas por hacer:

Durante este proyecto hemos tratado de implementar las ideas que considerábamos más útiles y relevantes, dejando de lado aquellas de importancia relativa. Es por ello que han quedado muchas cosas para hacer que no han sido terminadas por falta de tiempo. Algunas de ellas son:

#### 10.1.1. Relativas a los sensores

- Nos hubiese gustado utilizar sensores más robustos, pero el costo de estos no justificaba su uso en nuestro proyecto. Debido a que los sensores que utilizamos funcionan en condiciones poco favorables, no estamos seguros de la vida útil que tendrán. Este punto podría ser suficiente justificación para el uso de sensores inductivos o magnéticos industriales robustos.
- Utilizar un sistema inalámbrico para la transferencia de datos desde los sensores hacia el Módulo Principal.
- Cambiar el sistema de sensor magnético e imanes distribuidos uniformemente en un disco por otro basado en sensores inductivos y discos perforados con una mayor densidad de puntos en su periferia.

#### 10.1.2. Relativas a la Circuitería de Acondicionamiento y Adaptación:

- Realizar un estudio más profundo con respecto a la física y la matemática del fenómeno que es fundamental como la deformación piezorresistiva.
- La implementación de algún tipo de filtro pasivo o activo.
- La posibilidad de utilizar algún dispositivo para referenciar el conversor A/D.

#### 10.1.3. Relativas al Módulo Principal

- Menú en el firmware del MCU donde se muestren los valores más importantes de cada Medición, como pueden ser: Potencia, velocidad y fuerza promedio, máximos y mínimos de cada magnitud, etc.
- Agregar 7 memorias 24LC256 más (el bus I2C soporta hasta 8 dispositivos) para lograr una capacidad de almacenamiento de 256 Kbytes. Ello permitirá almacenar más cantidad de Mediciones y Muestras por segundo.
- Crear funciones para desplazar cadenas por el display permitiendo que el usuario pueda leer las frases completas sin abreviaturas ni truncados en las palabras.
- Permitir que el usuario borre las Mediciones que desee al azar. Esto fragmentaría la memoria, por



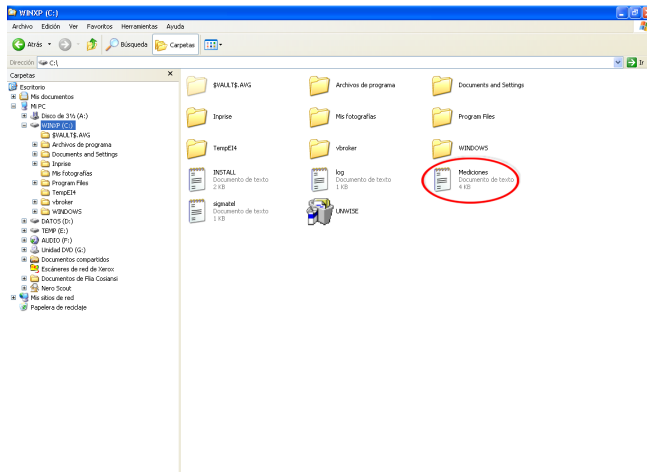


Fig. 18: En la imagen de explorador de archivo se ve como se almacena el archivo \*.txt con los datos de la medición creado por nuestro programa.

lo tanto crear también las funciones que solucionen este problema.

#### 10.1.4. Relativas al software de análisis de datos

- Ingresar la opción de imprimir el contenido de las mediciones de manera conjunta con el gráfico.
- Almacenar un archivo (ej: \*.bmp o \*.jpg) el gráfico mostrado en pantalla.
- Darle la libertad al operador de ingresar el directorio de almacenamiento acorde a sus necesidades.

Como aspectos positivos de este proyecto nos gustaría destacar los siguientes:

- La gran cantidad de nuevos conocimientos que hemos adquirido. Por ejemplo: programación de PIC's y uso de In-Circuit Debugger, uso de sensores de efecto hall y celdas de carga, transferencia de datos usando el estandar RS-232, manejo de displays LCD, teclado matricial, transferencia de datos por el bus I2C y manejo de memorias EEPROM, etc.
- La utilidad que tendrá el producto final de nuestro trabajo, ya que será utilizado por la cátedra de Maquinarias Agrícolas de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Córdoba como herramienta para el análisis y caracterización de máquinas y suelos.

- Nos hemos familiarizado con el proceso de acondicionamiento, adquisición y análisis de las señales provenientes de fenómenos físicos, en nuestro caso, la deformación de un cuerpo (señal analógica) o la cantidad de incrementos de una variable durante el paso de 2 imanes (señal discreta). Si bien nuestro trabajo fue aplicado a la medición de fuerzas y velocidades, nuestro objetivo general era diseñar un sistema de adquisición de datos, es decir, un sistema capaz de tomar muestras a intervalos variables de una señal física para luego almacenarlos en una memoria y poder estudiarlos.
- La oportunidad para crear sistemas y métodos nuevos y la satisfacción de verlos funcionar correctamente. Decimos esto porque en varias partes de nuestro proyecto hemos enfrentado desafíos, que si bien de seguro ya han sido resueltos por algún emprendimiento anterior de este tipo, para nosotros ofrecían la oportunidad de poner a prueba nuestro sentido común y creatividad. Creemos que esto es una excelente práctica antes de nuestra tesis.
- Hemos “inventado” nuestro propio protocolo de comunicación entre PIC's.

En contraste con lo anterior, haciendo este trabajo hemos descubierto algunos aspectos negativos:

- Hemos invertido demasiado tiempo en la realización de este proyecto, lo que ha interferido con otras actividades de nuestra vida.
- Al no saber calcular los tiempos que demandaba cada parte del trabajo, el resultado que presentamos no esta en la fase de depuración que hubiéramos querido.

*Para todos nosotros éste proyecto ha sido el primero en el cual se tuvo que investigar mucho más allá de los conocimientos que se disponía antes de comenzar con el mismo.*

## Parte II. Apéndice

### A. Experimentación “Celda de Carga”

Un dato imprescindible de este dispositivo es la sensibilidad, no sólo por razones de diseño sino también para

protección del mismo. En la figura 19 se muestra una hoja de datos de una celda de carga<sup>6</sup>. Los datos que se pudo rescatar de los profesionales de la facultad de ciencias agrónomas fueron fundamentales:

- Alimentación, lo que se pudo rescatar es que la celda de carga poseía una alimentación de 10V, tensión continua.
- Carga máxima a la que soportaba, las indicaciones que se pudo tener acerca de este tema fue no más de 5000Kg.
- Disposición de terminales de conexión, se debe tener bien en claro que antes de realizar cualquier medición se debe reconocer que función cumple cada uno de los terminales para realizar una correcta medición.

PARAMETER		UNIT S
Rated Capacities	500, 1000, 2000, 5000	Kg
Rated Output	2.0 ±0.1%	MV/V
Total Error	0.05	±% of Rated Output
Zero Return after 30 minutes	0.05	±% of Applied Load
Zero Balance	3	±% of Rated Output
Temperature Range: Operating	-30 to +80	°C
Temperature Range: Compensated	-10 to +40	°C
Temperature Effect: On Output	0.004	±% of Applied Load/°C
Temperature Effect: On zero	0.007	±% of Rated Load/°C
Safe Overload	150	% of Rated Capacity
Ultimate Overload	300	% of Rated Capacity
Excitation: Recommended	10	Volts AC or DC
Excitation: Maximum	15	
Input Impedance	420 nominal	ohm
Output Impedance	350 nominal	ohm
Insulation Impedance	>1000	megohm
Deflection at Rated Capacity	NA	mm
Weight (approximate) :	NA	kg
Construction	Stainless Steel	
Environmental Protection	IP68	
Cable	5m 6 core screened	
Connections - Produces a positive signal in compression.	Excitation + Blue Sense + Green Excitation - Black Sense - Grey Signal + White Signal - Red	The Screen is not connected to the load cell body.

Fig. 19: Hoja de dato de una celda de carga “PCM Procter & Chester Measurements”- Serie 620 de 500Kg a 5000Kg.

## A.1. Experimento 1

En éste primer ensayo se diseño un circuito típico para un amplificador de instrumentación con una ganancia  $G=500$ , vea la figura. Se sometió a la celda de carga con diferentes pesos que se pueden apreciar en el cuadro 1.

<sup>6</sup> Este material se obtuvo de la red, vea la referencia [6].

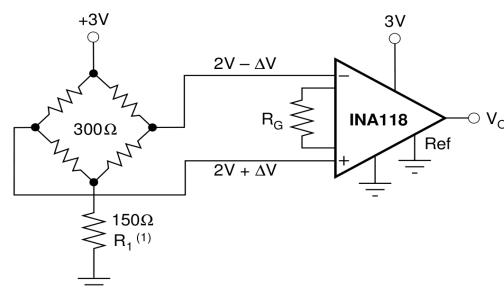


Fig. 20: Circuito típico para amplificar diferencialmente un puente de Wingstone.

Carga	[Kg]
1º yunque	100
2º máquina	190
3º pablo	71
4º fernando	64
5º marco	83
6º jorge	92
7º luis	67

Carga	[Kg] neto	[mV] Vo
1º	100	60
1º+4º+3º	235	122
1º+4º+3º+5º	318	168
1º+4º+3º+5º+7º	385	205
1º+4º+3º+5º+7º+6º	477	250

Tab. 1: Mediciones del experimento 1.

Del cuadro 1 se realiza el trazado de una curva carga-tensión de salida y el resultado se observa en la figura 21. De donde se observa la esperada linealidad que proporciona este tipo de dispositivos, también se puede calcular la pendiente de la curva, pero debido al corto rango de valores no se realiza este cálculo.

## A.2. Experimento 2

De la misma forma que en el experimento 1, se realizó un nuevo ensayo pero ahora con una máquina agrícola la cual tiene un peso de 160 Kg. El resultado de este ensayo se ve en el cuadro 2 y la figura 22 representa la curva carga-tensión de salida.

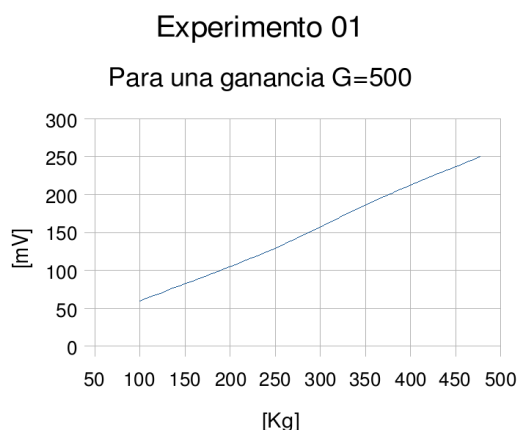


Fig. 21: Curva carga-tensión de salida para el experimento 1.

Carga	[Kg] neto	[mV] Vo
2 <sup>o</sup>	100	60
2 <sup>o</sup> +4 <sup>o</sup> +3 <sup>o</sup>	235	122
2 <sup>o</sup> +4 <sup>o</sup> +3 <sup>o</sup> +5 <sup>o</sup> +6 <sup>o</sup>	318	168

Tab. 2: Mediciones del experimento 2.

### A.3. Experimento 6

Para obtener una de las características principales de las celdas de carga, la sensibilidad, se realizaron ensayos en el Laboratorio Central de Ing. Mecánica<sup>7</sup> en donde se disponía de una herramienta fundamental como lo es la prensa hidráulica. Lo que se experimenta es las variaciones de niveles de tensión a valores de carga de hasta 3000 Kg., con lo que se obtendría el valor de sensibilidad de nuestra celda.

### A.4. Experimento 7

Una de las últimas pruebas que se realizaron a la celda de carga en el laboratorio de mecánica fue aumentando la ganancia del amplificador de instrumentación a 1000, esto se realizó ya que como se pudo observar en el cuadro 3 con una ganancia de 500 se tendría un valor pequeño para cuando la celda experimentase una carga de 5000 Kg., al rededor de 2,5 a 3 V. Por lo tanto si aumentamos a 1000 la ganancia se estipularía llegar a 5V para cuando la celda este cargada de 5000 Kg, esto es un valor ide-

<sup>7</sup> Se agradece al Ing. Ramirez e Ing. Casasnova quienes permitieron realizar estos experimentos en el laboratorio de Ingeniería Mecánica.

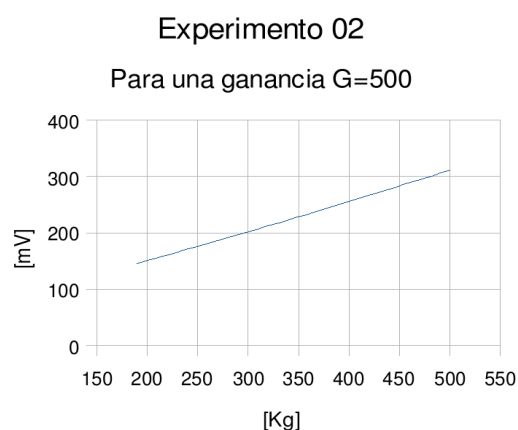


Fig. 22: Curva carga-tensión de salida para el experimento 2.

Carga [Kg]	Vo[mV]	
	G=500	G=1000
200	122,2	268
400	230	492
600	342	720
800	461	951
1000	584	1179
1200	692	1400
1500	874	1753
1700	997	1990
1900	1105	2210
2100	1227	2430
2200	1281	2540
2300	1340	2660
2400	1400	2780
2500	1450	2890
2600	1510	3000
2700	1560	3120
2800	1630	3240
2900	1680	3350
3000	1730	3470

Tab. 3: Mediciones del experimento 6. La 1<sup>a</sup> columna representa los diferentes valores de carga proporcionados por el instrumento hidráulico, la 2<sup>a</sup> columna representa la Vo del AI para una ganancia de 500 y posteriormente se aumento la ganancia a 100, esto es, la 3<sup>a</sup> columna.

al si recordamos que Vo será convertido por el AD del microprocesador y el mismo trabaja con una tensión de

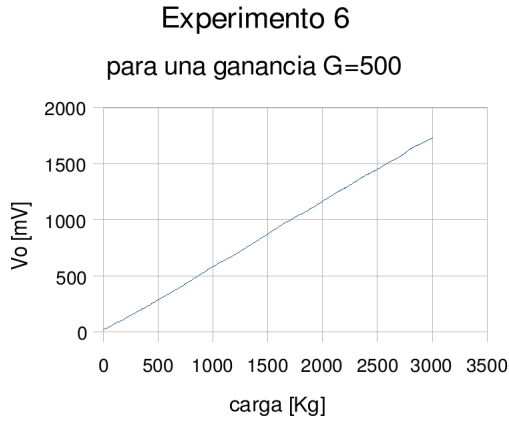


Fig. 23: Curva carga-tensión de salida para el experimento 2.

referencia de 5V; vea la figura 24 que muestra lo que se predijo.

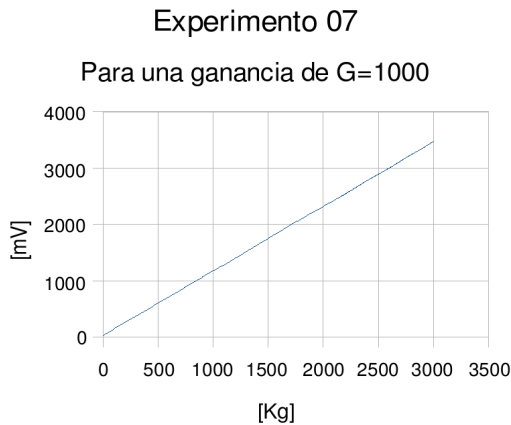


Fig. 24: Curva carga-tensión de salida para el experimento 2.

Para calcular la sensibilidad se debe tal solo realizar un cálculo de proporcionalidad, esto es debido a la linealidad de la respuesta de la celda de carga

$$\text{sensibilidad} = x^{mV/V} \quad (29)$$

$$\text{para } 5000Kg \rightarrow y = V_{cc} x^{mV/V} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} 3000Kg &\rightarrow 3470mV \\ 5000Kg &\rightarrow 5783,3mV = y \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} 5783,3mV &= 3V x^{mV/V} \\ x &= 1,93mV/V \simeq 2mV/V \end{aligned} \quad (32)$$

Por lo tanto, se llega a la conclusión que la sensibilidad de la celda es:  $2mV/V$ .

## B. Medición del Nivel de Offset

Para la medición del nivel de tensión de offset se debe disponer las entradas diferenciales como se muestra en la figura. Donde es claro que la tensión de salida tendría que ser teóricamente cero ya que no existe tensión diferencial alguna. Por lo que la tensión de salida se expresa

$$V_o = G (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{offset} \quad (33)$$

$$\text{para } V_{IN}^+ = V_{IN}^- = 0 \Rightarrow V_o = V_{offset} \quad (34)$$

Para el diseño de este proyecto se alcanzo un  $V_{offset} = 32\mu V$ .

## C. Experimentación del sensor magnético

Luego de un largo periodo de prueba, llegamos a simular el movimiento circular del tractor con un motor paso a paso y un contador, el cual iba contando las veces que pasaba el sensor por una serie de imanes dispuestos de forma concéntrica al eje del motor y pegados sobre un cartón circular. Con esto pudimos determinar la velocidad angular máxima a la cual puede girar la rueda del tractor, a su vez la máxima distancia a la cual puede estar separado el sensor de los imanes, siendo esta de 4mm, y la distancia mínima que debe existir entre imanes para que el campo magnético de uno no influya en el otro, siendo esta de  $22,5^\circ$ , con un radio de 71mm.

La frecuencia y secuencia del tren de impulsos para el motor paso a paso fue ingresada a través de un software de prueba.

$$\varpi = 2\pi f \quad (35)$$

$$\varpi = 2\pi 50Hz = 314,1592rad/seg \quad (36)$$

$$v = \varpi r \quad (37)$$

$$\varpi = 314,1592rad/seg \cdot 0,071m = 22,3m/seg \quad (38)$$

El acoplamiento al tractor se realizara a través de dos ruedas de plástico. La primera será para medir la fuerza del tractor y estará ubicada en la toma de fuerza del mismo, la segunda, en cambio, ubicada en la rueda delantera, servirá para medir la velocidad.

#### D. Disposición de datos en la memoria externa

Vea la figura 25 que muestra como se organizó los datos en la memoria externa 24LC256.

## Referencias

- [1] Y. Kanda. Piezoresistance effect is silicon. *Sensors and Actuators A*, vol. 28, 1991, págs. 83-91.
- [2] *Semiconductor strain gage handbook*. BLH electronics, 1973.
- [3] *Practical strain gage measurements*. Hewlett-Packard, Application Note 290-1, 1981.
- [4] D.A. Girham y G. Pickthorne. Light sensitivity on silicon strain gages. *J. Phys. E: Sci. Instruments*, vol. 22, págs. 1023-1025.
- [5] *Sensores y acondicionadores de señal*. Ramón Pallás Areny, 3ª edición, págs.137-150.
- [6] <http://www.pcm-uk.com>
- [7] <http://www.lyx.org>
- [8] <http://www.ubuntu.com/es>
- [9] Hojas de datos: PIC18F4520, PIC16F84, 24LC256, INA118, 117(sensor magnético).
- [10] *Display de cristal líquido*. Grupo J&J, 1997.
- [11] *Serial communication for WIN32*, Thierry shneider. <http://www.tetraedre.com>

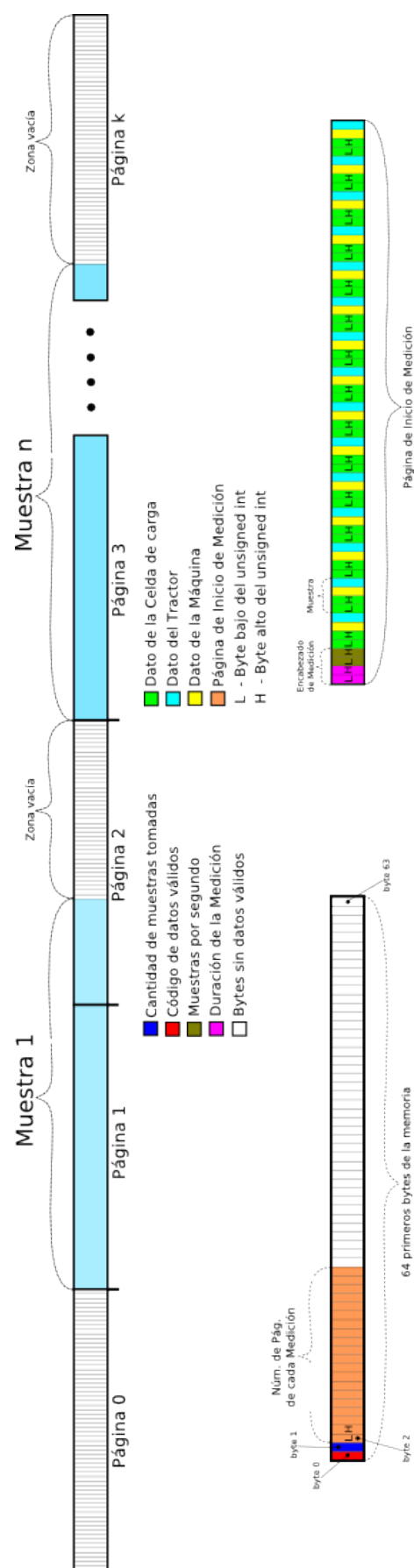


Fig. 25: Organización de la memoria.