

Medición de fuerza y potencia de máquinas agrícolas*

Proyecto realizado conjuntamente con la Facultad de Ciencias Agrónomas - UNC

Bongiovanni Pablo**
Guanuco Luis Alberto***
Sansó 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. Informe¹

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 lo 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.
2. El esfuerzo (F) que tiene que utilizar para remolcar otra máquina.

*proyecto5r1@gmail.com

**Leg. 48969

***Leg. 49544

****Leg. 46988

*****Leg. 49544

¹ La edición de éste documento fue realizado integralmente bajo el editor LyX [3], el cual es una herramienta $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 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.

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:

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

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

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.

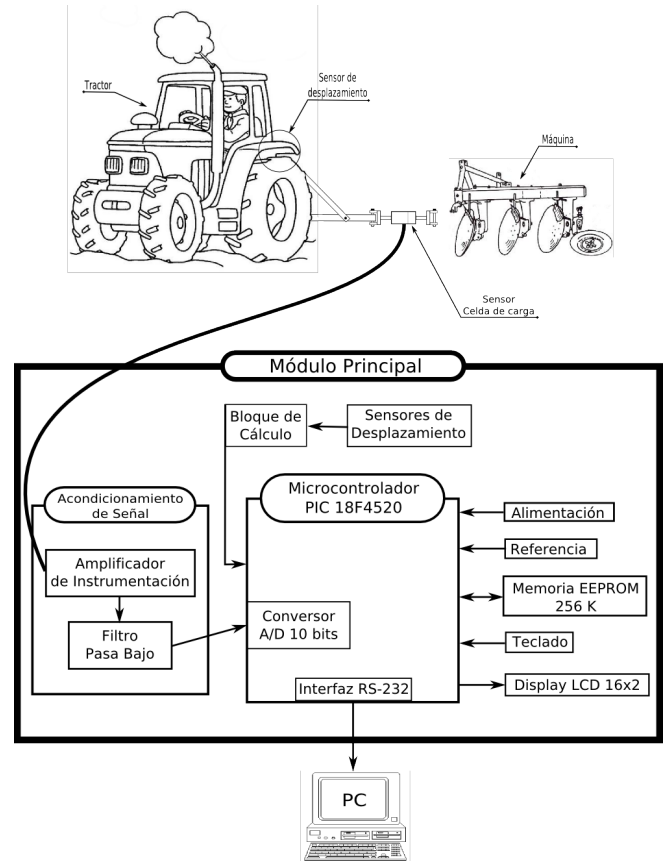


Fig. 1: Representación gráfica de la aplicaciones electrónicas al proyecto.

De manera que se manipulan algunos parámetros físicos como:

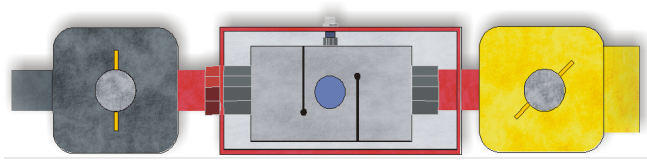
Fuerza: Se utiliza una celda de carga.

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.

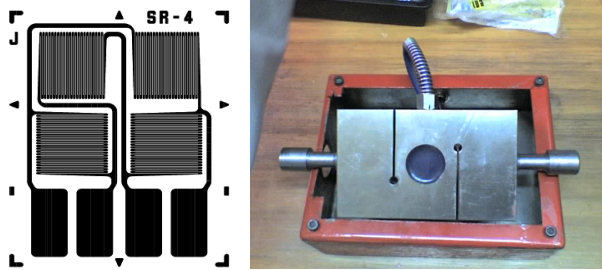


(a) Disposición de celda de carga entre el tractor y la máquina agrícola.

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.



(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.

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 ρ , su resistencia eléctrica R es

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

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, σ es la tensión mecánica y ε es la deformación unitaria. ε 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 μ 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 $\mu = 0,5$.

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

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

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

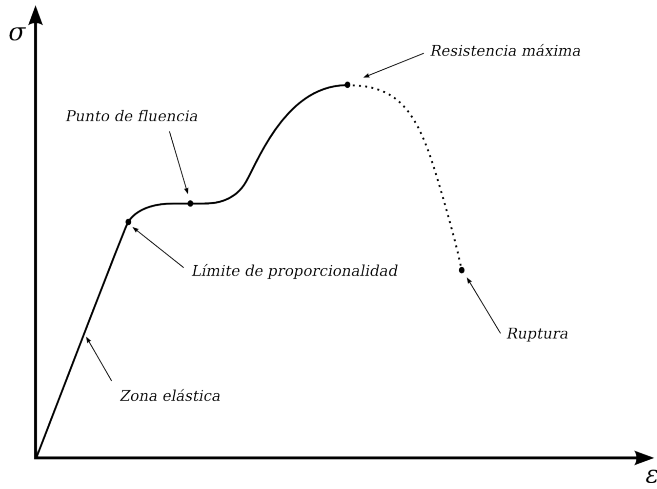


Fig. 4: Relación entre esfuerzos y deformaciones. La escala de la zona elástica está muy ampliada.

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 ρ aumenta. Si dicha amplitud disminuye, ρ 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 $x = K\varepsilon$. 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

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

- para un material tipo n

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

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 la 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.

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 $\mu\varepsilon$ para las semiconductoras a unos 40000 $\mu\varepsilon$ para las metálicas.

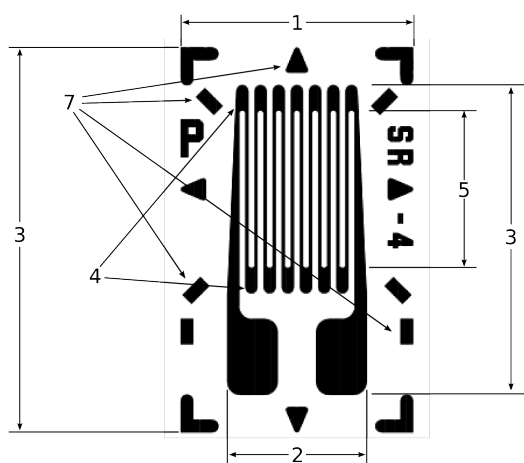


Fig. 5: Parámetros de una galga impresa: 1 Anchura del soporte; 2 anchura de la galga; 3 longitud del soporte; 4 extremos ensanchados; 5 longitud activa; 6 longitud total de la galga; 7 marcas de alineación.

En 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 elasticidad 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 casi 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].

2.2. Acondicionamiento de señal

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

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

Igualmente en la figura se describe la tensión de salida de A1 y A2. La V_{be} y I_r producen pérdidas 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.

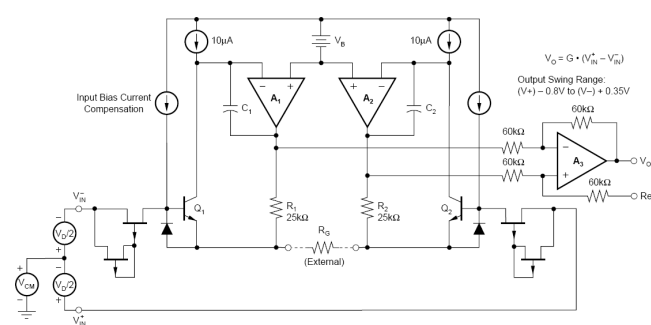


Fig. 6: Circuito interno del Amplificador de Instrumentación INA118 de Brow Brawn.

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

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

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

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

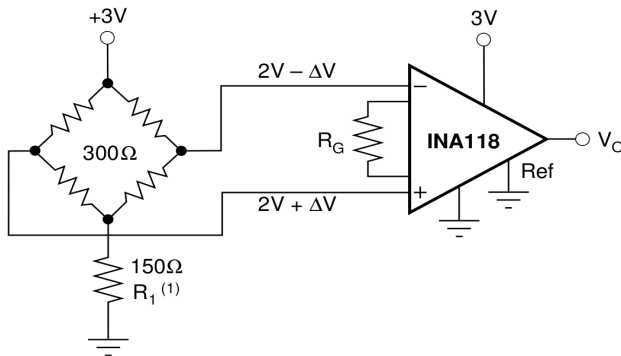


Fig. 7: Aplicación típica de un amplificador de instrumentación para medición en puentes resistivos.

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 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 convertidor, 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 referencia 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. Microprocesador DsPIC30F4013

3.1. Firmware del Microcontrolador

El Módulo Principal de nuestro proyecto cuenta con un MCU (Micro Controller Unit) DsPIC30F4013, que hemos programado en lenguaje C utilizando el IDE MPLAB 4.0 de Microchip y el compilador C30. 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 re-

alazar. En la figura 8 se muestra un esquema aproximado del “flujo” de menú a través del programa

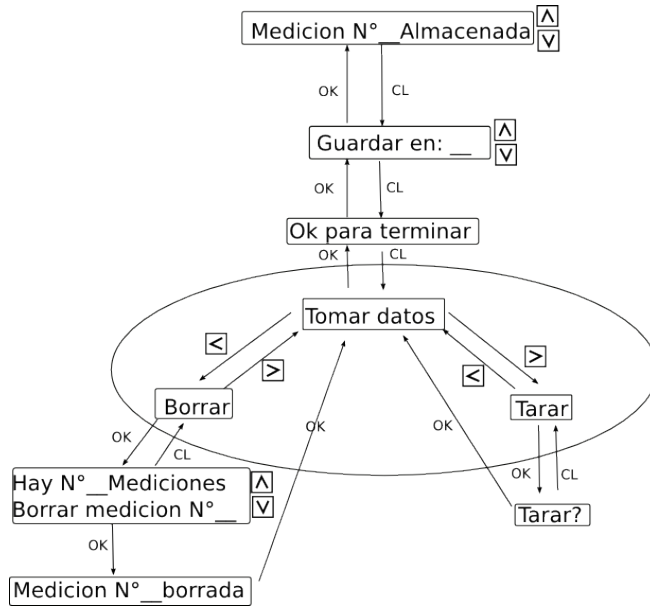


Fig. 8: Esquema representativo de flujo del menú principal.

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.

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

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

3.2. 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.

Para el intervalo $158 \leq \text{Mps} \leq 1000$, el AD sub-muestrea la señal cada $99,2 \mu\text{seg} = T_{mc}$, 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 $5 \leq \text{Mps} \leq 157$ 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, el usuario podrá ver las mediciones realizadas, y cuales son las que se pueden borrar.

3.3. Almacenamiento de Datos

Los datos tomados de los sensores se almacenarán en la tarjeta de memoria SD. Esta es una memoria Flash con 256 Mbytes de capacidad que funciona a 400 KHz y se comunica con el MCU a través del bus SPI. Este protocolo de comunicación (SPI) utiliza 2 líneas para establecer la comunicación, estas son SDA (SIGNAL DATA) y SCL (SIGNAL CLOCK). La transferencia de datos es controlada por el MCU.

Para almacenar los datos se genera un archivo de texto donde se ubican en filas las muestras de fuerza, velocidad del tractor y velocidad de la máquina separadas por una tabulación. Este archivo contendrá tantas filas como muestras tenga la medición. Debido a que el periodo del muestreo es siempre el mismo, es sencillo calcular el tiempo de cada muestra con la siguiente expresión

$$t_{muestra\ n} = T_S \cdot (n - 1) \quad (17)$$

El firmware soporta dispositivos en formato FAT32 debido a que se han utilizado las librerías que provee microchip, las cuales cuentan además con funciones para el manejo de directorios, formateo de dispositivos y búsqueda de archivos. Sin embargo, estas tres últimas características han sido deshabilitadas debido al excesivo espacio que ocupan en la memoria de programa.

4. Distancia recorrida

Para poder obtener la distancia recorrida se aplica en las ruedas, tanto del tractor como de la máquina que se acopla, un sensor magnético con un circuito como se puede ver en la figura 9.

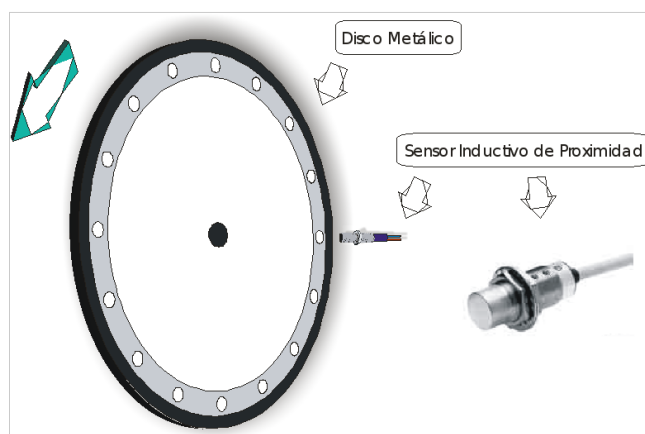


Fig. 9: Dispositivo detector de desplazamiento del tractor y maquina agrícola.

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 transmitida a un receptor que está conectado directamente al microprocesador.

5. 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 requeríamos. 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 deberá 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 pre-

cio. 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 está diseñado para que funcione de esta forma. El mismo no posee diferencia de potencial entre sus extremos cuando no existe campo magnético cerca. Por lo tanto a la salida va a estar en corte. Ya que el transistor no es excitado para que entre en saturación. Cuando existe un campo o 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 transistor y obtener señal de voltaje a la salida. Con estos datos del funcionamiento del sensor ya podríamos 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. 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 las distintas velocidades y distancias minimas 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 atraían 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 30 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 e 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. 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 $0.1 \mu\text{seg}$, 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.

7. 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.

8. Comunicacion Serial

Se transmitirán los datos desde la memoria SD(conectada al MCU principal) hacia la computadora mediante el puerto COM1 de un PC. Para ello el MCU 30F4013 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 a 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 o del PC no esté listo para recibir los datos, etc.

9. Instrumentación Virtual

La potencia y facilidad de uso del paquete de software de instrumentación virtual LabVIEW nos ha permitido crear, sin mayores dificultades, una interfaz en la PC con la que pueden analizarse comodamente los datos adquiridos por el modulo principal. Se quiere mencionar, que no fue de nuestro agrado tener que realizar dicha interface en un programa privativo, ya que el mismo no facilita el codigo fuente, para un posterior analisis, e impide un mayor desarrollo.

A continuacion se muestran imagenes del sistema funcionando.

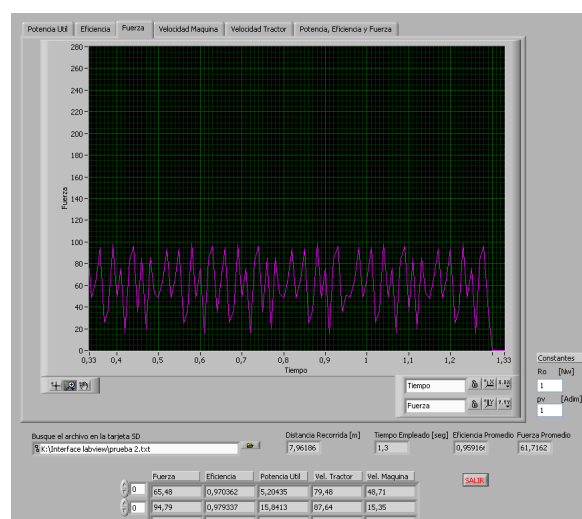


Fig. 10: Captura de pantalla - Medición de Fuerza

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

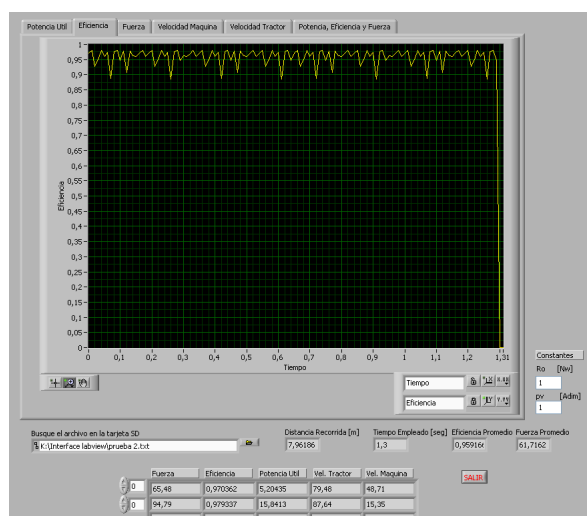


Fig. 11: Captura de pantalla - Medición de eficiencia del tractor

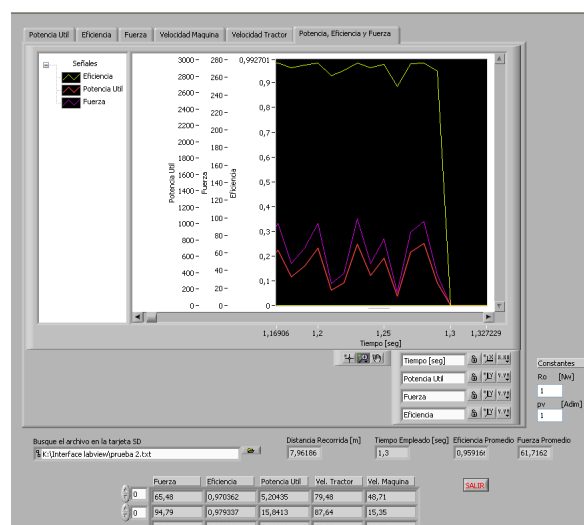


Fig. 12: Captura de pantalla - Con LabVIEW es posible ver todas las variables a la vez.

protección del mismo. En la figura 13 se muestra una hoja de datos de una celda de carga². 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.

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.

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 la celda de carga con diferentes pesos que se pueden apreciar en el cuadro 1.

² Este material se obtuvo de la red, vea la referencia [6].

Del cuadro 1 se realiza el trazado de una curva carga-tensión de salida y el resultado se observa en la figura 15. 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.

PARAMETER		UNITS
Rated Capacities	500, 1000, 2000, 5000	Kg
Rated Output	2.0 \pm 0.1%	mV/V
Total Error	0.05	\pm % of Rated Output
Zero Return after 30 minutes	0.05	\pm % of Applied Load
Zero Balance	3	\pm % of Rated Output
Temperature Range: Operating	-30 to +80	°C
Temperature Range: Compensated	-10 to +40	°C
Temperature Effect: On Output	0.004	\pm % of Applied Load/°C
Temperature Effect: On zero	0.007	\pm % 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	megaohm
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. 13: Hoja de dato de una celda de carga “PCM Procter & Chester Measurements”- Serie 620 de 500Kg a 5000Kg.

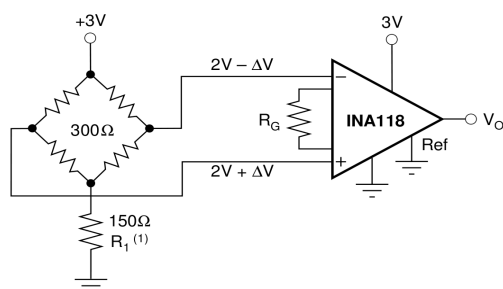


Fig. 14: Circuito típico para amplificar diferencialmente un puente de Wingstone.

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 16 representa la curva carga-tensión de salida.

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

Tab. 2: Mediciones del experimento 2.

Experimento 01

Para una ganancia $G=500$

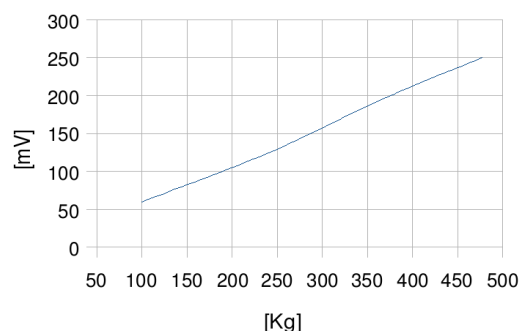


Fig. 15: Curva carga-tensión de salida para el experimento 1.

Experimento 02

Para una ganancia $G=500$

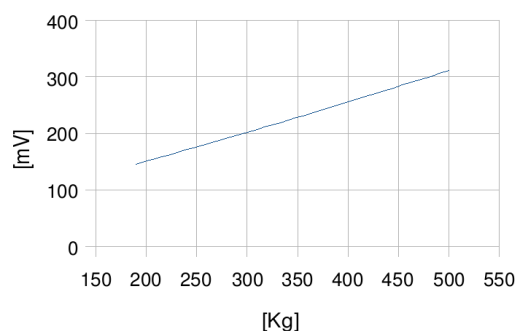


Fig. 16: Curva carga-tensión de salida para el experimento 2.

A.3. Experimento 3

Para obtener una de las características principales de las celdas de carga, la sensibilidad, se realizaron ensayos en el Laboratorio Central de Ing. Mecánica³ 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.

³ Se agradece al Ing. Ramirez e Ing. Casasnovas quienes permitieron realizar estos experimentos en el laboratorio de Ingeniería Mecánica.

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 1ª columna representa los diferentes valores de carga proporcionados por el instrumento hidráulico, la 2ª columna representa la Vo del AI para una ganancia de 500 y posteriormente se aumento la ganancia a 100, esto es, la 3ª columna.

A.4. Experimento 4

Una de las ultimas 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 ideal si recordamos que Vo será convertido por el AD del microprocesador y el mismo trabaja con una tensión de referencia de 5V; vea la figura 18 que muestra lo que se predijo.

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

$$sensibilidad = x^{mV/V} \quad (18)$$

Experimento 6

para una ganancia G=500

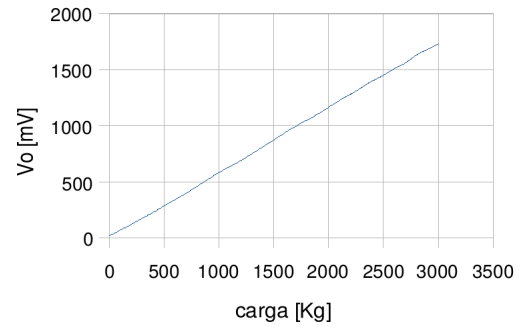


Fig. 17: Curva carga-tensión de salida para el experimento 2.

$$\text{para } 5000Kg \rightarrow y = V_{cc} x^{mV/V} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} 3000Kg &\rightarrow 3470mV \\ 5000Kg &\rightarrow 5783,3mV = y \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} 5783,3mV &= 3V x^{mV/V} \\ x &= 1,93mV/V \simeq 2mV/V \end{aligned} \quad (21)$$

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

$$V_o = G (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) + V_{offset} \quad (22)$$

$$\text{para } V_{IN}^+ = V_{IN}^- = 0 \Rightarrow V_o = V_{offset} \quad (23)$$

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

C. Experimentacion de sensor magnetico

Luego de un largo periodo de prueba llegamos a simular el movimiento circular del tractor con un motor paso

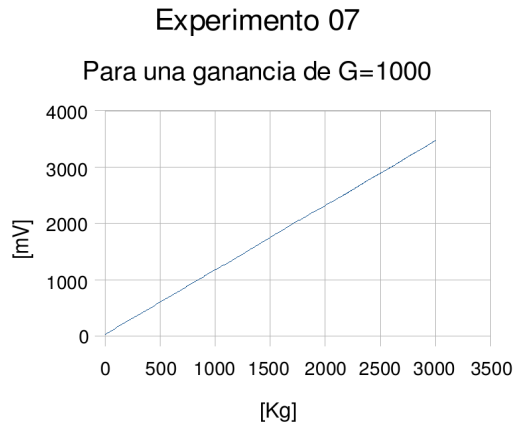


Fig. 18: Curva carga-tensión de salida para el experimento 2.

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, o 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.

$$\varpi = 2\pi f \quad (24)$$

$$\varpi = 2\pi 50 \text{Hz} = 314,1592 \text{rad/seg} \quad (25)$$

$$\nu = \varpi r \quad (26)$$

$$\nu = 314,1592 \text{rad/seg} \cdot 0,071 \text{m} = 22,3 \text{m/seg} \quad (27)$$

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.

Referencias

- [1] Y. Kanda. Piezoresistance effect in 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>
- [3] <http://www.lyx.org>
- [4] <http://www.ubuntu.com/es>