

## **Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site**

### **Células de carga para Medidas de Empuje**

#### **Traducción de José L. Sánchez**

- [Introducción](#)
- [Conceptos de diseño](#)
- [Detalles de construcción](#)
- [Prototipo de célula de carga de 250 lb. de capacidad](#)
- [Célula de carga de 200 lb. de capacidad de 4 sensores](#)
- [Calibración](#)
- [Verificación de la metodología de diseño](#)
- [Hoja de cálculo para el diseño de células de carga](#)
- [Circuito amplificador](#)
- [Apéndice](#)

#### **Introducción**

En esta página web se detalla el diseño *de una célula de carga* basada en sensores de torsion, que en combinacion con un sistema electrónico de adquisición de datos (DAQ), puede ser usada, para la medida en estático del empuje de un motor cohete. La célula de carga que se describe aquí es relativamente sencilla de fabricar, de diseño versátil en funcion de su capacidad de carga, suficientemente exacta para el uso propuesto, y barata. El coste del modelo mas básico (un solo sensor) de célula de carga hecha por este procedimiento, normalmente no excederia e unos \$10-20 USD. Para una célula de carga mas precisa de cuatro sensores realizada por este mismo método, el coste sería el doble esta cantidad. Desde luego, la razón subyacente de construir una célula de carga no puede ser medida en " dólares y sensores ", ya que es la premisa fundamental de la Cohetería Aficionada Experimental - el desafío para fabricar lo que sea, si es útil desde el principio.

He fabricado varias células de carga mediante el método descrito aquí, y las he utilizado profusamente en las medidas de empuje de mis motores, con resultados excelentes.

Incluso para los que prefieren utilizar una célula de carga comercial para las medidas de empuje, la célula de carga descrita aquí puede ser de gran utilidad como instrumento e medida para pruebas estáticas de nuevos diseños (o diseños modificados) que intrínsecamente tienen una mayor probabilidad de fracaso catastrófico. Con esta célula de carga barata, se pueden obtener datos

de empuje para la prueba de nuevos motores, conservando la unidad comercial para diseños ya probados.

## Concepto de diseño

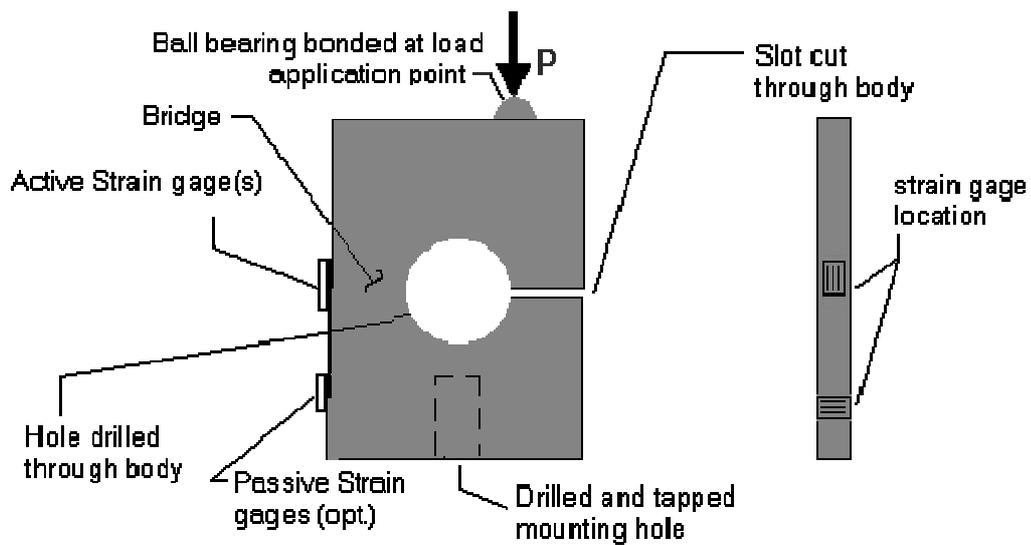
El tipo de célula de carga que se presenta es básicamente similar a un tipo de *deformación de una viga*. Cuando una fuerza es aplicada a la célula de carga, la viga (o puente) en el cual se monta el sensor de tensión, esta sometida a una combinación de tensiones mecánicas axiales y de compresión. La tensión de doblado es con mucho el componente dominante, de ahí el término "doblado de viga". Se pretende que, la relación entre la fuerza aplicada y la tensión en la viga sea lineal.

La tensión aplicada a la viga provoca la correspondiente *tensión* en el material de la misma, y consecuentemente en el sensor (que esta adherido a la superficie de la viga). La tensión es definida como el cambio de longitud dividida por la longitud original. La relación entre la tensión y deformación es lineal, según el Modulo de Elasticidad (**E**) del material de la viga. **La resistencia eléctrica del sensor es directamente proporcional a la tensión**, dando como resultado que la salida señal de la célula de carga es lineal, o directamente, proporcional a la carga aplicada, simplificando la calibración y el empleo de la célula de carga.

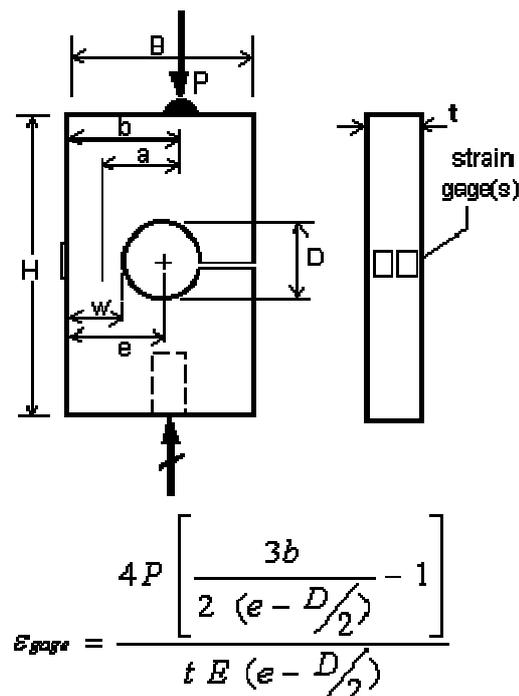
Una cualidad importante de la célula de carga es que el desplazamiento total bajo carga es muy pequeño. Esto es significativo, ya que se minimizan los efectos dinámicos indeseados asociados al desplazamiento de masas.

Cuando al principio tuve la idea de hacer una célula de carga, quise simplificar la construcción tanto como fuera posible, adoptando ciertos criterios. En primer lugar, una célula de carga de compresión es la mas apropiada para la medida de empuje. Otro criterio era reducir al mínimo el desplazamiento bajo carga, anteriormente ya había tenido problemas con mi Sistema Estático de Medida, en el cual había utilizado un sensor de tensión montado sobre una viga voladiza. La desviación en la carga para aquel sistema era bastante significativa de tal manera que fué necesario añadir un amortiguador hidráulico para eliminar oscilaciones.

El concepto que finalmente se desarrolló fue el mostrado en la **Figura 1**. La célula de carga consiste en un bloque de metal (acero, aluminio o cobre) con un solo taladro. Para generar la tensión de doblamiento requerida, se realizó un corte perpendicular al taladro en uno de los lados creando un puente para provocar la deformación del lado opuesto, en el cual se pegarían uno o varios sensores de tensión. Dos sensores proporcionan doble de señal de salida (doblado así la sensibilidad y la resolución) de un solo sensor. "Un puente de Wheatstone usa un total de 4 sensores, de los cuales 2 sensores "activos" miden la tensión, y 2 sensores "pasivos" sirven para equilibrar el puente. Este montaje de puente ofrece una sensibilidad excelente y cuando ha sido correctamente diseñado, reduce al mínimo los efectos debidos a cambios de temperatura. El montaje de la célula de carga se realiza mediante un solo tornillo en un taladro roscado en la base de la misma.



**Figura 1. Diagrama de la célula de carga**



**Figura 2. Determinación de los sensores**

La ecuación mostrada en la **Figura. 2** da la tensión en la posición del sensor ( $\epsilon_{gage}$ ) en cuanto a la carga aplicada, así como la geometría y la característica del material del cuerpo de célula de carga. Como dijimos en la introducción, la tensión es directamente proporcional a la carga aplicada, e inversamente proporcional al grosor de cuerpo (**t**) y al módulo de elasticidad (**E**). En términos de geometría, los parámetros de definición son la posición de agujero (**e**), el diámetro de agujero (**D**) y la posición (**b**) de la carga aplicada (**P**).

Por lo tanto, se puede ver, que hay cinco variables geométricas que determinan la tensión de la célula de carga:

1. Anchura de cuerpo (B)
2. Grosor de cuerpo (t)
3. Diámetro de agujero (D)
4. Posición de carga aplicada (b)

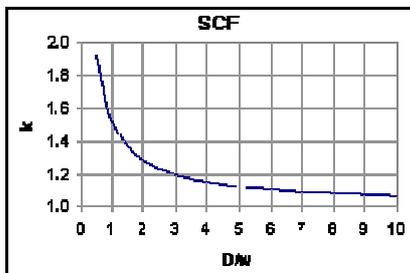
La posición del agujero (e) proporciona mucha flexibilidad en el diseño de la célula de carga, no obstante, deberán tenerse en cuenta ciertas limitaciones, así:

- $B/3 \leq D \leq 2B/3$
- $B \leq H \leq 1.75B$
- $B/8 \leq t \leq B/2$
- $b \geq B/2$

La tensión máxima que ocurre en el cuerpo de célula de carga está localizada en la superficie curva del puente, y es dada por:

$$\sigma_{\max} = -k \frac{P}{wt} \left( 1 + \frac{6a}{w} \right)$$

El signo negativo indica que se trata de tensión *compresiva*. El término *k* es un factor de concentración de tensión obtenido de la Figura 3, y las unidades de medida son la libra. o N. para fuerza, y pulgadas o mm. para las dimensiones.



Material	Max. Recommended Compressive Stress	
	lb/in <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Aluminum, Utility grade	8000	55
Aluminum alloy, 6061-T6	25000	175
Steel, Hot rolled	13000	90
Steel, Cold rolled	25000	175
Brass, yellow, hard	20000	140

Table 1

**Figura 3 - Grafico del factor de concentración de la tensión y cuadro de tensiones admitidas.**

La célula de carga deberá ser diseñada de tal modo que la tensión en el cuerpo de la misma a máxima carga, sea aproximadamente la mitad de la Tensión de Producción (F<sub>ty</sub>) del material del cuerpo. Esto debe asegurar que:

1. Ninguna tensión permanente en el cuerpo de la célula de carga pueda afectar a su calibración.
2. Asegurar una buena respuesta lineal de la célula de carga.

## Los valores máximos de tensión se indican en la Tabla 1

Tenga en cuenta que el factor más restrictivo en el diseño de la célula de carga es la tensión del cuerpo. La tensión del sensor nunca será un factor restrictivo. Un sensor estándar puede aceptar tensiones del 1 % o más sin daño alguno, que es por lo menos el doble de la tensión que un cuerpo de célula de carga de acero o aluminio puede soportar sin que se produzca una deformación permanente del mismo. Para obtener los mejores resultados, la tensión máxima del sensor debería ser **menos de 2000 microstrain** para asegurar una buena respuesta lineal. Una tensión adecuada para este diseño sería de 1500 microstrain.

## Construcción

Generalmente, una célula de carga se diseña basándose en la disponibilidad de materiales, reduciendo al mínimo el mecanizado necesario. Por ejemplo, el diseño podría estar basado en una barra de aluminio estandarizada, que sólo tenga que ser cortada en la longitud requerida. Por lo tanto, sólo será necesario realizar los taladros del cuerpo, cortar la ranura, el taladro roscado de montaje, y un taladro de poca profundidad para el alojamiento de la bola de rodamiento. La bola de rodamiento se pegará con epoxi en el interior de dicho taladro. Debe tenerse especial cuidado con el agujero de cuerpo. La posición exacta del mismo se marcará previamente y se irá agrandando mediante taladros sucesivos cada vez más grandes, asegurándose que la posición del mismo no varía. El agujero de montaje inferior deberá ser taladrado aproximadamente en el centro del ancho de la pieza, roscándolo seguidamente con el paso de rosca que se desee. La ranura se puede realizar simplemente con el empleo de una sierra de arco.

La bola de acero de rodamiento es importante ya que ésta determina con precisión el punto de apoyo de la carga. Una bola de acero endurecido funciona admirablemente bien en este caso, ya que tiene que soportar grandes cargas sin ser dañada. Si esta se dañara, se puede extraer fácilmente calentándola moderadamente hasta ablandar el epoxi y permitir su extracción.

El sensor de tensión activo se monta en la posición mostrada en la **Figura 1**. Si se usan dos sensores, se montarán uno al lado del otro. El sensor debe ser montado con las líneas de rejilla paralelas al borde de la pieza, como se muestra en dicha figura. Los sensores se fijan con cianoacrilato o epoxi (el epoxi es más fácil de usar y quizás más fiable). Es importante para asegurar una buena adherencia de los sensores lijar lijera la superficie de la célula con papel de lija del número 600, luego limpiar la superficie con la acetona. Si se opta por un montaje de cuatro sensores, los dos sensores pasivos pueden ser montados en cualquier parte del cuerpo de la célula. Sin embargo, es recomendable la posición que se muestra en la **Figura 1**. Observe que los sensores pasivos se montan con las líneas de rejilla perpendiculares a las de los sensores activos.

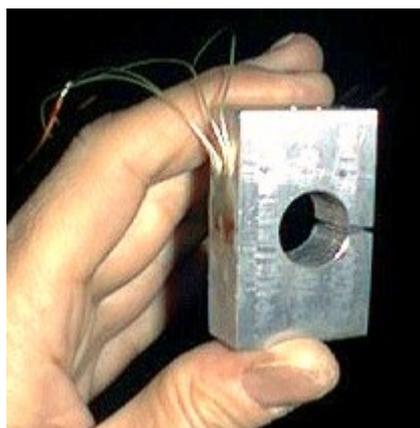
Lo más fácil es usar sensores de tensión con cables de conexión incorporados. Los sensores que compré en un principio no disponían de dichos cables, tan sólo un par de diminutos pads de soldadura. Con la ayuda de una lámpara con lupa soldé en los pads cables de conexión aislados del tipo 30 AWG. Los sensores de tensión que usé eran OMEGA SG-3/350-LY43 (Costo 45\$ US 10 unidades). Un tipo similar, pero con cables de conexión sería el KFG-5-120-C1-11L1M2R (Costo 59\$ US 10 unidades). Después de pegar los sensores, estos deberán ser protegidos con una capa protectora de epoxi así como también parte de los cables de conexión. Para ver instrucciones de montaje de los sensores más detalladas, ver el Apéndice.

Recientemente he obtenido una partida limitada de sensores de tensión y los he puesto a disposición de quienes deseen experimentar con la construcción de una célula de carga. El coste es de 12 dólares USA para un paquete de 6 unidades.

*(¡Lamentablemente agotados!.)*

### **Prototipo de Célula de Carga de 250 libras de Capacidad**

Para probar el concepto, decidí construir un prototipo de célula de carga usando un pequeño bloque de aleación de aluminio 6061 que encontré por casualidad en tiendas de suministro de elementos metálicos. Tenía necesidad de una célula de carga de 250 libras. (1100 N.) de capacidad, determiné el diámetro de agujero, la posición del mismo, así como el punto de carga para alcanzar este objetivo, todo ello basado en las dimensiones del bloque. Utilicé sensores de tensión activos dobles para conseguir una buena resolución, y dos sensores pasivos formando un puente completo. El producto final se muestra en la **Figura 4**, y los datos de diseño en la **Tabla 2**. La desviación máxima a plena carga fue de 0.0035 pulgadas (0.09 mm). medida fue efectuada con una galga apropiada.



**Figura 4. Prototipo de célula de carga de 250 libras.**

P	250	lb	<b>Load capacity</b>
t	0.570	in	Body thickness
D	0.6590	in	Hole diameter
B	1.242	in	Body width
b/B	0.68277		Load application point
e	0.6985	in	Hole offset distance
E	10	Msi	Modulus of elasticity
a	0.6635	in	Moment arm
b	0.848	in	Load offset
c	0.1845	in	w/2
w	0.3690	in	Bridge width
$\sigma_a$	-1189	lb/in <sup>2</sup>	Bridge axial stress
$\sigma_b$ +/-	12823	lb/in <sup>2</sup>	Bridge bending stress
$\sigma_{max}$	-18465	lb/in <sup>2</sup>	<b>Body max. stress</b>
$\sigma_{gage}$	11635	lb/in <sup>2</sup>	<b>Gage stress</b>
$\epsilon_{gage}$	0.001163	in/in	<b>Gage strain</b>
=	1163	$\mu$ strain	

**Tabla 2—Datos de diseño para la célula prototipo**

### Célula de carga de 200 lb. con 4 sensores

Recientemente, decidí construir una célula de carga para las medidas de empuje de mi nuevo motor [A-100M](#). Una capacidad de carga de 200 libras. (900 N.) la consideré suficiente para este uso. Para conseguir una buena exactitud bajo la variante esperada de condiciones ambientales de temperaturas, usé un montaje de 4 sensores dos activos y dos pasivos. Los cuatro eran del mismo tipo. La compensación de temperaturas se consiguió montando los cuatro sensores proximos entre si sobre el cuerpo de célula de carga. Los datos específicos para este tipo de sensor de tensión son los siguientes:

- Resistencia eléctrica 350 ohm
- Material hoja de metal
- Base de apoyo de resina fenolica
- Longitud de rejilla 3 mm
- Auto-compensación de temperaturas para aluminio
- Temperatura de funcionamiento -10° a 70°C
- Factor de calibración 2.06
- Limite de tensión 2%

La célula de carga se muestra en la **Figura 5**, y los datos de diseño en la **Tabla 3**. Los cuatro conductores que salen del puente se conectaron a un conector de 4 contactos, resultanto ser un elemento inmejorable para este uso.

Ref. Radio Shack p/n 274-001 (la base de enchufe de este conector es la Ref. p/n 274-002)



**Figura 5. Célula de carga de 4 sensores de 200 lb**

**(Debajo de la célula de carga puede verse el conector eléctrico).**

<b>P</b>	<b>200</b> lb	<b>Load capacity</b>
<b>t</b>	<b>0.500</b> in	<b>Body thickness</b>
<b>D</b>	<b>0.9375</b> in	<b>Hole diameter (see note 1)</b>
<b>B</b>	<b>1.500</b> in	<b>Body width</b>
<b>b/B</b>	<b>0.841</b>	<b>Load application point</b>
<b>e</b>	<b>0.839</b> in	<b>Hole offset distance</b>
<b>E</b>	<b>10.000</b> Msi	<b>Modulus of elasticity (see note 2)</b>
<b>a</b>	1.076 in	<b>Moment arm</b>
<b>b</b>	1.261 in	<b>Load offset</b>
<b>c</b>	0.1850 in	<b>w/2</b>
<b>w</b>	0.3700 in	<b>Bridge width</b>
$\sigma_a$	-1081 lb/in <sup>2</sup>	<b>Bridge axial stress</b>
$\sigma_b$ +/-	18863 lb/in <sup>2</sup>	<b>Bridge bending stress</b>
$\sigma_{max}$	-24585 lb/in <sup>2</sup>	<b>Body max. stress (see note 3)</b>
$\sigma_{gage}$	17782 lb/in <sup>2</sup>	<b>Gage stress</b>
$\epsilon_{gage}$	0.001778 in/in	<b>Gage strain</b>
=	1778 $\mu$ strain	

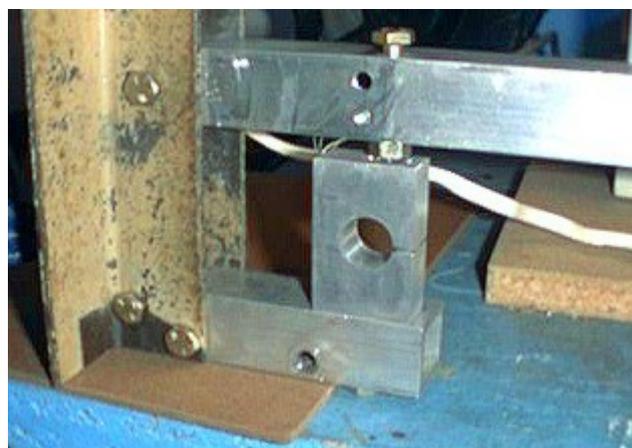
**Tabla 3. Datos de diseño de la célula de carga de 200 lb.**

En este enlace se pueden ver las [curvas de empuje](#) obtenidas de las pruebas estáticas *del Motor A-100M*.

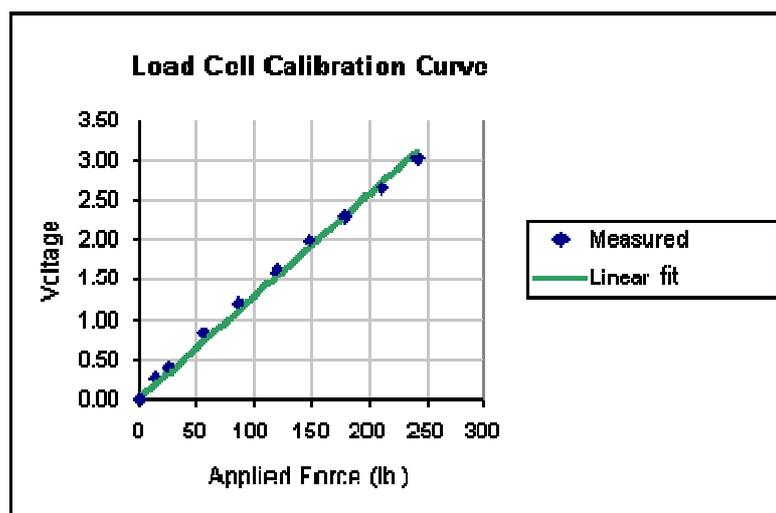
## Calibración de la célula de carga

El método usado para la calibración del prototipo de célula de carga era similar al que utilicé para calibrar la célula de carga hidráulica. Un brazo de palanca de 32 pulgadas (80 cm.) sirvió para amplificar una carga de magnitud conocida aplicada al mismo. La carga aplicada consistió en un contenedor de agua, cuya masa era conocida, suspendida al final del brazo de palanca. Se utilizó un amplificador electrónico para medir el cambio de resistencia de los sensores de tensión mientras fue incrementándose paulatinamente el peso de la carga de agua. La **Figura 6**, muestra el sistema para la prueba de calibración y en la **Figura 7** se muestran los resultados de la prueba

Un método alternativo de calibración simple y exacto sería de emplear la [Célula de Carga Hidráulica](#) para medir la fuerza aplicada a la célula de carga.



**Figura 6.** Sistema de calibración para el prototipo de célula de carga

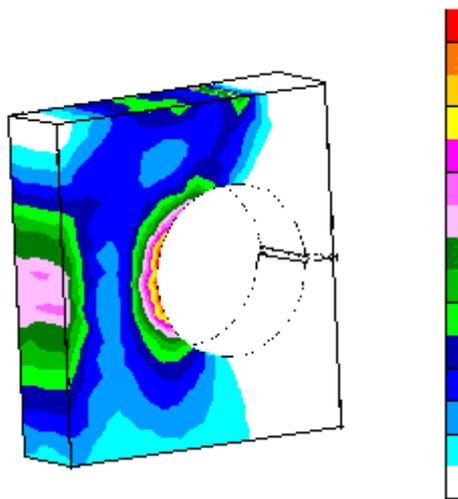


**Figura 7.** Curva de calibración para el prototipo de célula de carga.

## Verificación

Para verificar la metodología de diseño, se realizaron simulaciones con varios modelos de distintas configuraciones y capacidades mediante el método en 3-D de elementos finitos (FEM), utilizando un paquete de software de modelos sólidos. Un modelo típico consistió en más de 1000 elementos tetraedricos, con resultados empuje/tensión obtenidos con el empleo de un NASTRAN solver. En la **Figura 8**, se muestra un ejemplo ilustrando los contornos de tensión.

Las previsiones se correspondieron con los modelos de FEM. La predicción de la tensión máxima del cuerpo tendió a ser conservadora en un 10 por ciento.



**Figure 8. Verificación FEM de una célula de carga de 1000 libras (4.45 kN.) de capacidad. La gama de colores muestran los niveles de tensión, el rojo representa la tensión más alta.**

## Hoja de cálculo de Excel

Para facilitar el proceso de diseño, se ha creado una hoja de cálculo de **Excel**. El usuario simplemente tiene que introducir la capacidad de carga deseada, las dimensiones básicas del cuerpo de la célula de carga, y el material. Posteriormente, el diámetro de agujero, la posición del mismo y el punto de presión de la carga, pueden ser seleccionados de tal modo que la tensión máxima del cuerpo no exceda de los valores recomendados en la **Tabla 1**. Un dibujo interactivo de la célula de carga ayuda en el proceso de diseño. Un ejemplo del aspecto de la hoja de cálculo se muestra en la **Figura 9**.

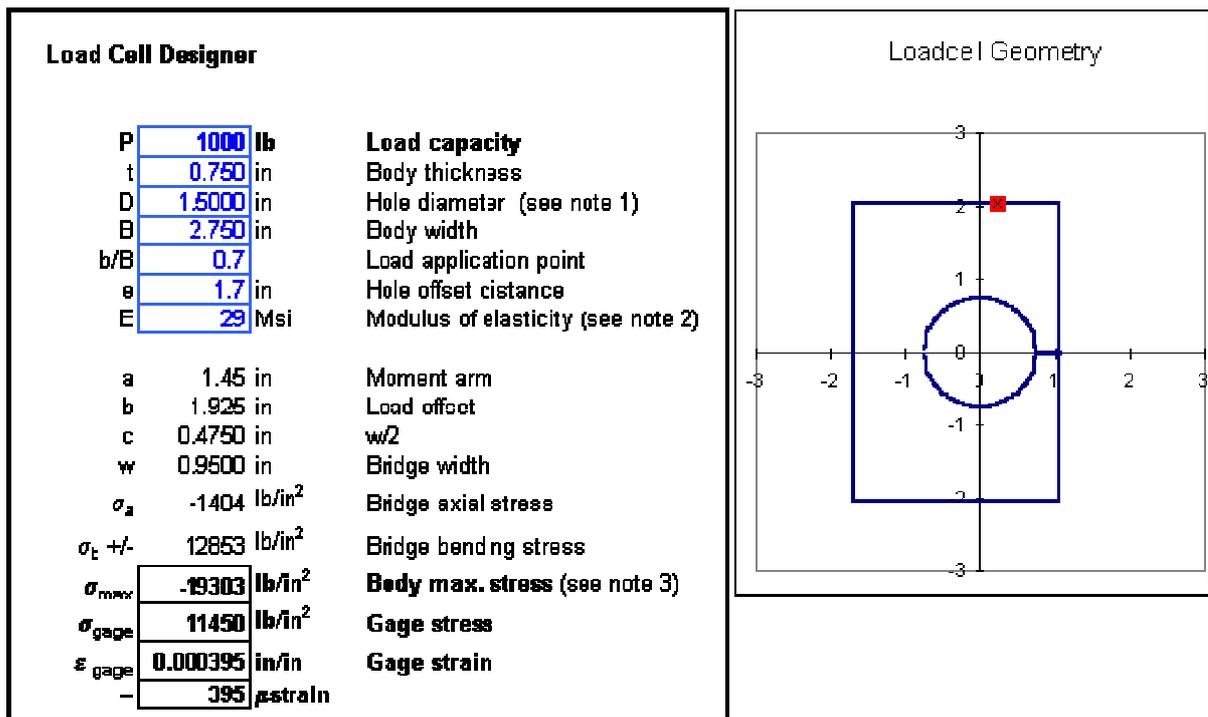


Figura 9. Ejemplo de la hoja de calculo Excel.

Enlace para la descarga de la hoja de cálculo Excel: [LOADCELL.XLS](#)

## Circuito Amplificador

La **Figura 10** muestra un diagrama esquemático del amplificador de señal de la célula de carga. Como puede verse, los cuatro sensores de presión están conectados en configuración puente de Wheatstone (SG1 a SG4). El voltaje presente a la salida del puente va a los terminales de entrada ( $V_{in+}$ ) y ( $V_{in-}$ ) del C.I. amplificador INA122. Entre la salida ( $V_o$ ) de dicho circuito y masa, se conecta el convertidor analógico digital (A/D) El convertidor *analógico-digital* que uso, es un DATAQ DI -154RS de cuatro canales, esta unidad de 12 bit, tiene un ratio de muestreo de hasta 250 muestras/segundo. La unidad se suministra con el software de captura y analisis de datos WINDAQ que simplifica de forma satisfactoria todo el proceso.

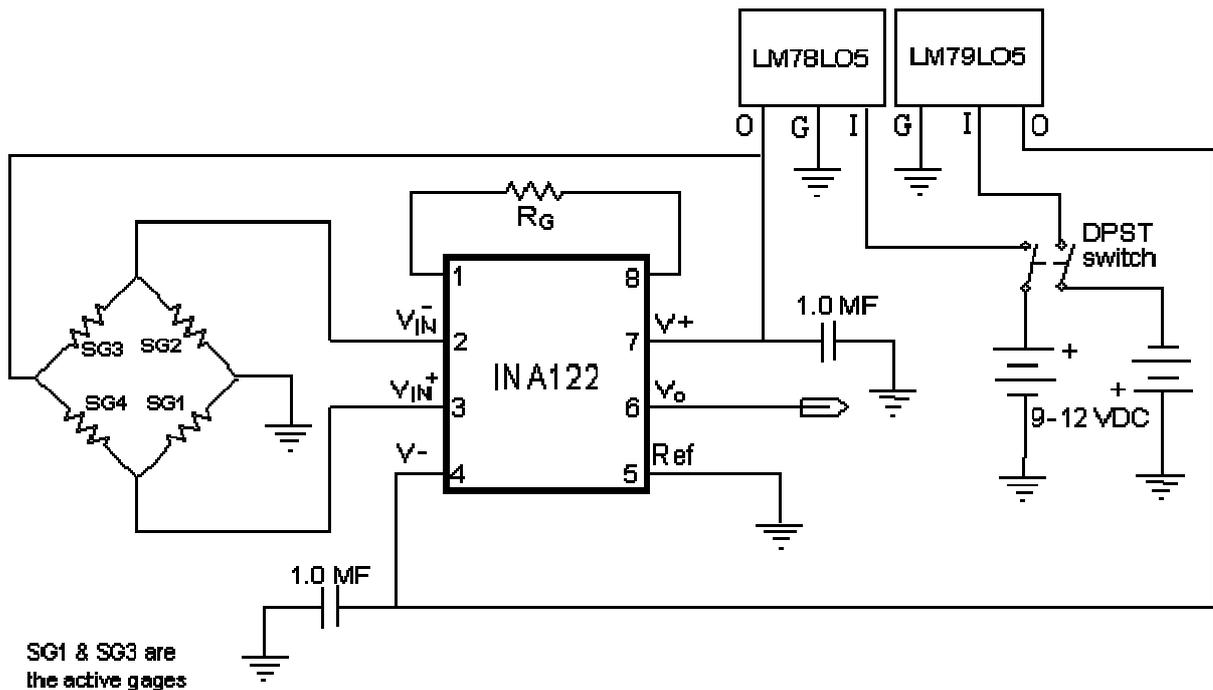


Figure 10. Circuito amplificador para célula de carga.

Componentes	Digi-key P/N	Cantidad
Amplificador de instrumentación	INA122PA-ND	1
Regulador de voltaje positivo, 5V	LM78L05ACZFS-ND	1
Regulador de voltaje negativo, -5V	LM320LZ-5.0-ND	1
Condensador de 1 uF.	P2105-ND	2
Interruptor	SW102-ND *	1
Resistencias **	--	1
Conector para batería 9 V.	2243K-ND	2

- \*O interruptor similar DPDT o DPST
- \*\* Ver detalles mas abajo.

Las especificaciones técnicas de todos los componentes están disponibles en la Web de [Digi-Key](http://www.digikey.com).

**Tabla 4. Lista de componentes para el circuito amplificador.**

$R_G$  es la resistencia que determina la ganancia del amplificador (factor de amplificación en voltios). El procedimiento para determinar su valor en el diseño de una determinada célula de carga se describe a continuación.

1. Calcule la **tensión máxima de la célula** mediante la ecuación de la **Figura 2** (u obtengala de la hoja de cálculo) .

2. La variación de la resistencia en función del cambio de tensión mecánica de un determinado sensor es dada por su Factor de Sensor (**GF**). El voltaje de salida (**e**) del puente de Wheatstone formado por los sensores (el cual es aplicado al amplificador) es dado por:

$$e = \frac{GF}{4} [\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4] E$$

Donde  $\epsilon_1$ , etc. son los valores de tensión de cada sensor, y **E** es el voltaje de excitación.

2. La ganancia requerida del amplificador (**G**) puede ser determinada como  $G = V_o/e$ , donde  $V_o$  es el voltaje de salida deseado del amplificador.

3. De la hoja de datos del C.I. INA 122, el valor requerido para  $R_G$  es dado por :

$$G = 5 + \frac{200k \Omega}{R_G}$$

4. De donde :

$$R_G = \frac{200k \Omega}{G - 5}$$

Ejemplo:

Determinar el valor de  $R_G$  para la célula de carga de 200 lb. mostrada en la **Figura. 5**.

- 1) El máximo valor esperado del sensor, según la **Tabla 3**, es de 1778 microstrain (1778 x 10<sup>-6</sup> in./in.)
- 2) El factor de sensor (**GF**) para los sensores de tensión es  $GF = 2.06$  y el voltaje de excitación es de  $E = 5.0$  V. Ya que los sensores SG2 y SG4 son pasivos, su tensión es siempre el cero. Por lo tanto el puente proporciona el voltaje máximo de salida.

$$e = \frac{2.06}{4} [1778 - 0 + 1778 - 0] 5.0$$

$$\Rightarrow e = 9157 \text{ microvolts} = 0.009157 \text{ Volts.}$$

- 3) Dado que la gama de voltaje de salida del circuito amplificador ha sido elegida para ser de 0 a +5V, la ganancia requerida es  $G = 5.0/0.009157 = 546$  (Ver nota mas abajo)

- 4) El valor requerido para la resistencia que determina la ganancia del amplificador es:

$$R_G = \frac{200\,000}{546 - 5} = \underline{370\ \Omega}$$

Tenga en cuenta que cuando los sensores de tensión que configuran el puente de Wheatstone no están sometidos tienen tensión mecánica, el voltaje de salida del puente ha de ser *idealmente* cero, ya que al ser los cuatro sensores del mismo tipo (el puente supuestamente está "equilibrado"). Sin embargo, en realidad existirá una pequeña diferencia entre los valores de resistencia de los sensores. Por lo tanto, el puente no estará completamente equilibrado y en la salida del mismo aparecerá un pequeño voltaje de salida aún no estando la célula de carga sometida a presión alguna. Este voltaje puede ser positivo o negativo. Sin embargo, esto no plantea ningún problema especial. La salida de la célula de carga puede ser simplemente puesta a cero mediante la utilización del software de análisis.

Apendice:

Lo siguiente es un artículo que describe el método que he usado, con éxito, para el montaje de sensores de tensión:

[Montaje de Sensores de Tensión en células de carga](#)

[Derivación de ecuación para sensores de presión](#)

Artículo excelente que describe la teoría y diseño de circuitos con Sensores de Tensión:

[Resistencia Electrica de los Sensores de Tensión](#)

**Ultima actualización 20 de Agosto de 2006**