

Diseño de estructuras de prueba para acelerómetros MEMS



Ing. Adilene Mandujano Ruiz



Índice

1. Objetivos
2. Introducción a los MEMS
3. Consideraciones teóricas
4. Caracterización del ADXL320
5. Diseño del circuito de lectura
6. Diseño de estructuras de prueba
7. Conclusiones

Objetivos

Objetivo general

- Desarrollar estructuras de prueba que faciliten la caracterización de acelerómetros.

Objetivos particulares

- **Acondicionar mecanismos para prueba de acelerómetros**
- **Diseñar y establecer rutinas teóricas para pruebas de acelerómetros utilizando COMSOL.**
- **Extraer parámetros característicos a partir de COMSOL.**
- **Diseñar, medir y evaluar estructuras de prueba**

Introducción a los MEMS



Historia de los MEMS

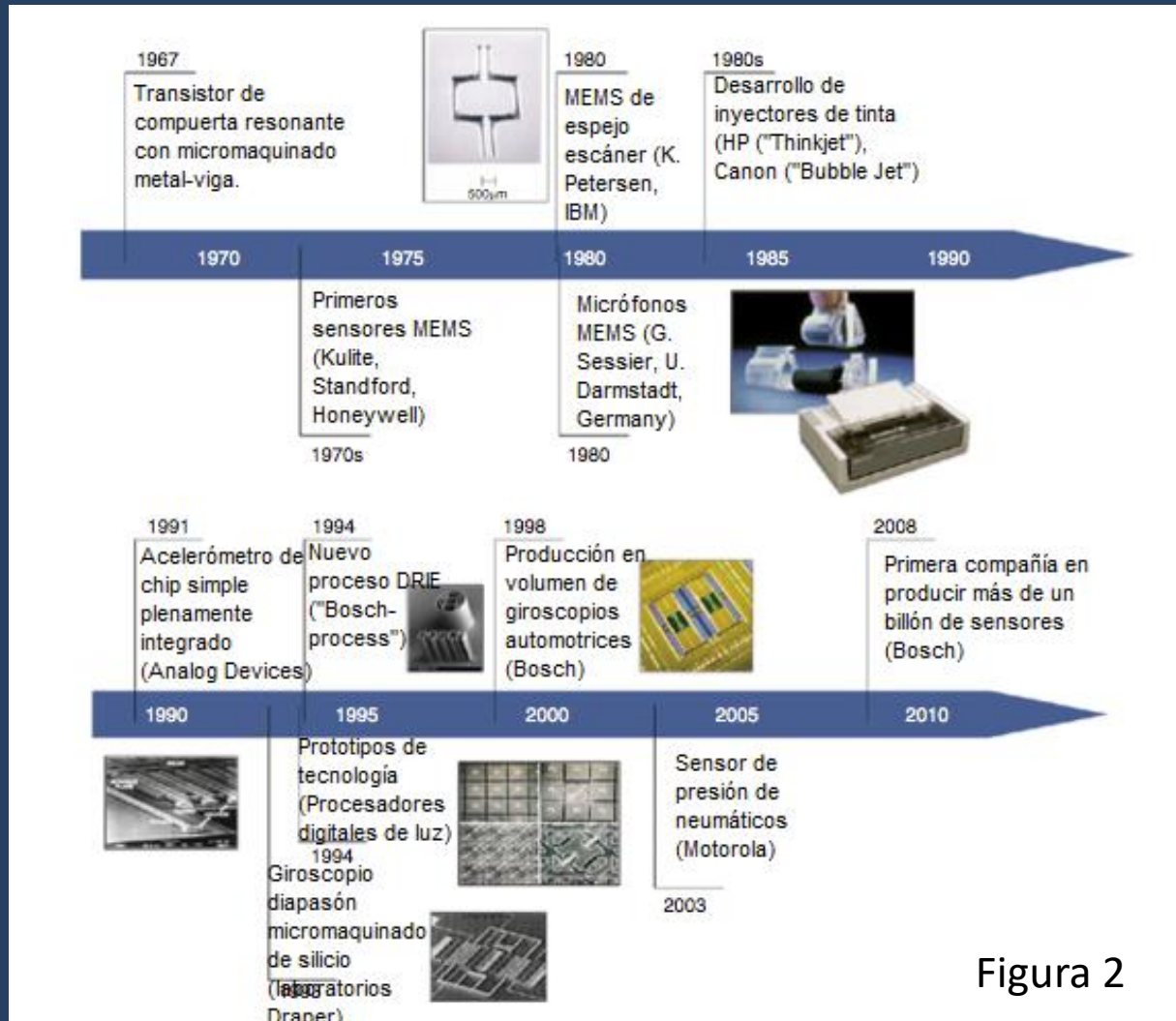


Figura 2

Mercado actual de los MEMS

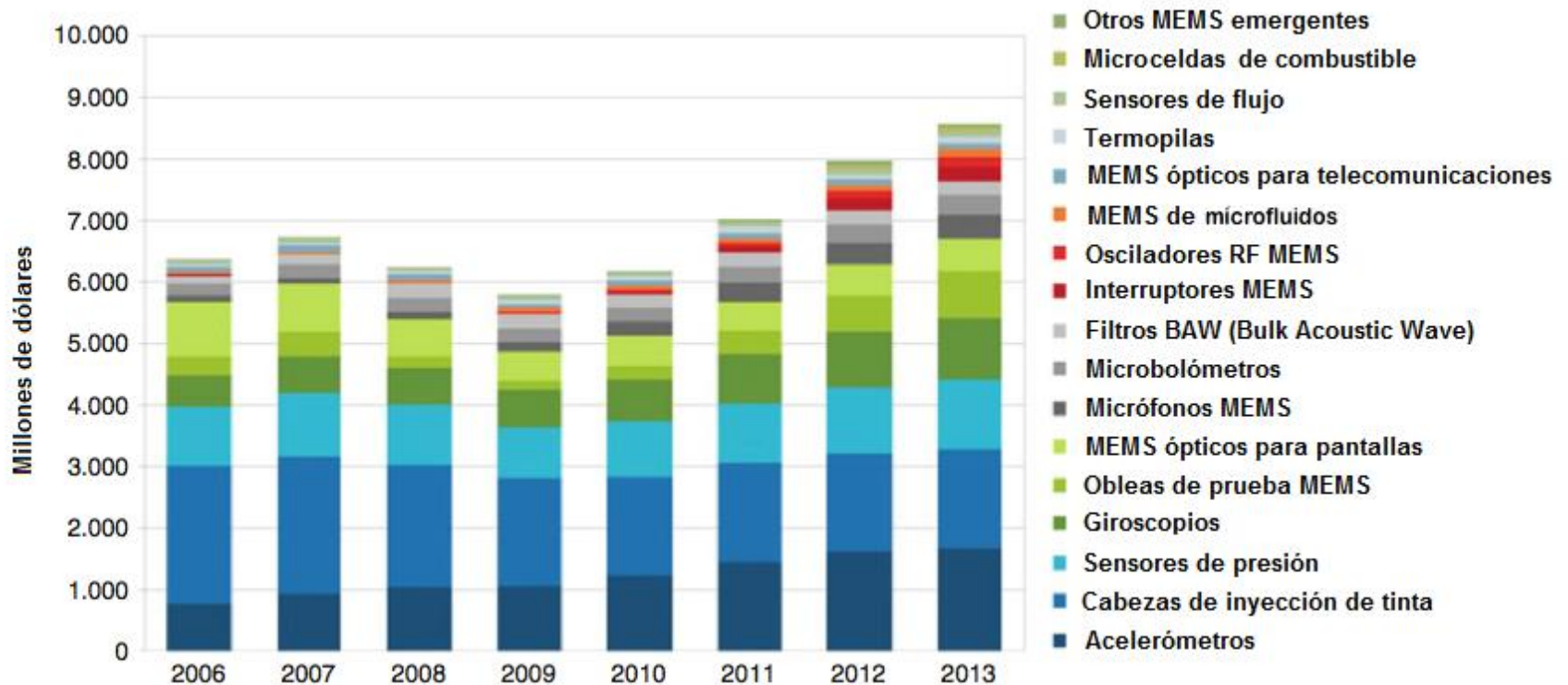


Figura 3

Consideraciones teóricas



Acelerómetro

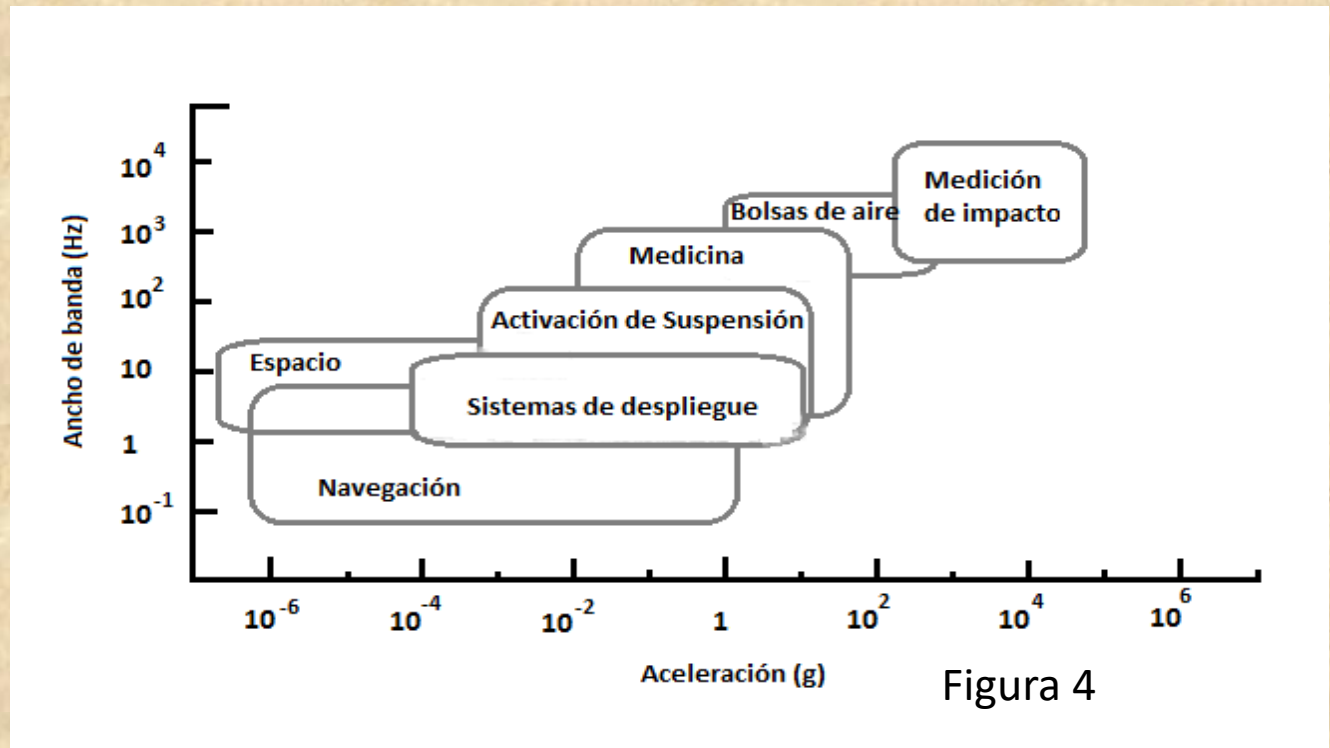
Dispositivo capaz de medir la aceleración física que experimenta un objeto debido a fuerzas inerciales o excitación mecánica.

Convierten el movimiento mecánico en una señal eléctrica haciendo uso de propiedades piezoeléctricas, piezorresistivas y capacitivas.

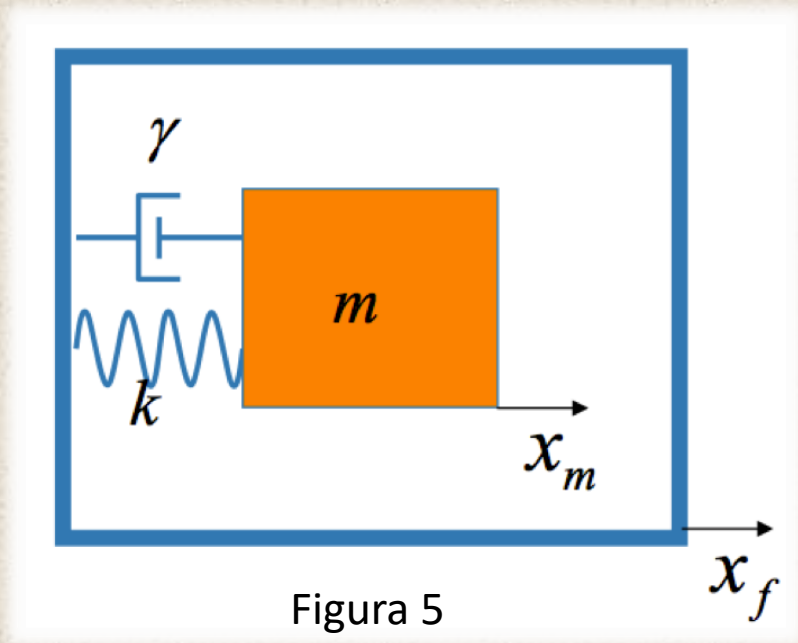
Los acelerómetros capacitivos trabajan en un rango bajo de frecuencias, lo cual ayuda a brindar alta estabilidad al funcionamiento del sistema.

Áreas de aplicación

- Sistemas de seguridad de bolsas de aire en automóviles
- Estabilización de imagen en cámaras digitales
- Medición de gravedad espacial
- Control de inclinación y estabilización de plataformas
- Sismometría, navegación inercial y sistemas de dirección



Principio de funcionamiento



- Donde,
- m : masa móvil
- k : constante elástica del resorte
- γ : coeficiente de amortiguamiento
- x_m : desplazamiento de la masa móvil
- x_f : desplazamiento del marco de referencia
- $x = x_f - x_m$: retraso en movimiento

Función de transferencia

- Segunda Ley de Newton:
 $F=ma$
- Una masa en la superficie terrestre experimenta una aceleración de 9.81 m/s^2 en caída libre.
- El cambio en la velocidad de la masa como función del tiempo es la aceleración que dicho cuerpo experimenta.
- El resorte se elonga o contrae como consecuencia del sentido de la aceleración (el movimiento de la masa se encuentra restringido a uno de tipo rectilíneo) y dicha deformación medida en unidades de longitud es proporcional a la fuerza que lo provoca.
- La relación entre el desplazamiento del resorte y la fuerza que actúa directamente o indirectamente sobre él se expresa mediante la ecuación:
 $F=kx$

Función de transferencia

- Sistema masa resorte amortiguador:

$$m \frac{\partial^2 x_m}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial(x_m - x_f)}{\partial t} + k(x_m - x_f) = F_E, \quad (1)$$

- Simplificando obtendremos un resonador amortiguado de un grado de libertad gobernado por:

$$m \frac{\partial^2(x)}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial(x)}{\partial t} + kx = F, \quad (2)$$

Función de transferencia

- Encontrar la transformada de Laplace para convertir la ecuación en función de la frecuencia, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

$$\mathcal{L}\left\{\frac{\partial^2 x}{\partial t^2}\right\} = s^2 X(s), \quad \mathcal{L}\left\{\frac{\partial x}{\partial t}\right\} = sX(s),$$

$$\mathcal{L}\{F = ma\} = mA(s)$$

- Entonces la transformada de Laplace da como resultado la siguiente ecuación:

$$mA(s) = ms^2 X(s) + \gamma sX(s) + kX(s) \quad (3)$$

Función de transferencia

- Por definición, una función de transferencia se puede expresar según: $H(s) = X(s)/A(s)$, donde $H(s)$ es la función de transferencia, $X(s)$ es la transformada de Laplace de la respuesta del sistema y $A(s)$ es la transformada de la señal de entrada, por lo que la transformada de la función del acelerómetro se expresa como sigue:

$$H(s) = \frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + s(\gamma/m) + (k/m)} \quad (4)$$

Ecuaciones características

- Frecuencia natural:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- Factor de calidad:

$$Q = \frac{\omega_0 m}{\gamma}$$

- En la región lineal de la función de transferencia, en la banda de bajas frecuencias, la magnitud está dada por la siguiente ecuación:

$$H(0) = \frac{\partial x}{\partial g} = \frac{mg}{k}$$

- La sensibilidad del acelerómetro se define por:

$$S = \frac{H(0)}{g} = \frac{m}{k}$$

Acelerómetro capacitivo

Relación entre acelerómetro y circuito de lectura

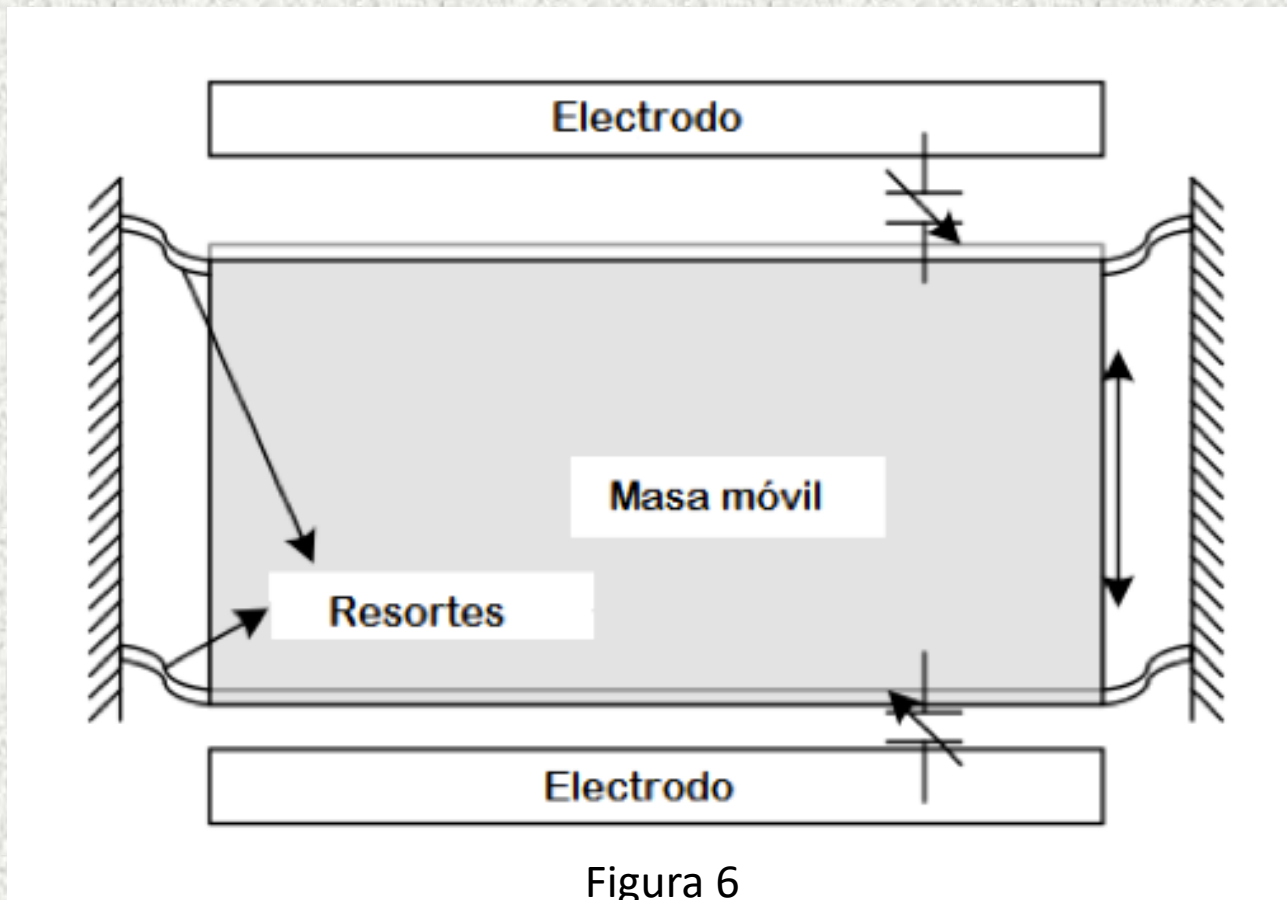


Figura 6

Interfaces capacitivas

- a) Medio puente: cuenta con dos capacitores sensitivos, al aplicar un señal senoidal o cuadrada mucho mayor a la frecuencia de resonancia del acelerómetro se crea un un flujo de carga o voltaje en nodo común .
- b) Puente completo: Al menos dos de sus capacitores son sensitivos, un flujo de carga diferencial o voltaje es generado en los nodos de sensado del puente.
- c) Estructura semi diferencial: El sensado se lleva a cabo en los extremos, lo cual permite la utilización de un circuito diferencial a la salida.

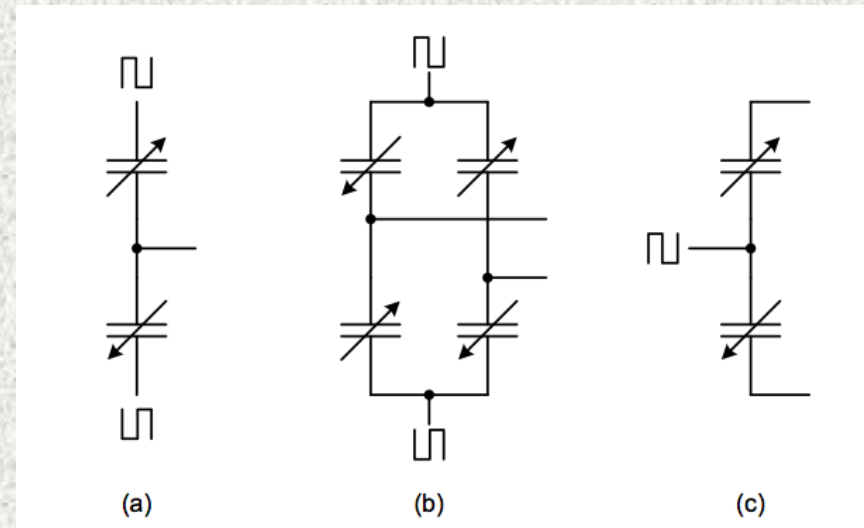


Figura 7

Circuitos de lectura para diferencias capacitivas

Puente amplificador AC:

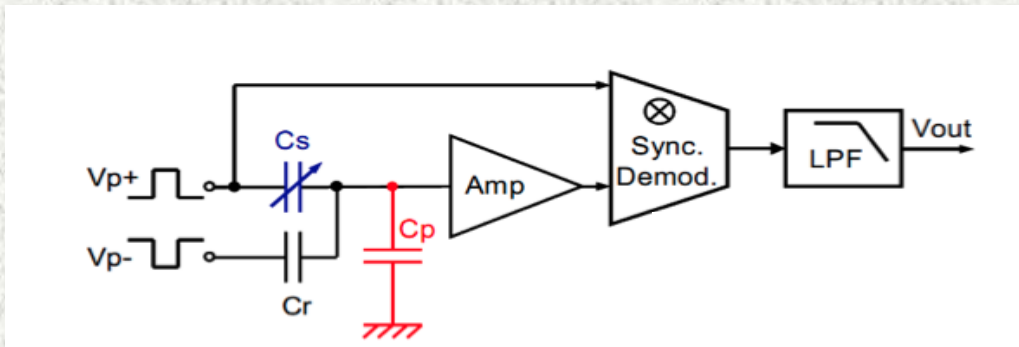


Figura 8

$$V_{out} = V_p \frac{\Delta C}{2C_{s0} + C_p} A_v$$

donde,

V_{out} : Voltaje de salida

V_p : Amplitud del voltaje de la señal cuadrada

C_{s0} : Capacitor de sensado

C_p : Capacitancias parásitas

A_v : Ganancia de voltaje

Circuitos de lectura para diferencias capacitivas

Amplificador de trans-impedancia:

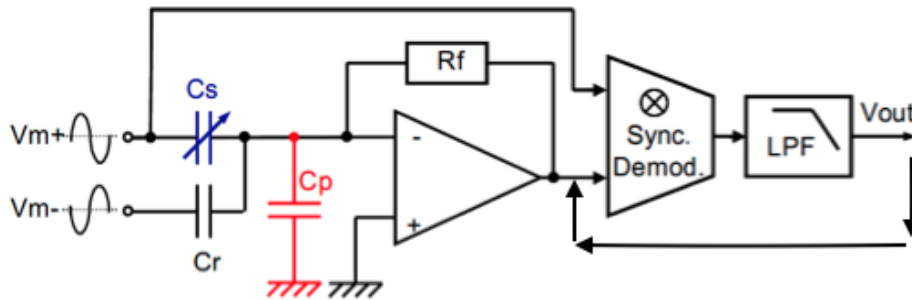


Figura 9

$$V_{out} = 2\pi f_{control} V_m R_f \Delta C$$

donde,

$f_{control}$: Frecuencia de la señal senoidal

V_m : Amplitud del voltaje de la señal senoidal

R_f : Resistencia de lazo cerrado

Caracterización del ADXL320



ADXL320 de Analog Devices

- Mide aceleración en los ejes X y Y, incluye un sistema acondicionador de señal de salida de voltaje.
- Mide aceleración en un rango de $\pm 5G$
- Contiene un sensor con superficie micromaquinada de polisilicio y un circuito acondicionador de señal para implementar un sistema de medición de aceleración en lazo abierto.
- Las señales de salida son voltajes analógicos, los cuales son proporcionales a la aceleración.
- Mide fuerzas de aceleración estática, como gravedad, lo cual permite que sea usado como sensor de inclinación.

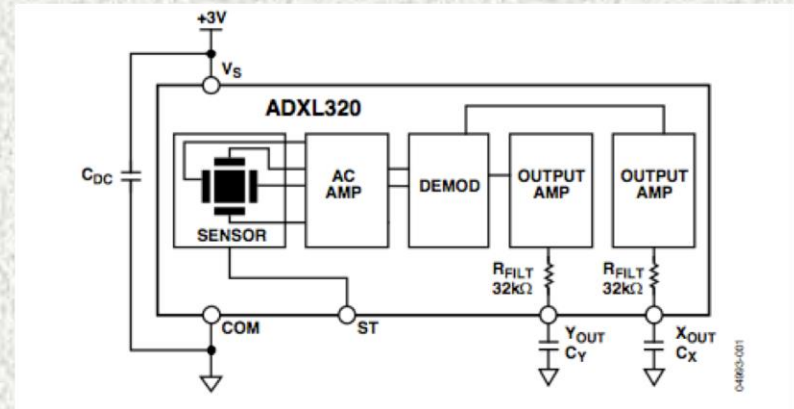


Figura 10

ADXL320 como inclinómetro

Utilizado como sensor de inclinación, teléfonos móviles, dispositivos de deporte o de salud.

Un acelerómetro usa la fuerza de gravedad como un vector de entrada para determinar la orientación de un objeto en el espacio.

Un acelerómetro es más sensible a la inclinación cuando su eje más sensible se encuentra perpendicular a la fuerza de gravedad. 17.5 mG por grado de inclinación, a menor inclinación la resolución disminuye.

Conversión de aceleración a inclinación

- Cuando el ADXL320 se encuentra paralelo a la superficie de la tierra, las salidas para los ejes x y y proporcionan un voltaje base llamada “zero tilt” o voltaje de ‘offset’. Conforme se varía la inclinación desde esta posición, los cambios en la aceleración causan un cambio en el valor del voltaje de salida.
- Dada la salida en un valor de DC, es posible calcular la inclinación en grados dada la siguiente ecuación:

$$V_{out} = V_{offset} + \left(\frac{\Delta v}{\Delta G} * 1G * \text{Sin}\theta \right)$$

Donde:

- V_{offset} : Salida DC del ADXL320 a una inclinación de 0° [Volts]
- $\frac{\Delta v}{\Delta G}$: Sensibilidad del acelerómetro [Volts/G's]
- $1G$: Gravedad de la tierra [$9.81m/s^2$]
- θ : Ángulo de inclinación [Grados]

Sistema de montaje para el ADXL320

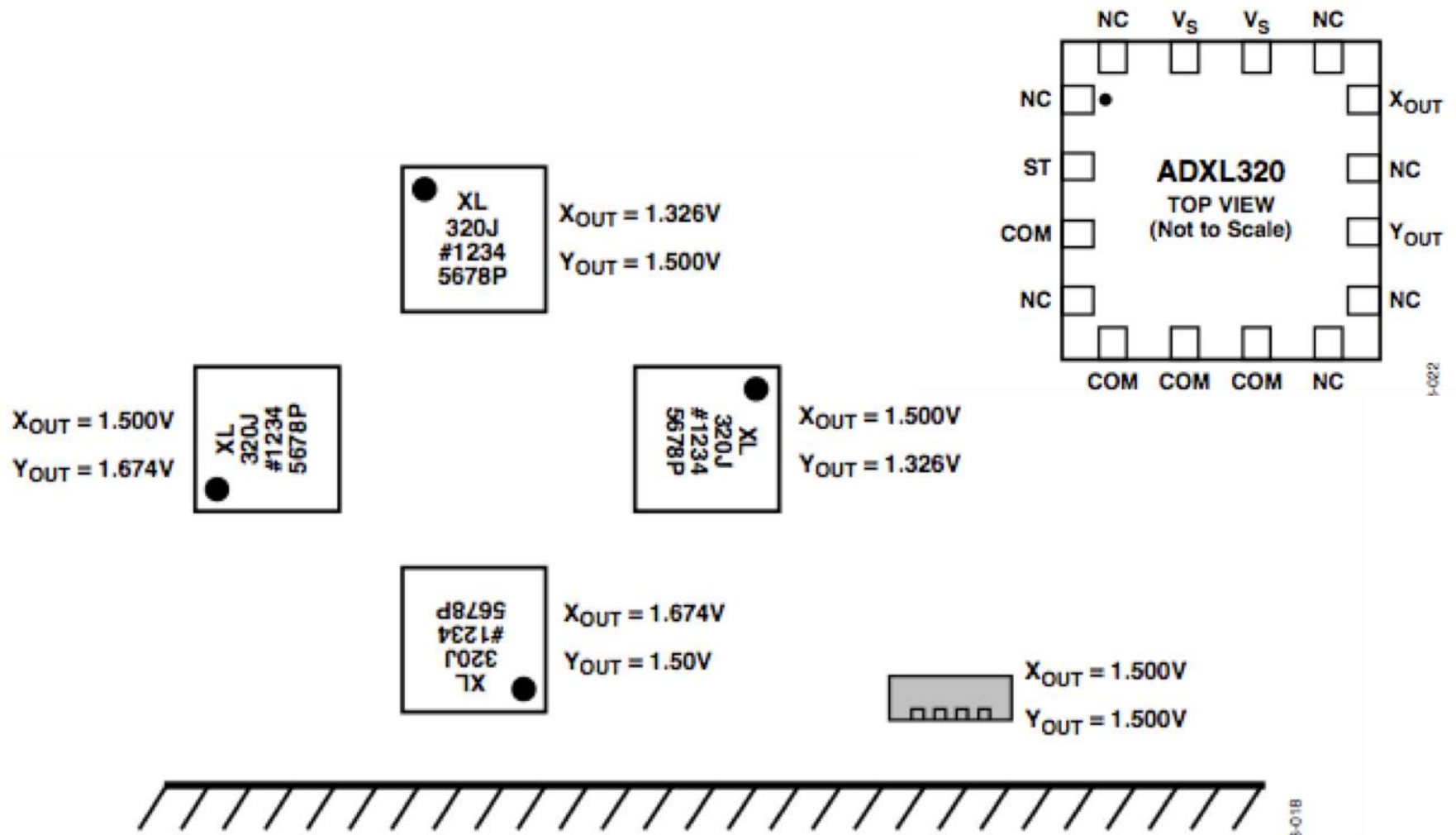
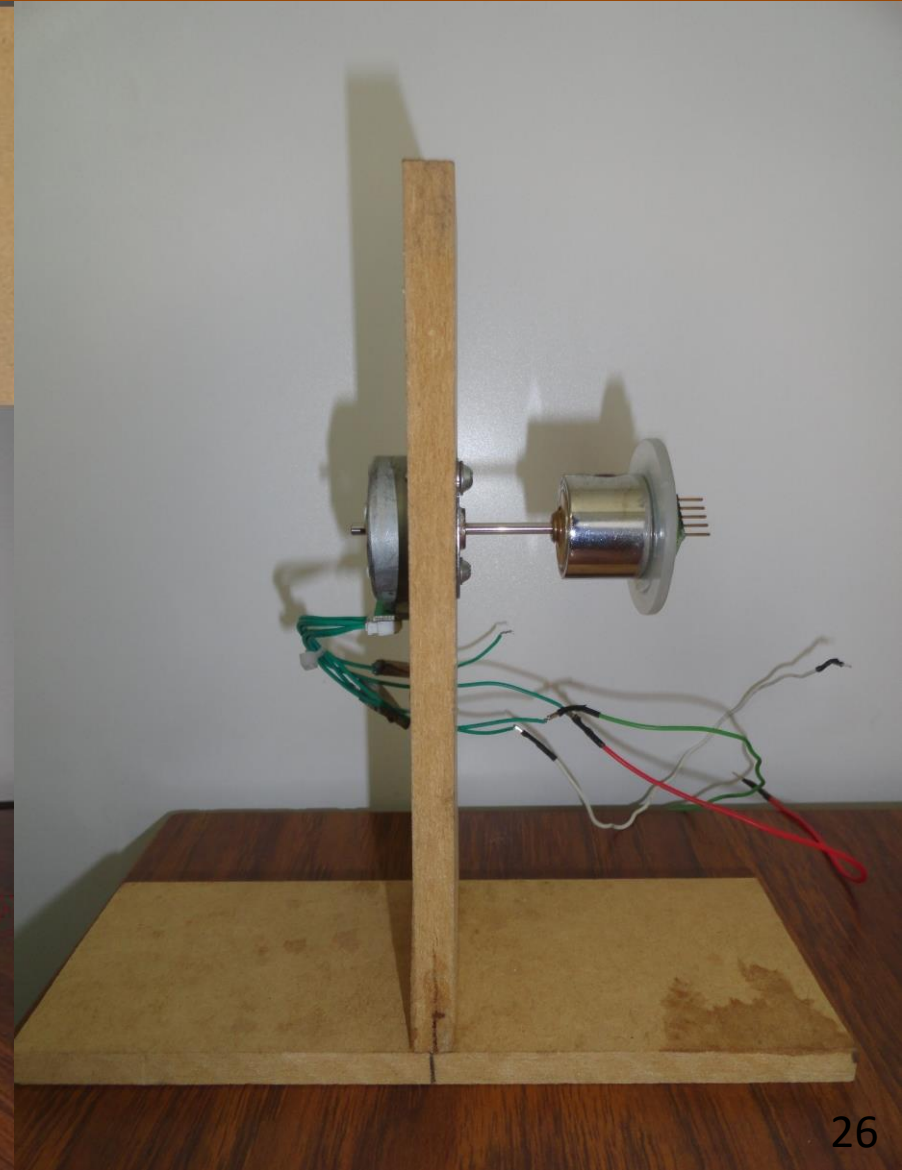
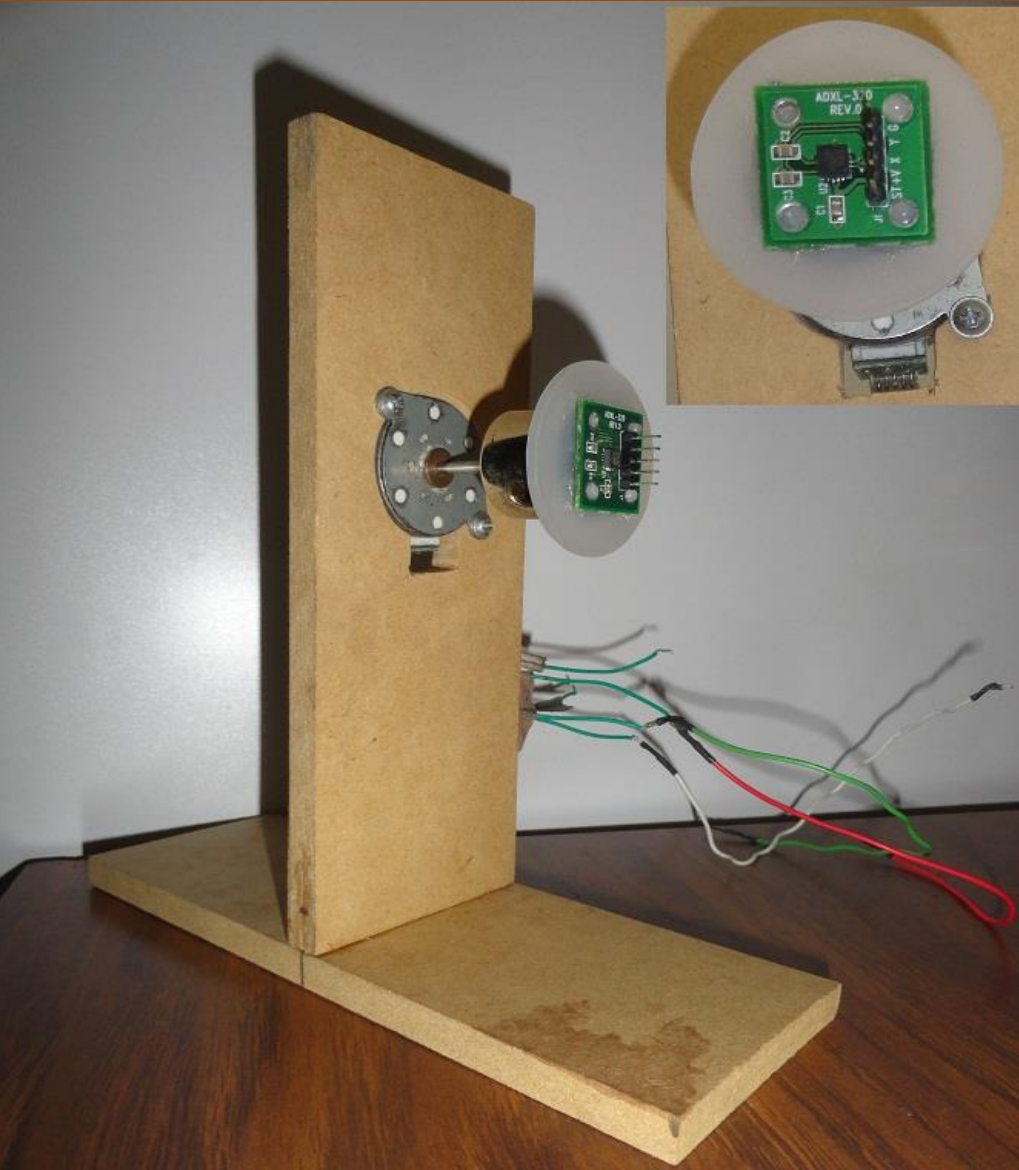


Figura 11

Soporte para ADXL320



Esquema de medición

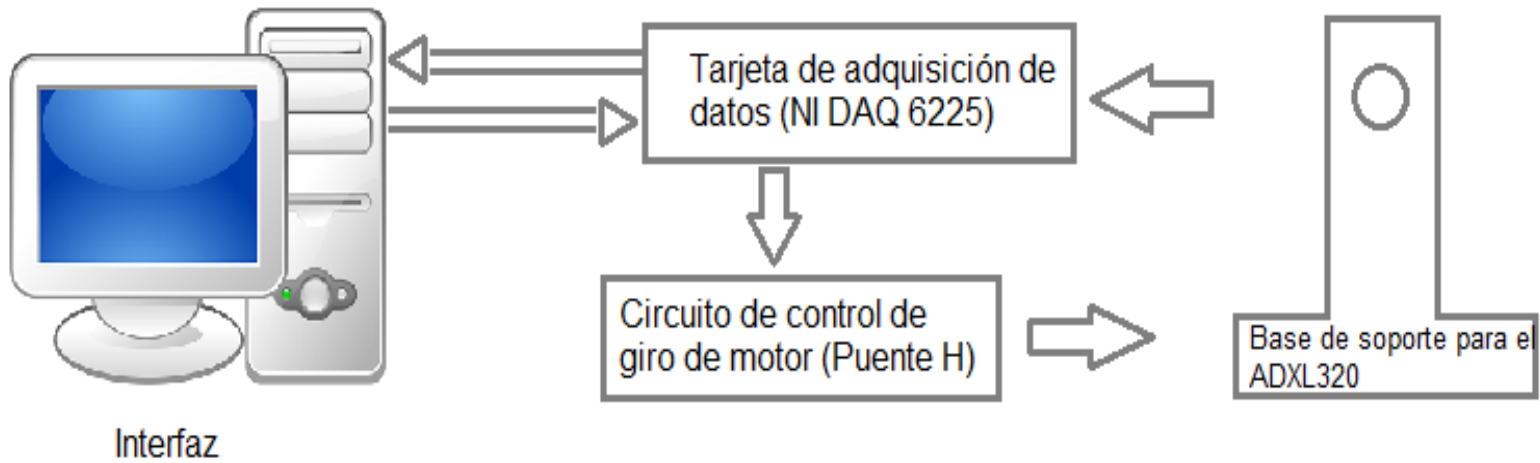
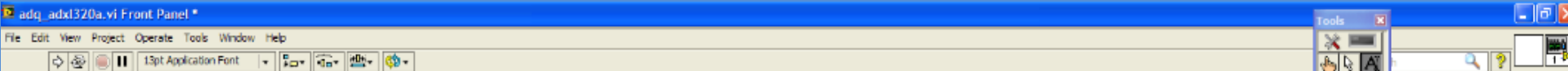


Figura 12



Interfaz



Control del motor

peso Sentido
Medio Homero
Entero Anhorario

Velocidad
1
resolucion 100
7.5 200
300
400
500

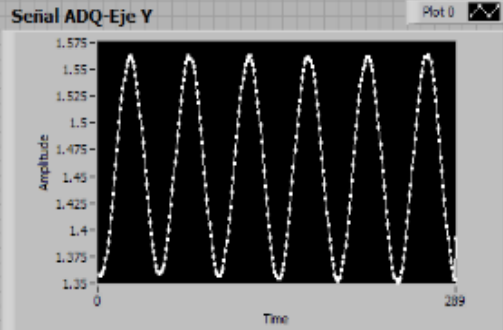
STOP

Bits de control

Ángulo Error

15

Medición de la inclinación con ADXL320

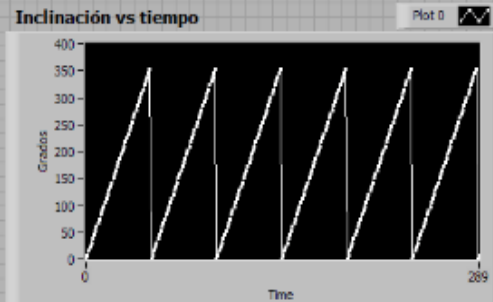


Inclinación eje Y (Grados)

NaN

Voltaje de entrada eje Y

0.001061



Tools

Context Help

Señal ADQ-E

No description available

Señal ADQ-Eje Y (double [64-bit real (~15 digit precision)])

Detailed help

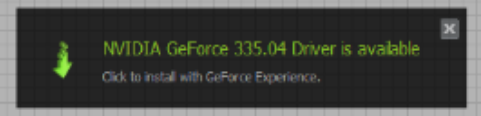
Controls

Search Customize

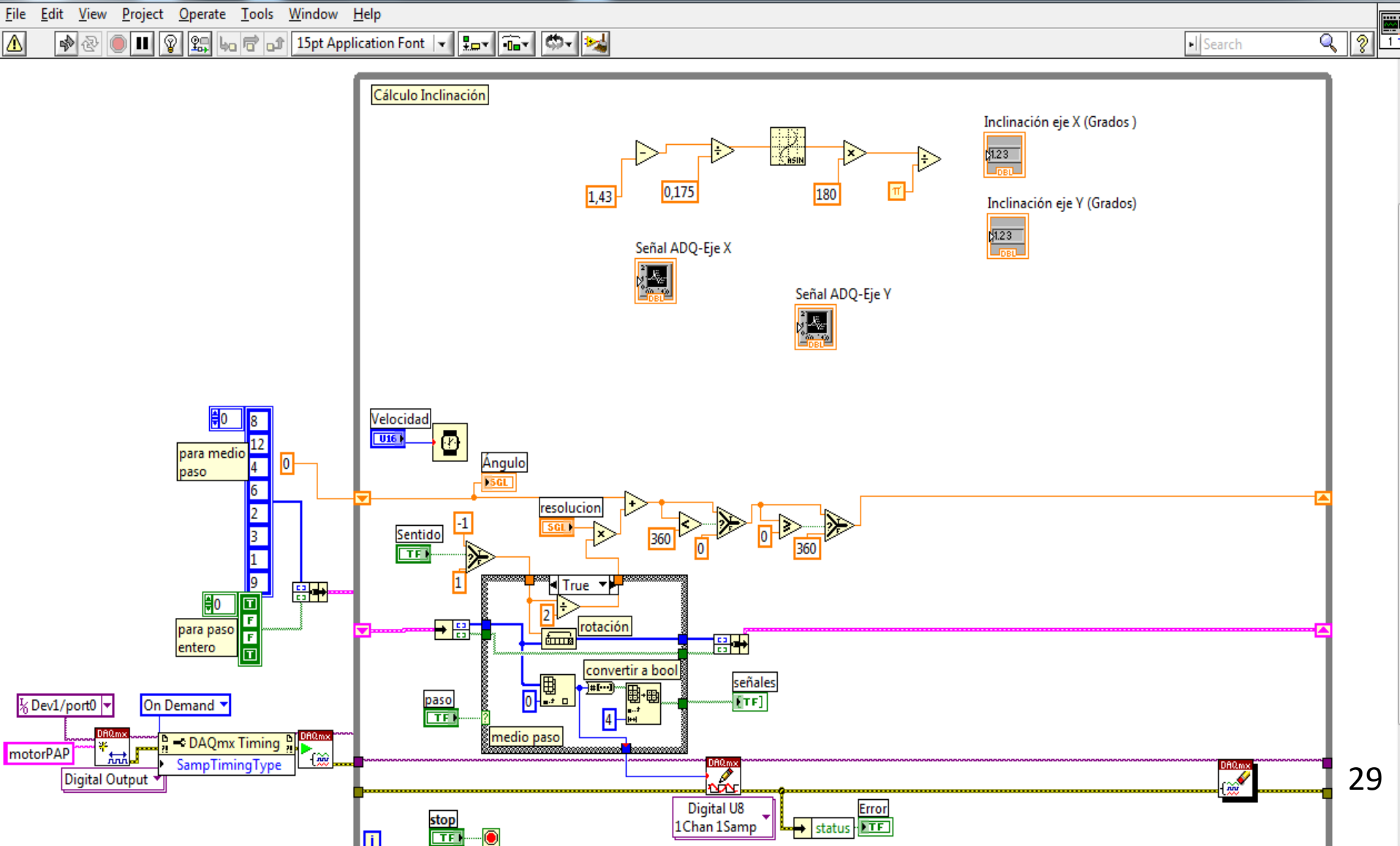
Modern

- Numeric
- Boolean
- String & Path
- Array, Matrix...
- List, Table & T...
- Graph
- Ring & Enum
- Containers
- I/O
- Variant & Class
- Decorations
- Refnum

- Silver
- System
- Classic
- Express
- Control Design & Simulation
- .NET & ActiveX
- Signal Processing
- Actions
- User Controls
- Select a Control...



Interfaz



Resultados eje X sentido horario

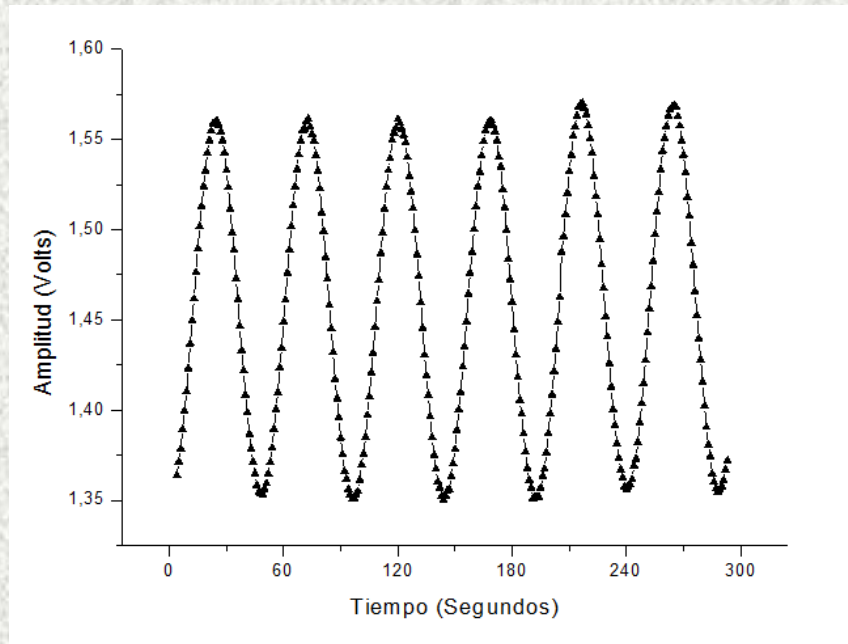


Figura 15

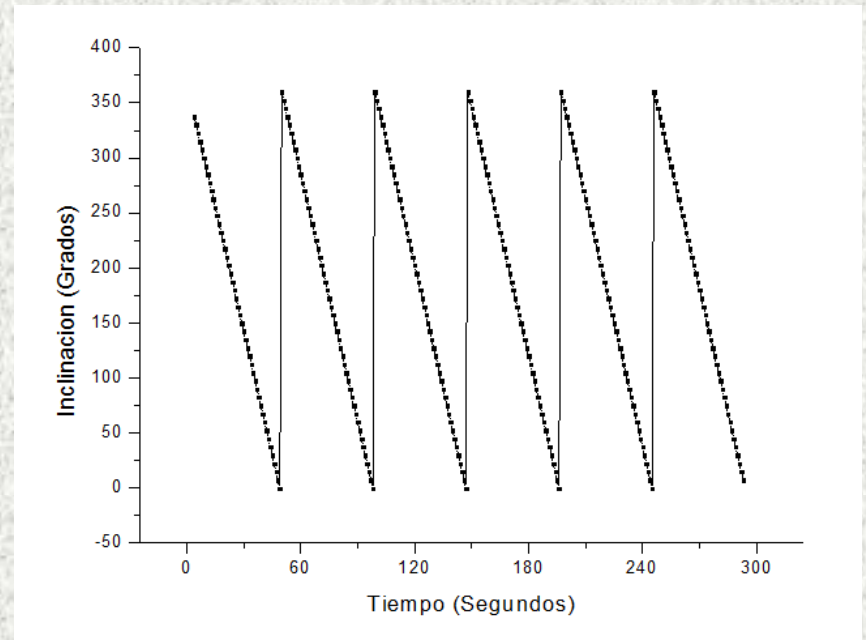


Figura 16

Resultados eje Y sentido horario

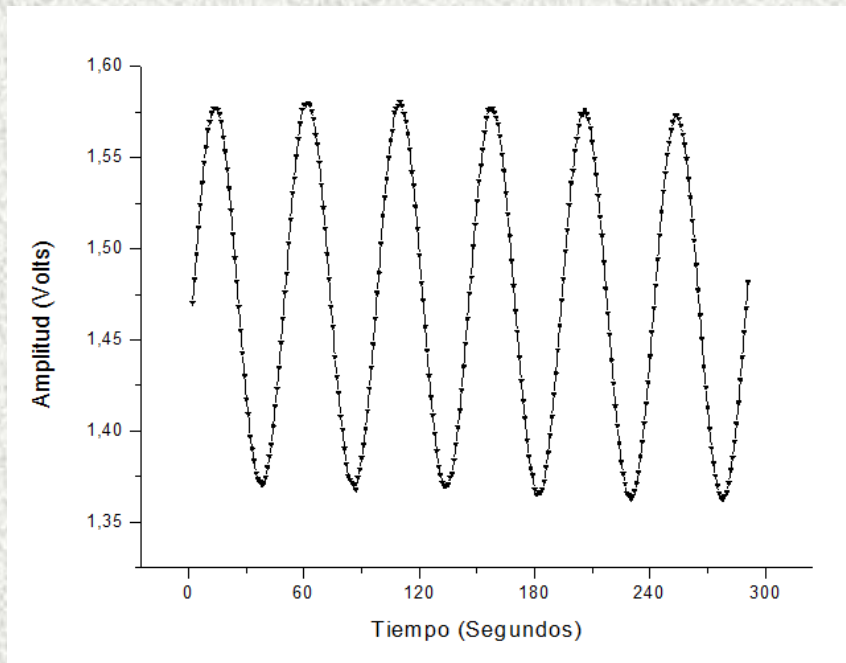


Figura 17

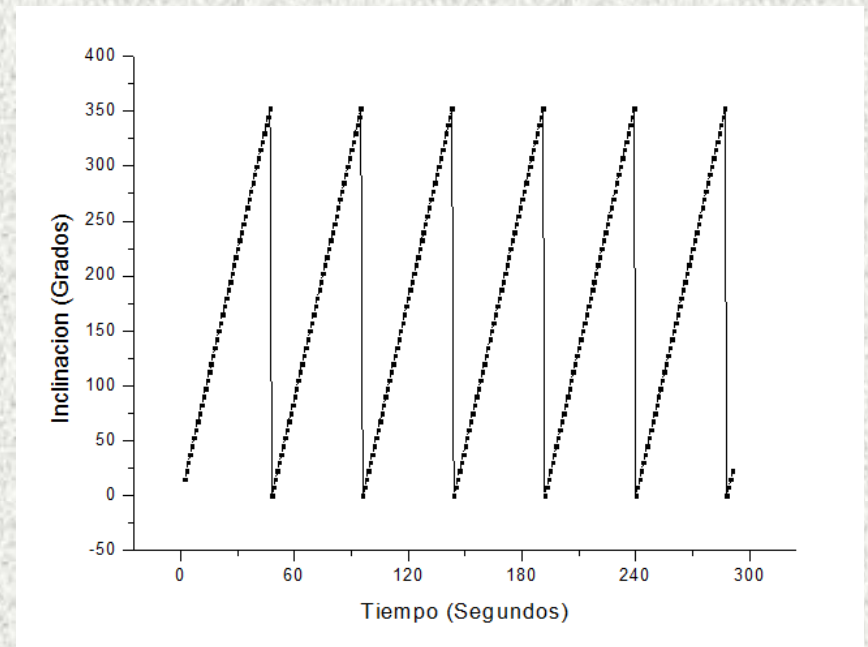


Figura 18

Aceleración gravitacional vs Inclinación

- Cuando un eje del acelerómetro está alineado con la aceleración de gravedad, este retornará un valor de +1G o -1G.
- Los resultados recolectados son reportados tomando en cuenta la rotación del dispositivo en un rango de 360 grados.
- El ADXL320 emite 1.5 V a cero grados de inclinación, en donde 1G es la aceleración de la gravedad normal. Su salida cambia 175 mV por cada G, por lo que 1.325 V indica la posición totalmente vertical y 1.675 indica la inclinación totalmente al revés.

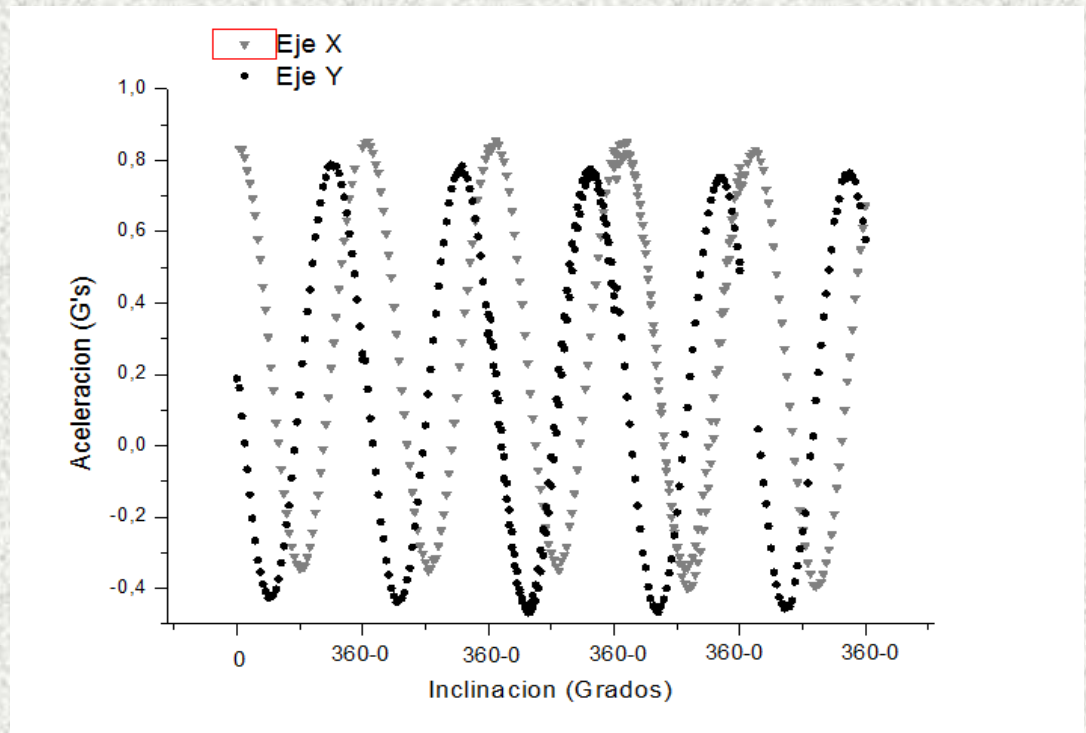


Figura 19

Diseño del circuito de lectura



Diseño e Implementación de CL

- Encontrar los principios básicos que nos permitan implementar un circuito que sea capaz de leer la señal capacitiva diferencial que proporciona un acelerómetro a la salida.
- PRINCIPIO BÁSICO DE MEDICIÓN MEDIO PUNTE CAPACITIVO, ETAPA DE AMPLIFICACIÓN Y ETAPA DE RECTIFICACIÓN DE SEÑAL.

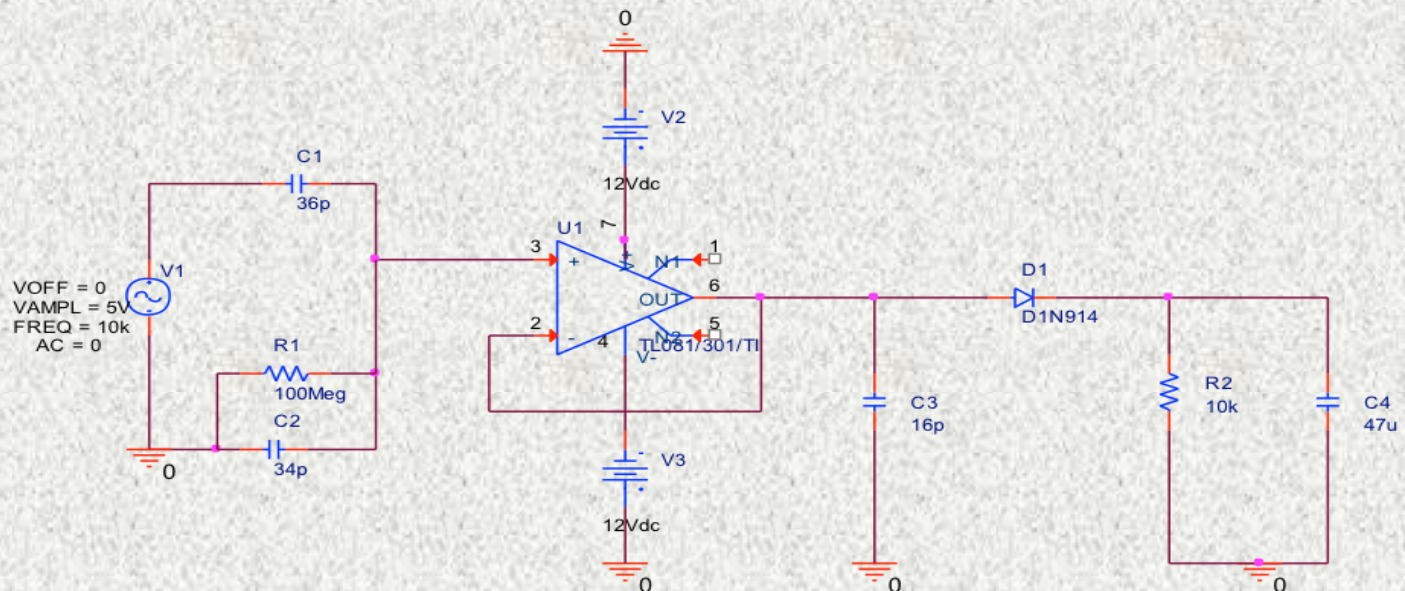
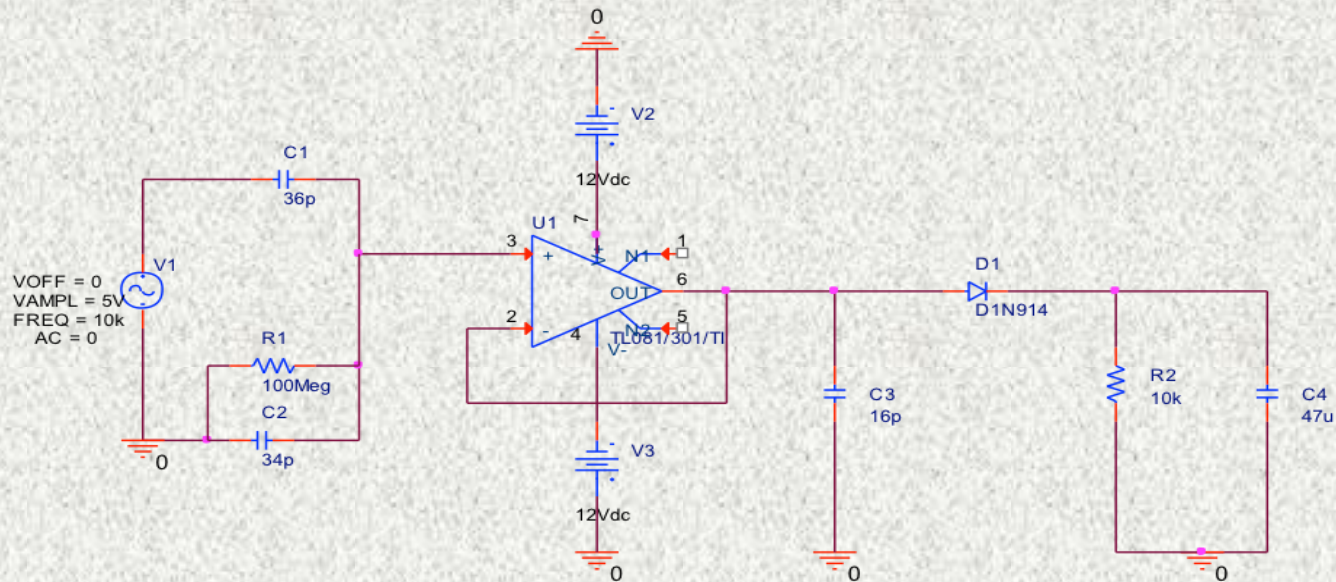


Figura 20

Simulación

- Determinar la viabilidad del diseño, conveniente para establecer el valor de algunos de los parámetros para el control del circuito (amplitud del voltaje de control y frecuencia de operación).



Simulación para $f=1\text{kHz}$ y pF

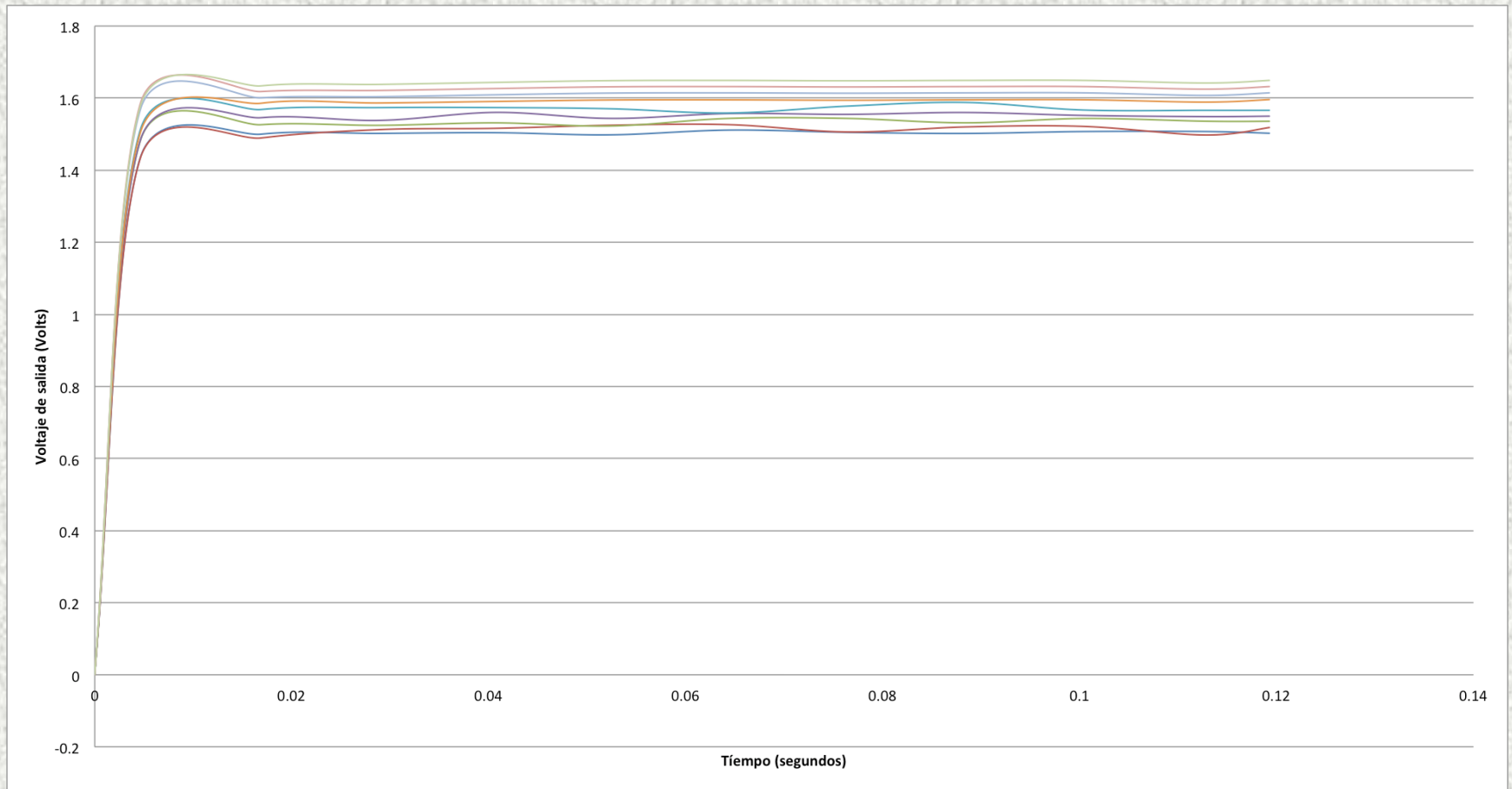


Figura 21

Simulación para $f=10$ kHz y pF

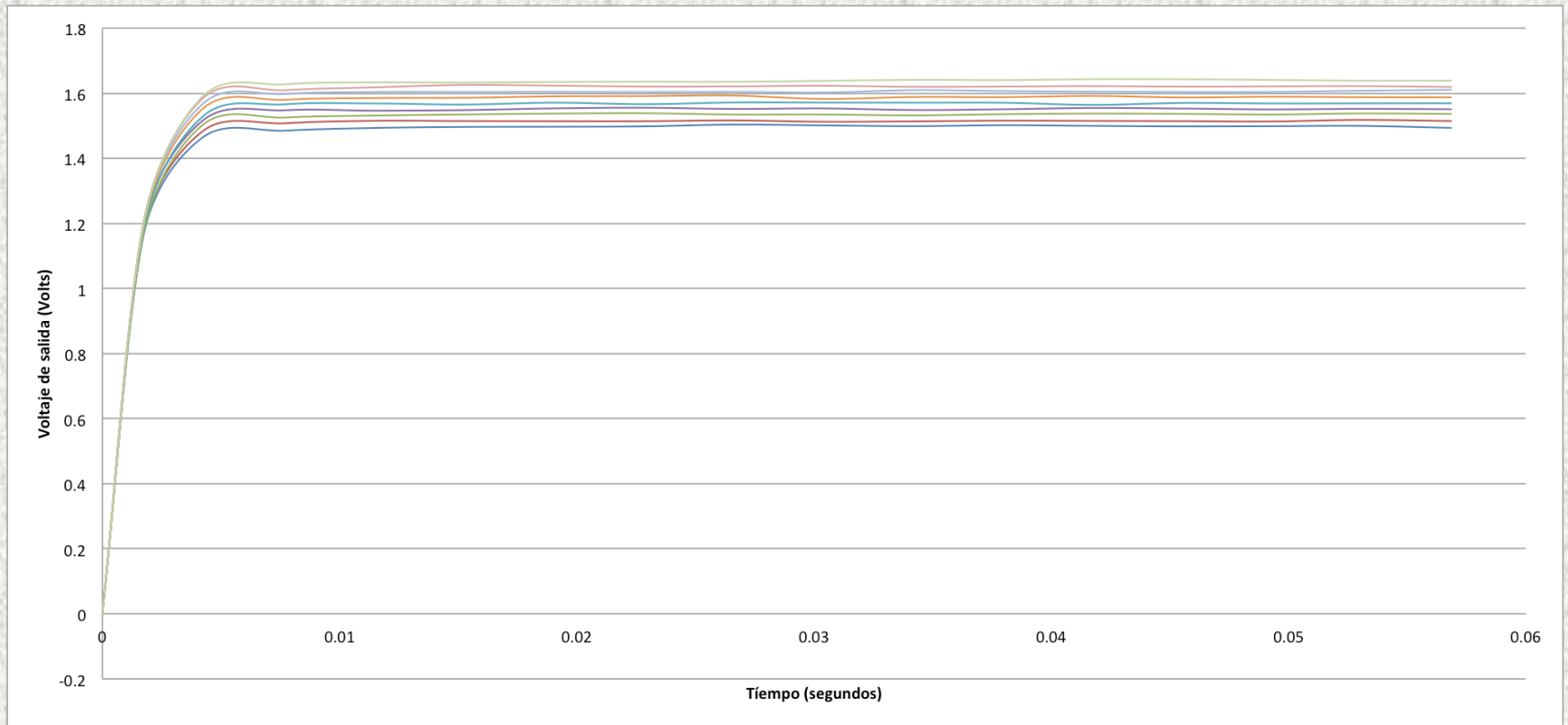


Figura 22

Simulación para $f=100$ kHz y pF

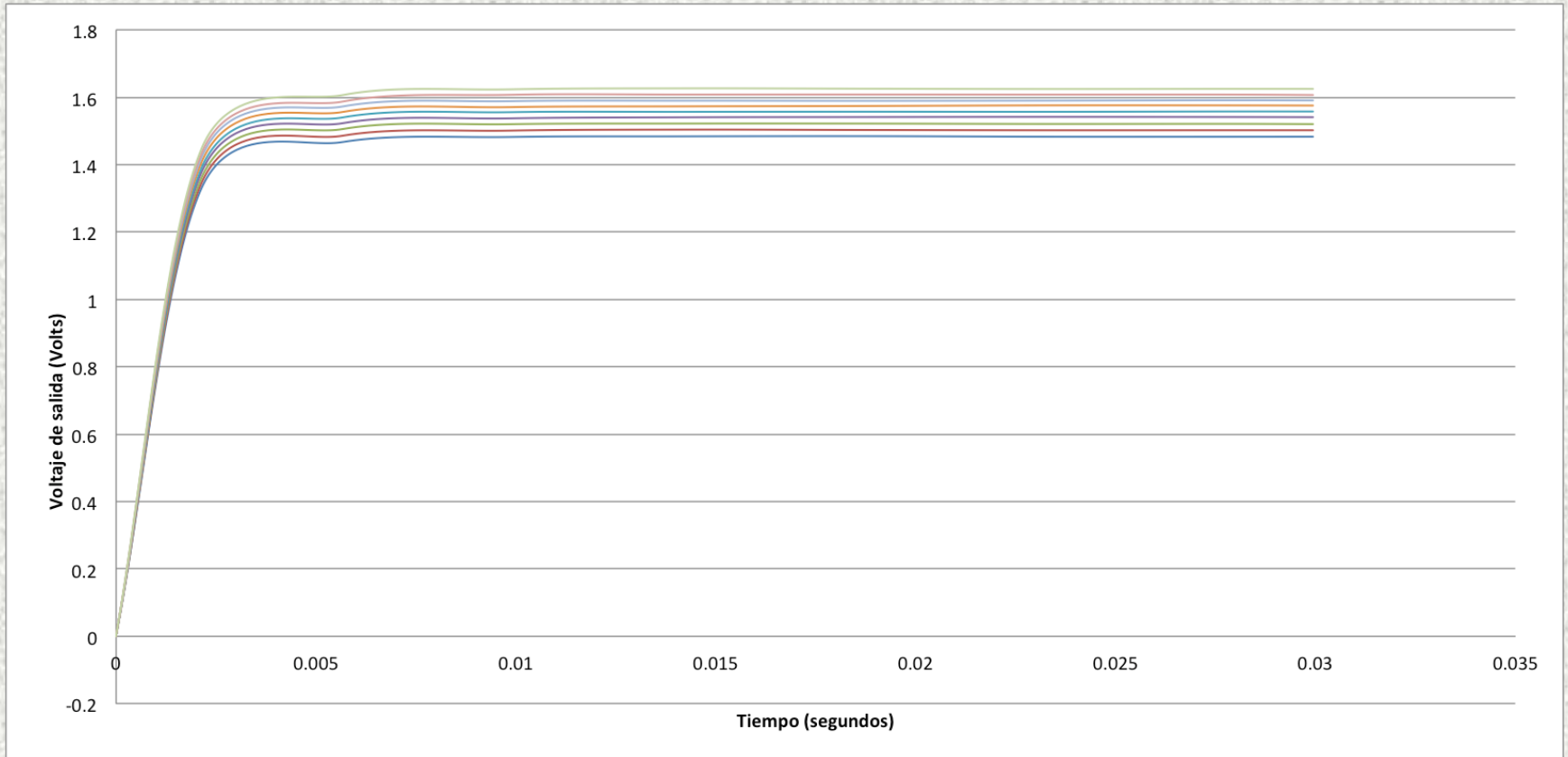


Figura 23

Resultados para simulación de pF

Valor de capacitor variable (pF)	Voltaje a la salida (Volts)
32	1.4996
32.5	1.5112
33	1.5355
33.5	1.5522
34	1.5672
34.5	1.5889
35	1.6056
35.5	1.6211
36	1.6377

Tabla 1

Resultados para valores prácticos pF

Capacitancia (pF)	$V_0 - Medido$	$V_0 - Simulado$
38.8	1.788	1.2354
41.2	1.892	1.3296
43.55	1.932	1.3727
46.9	2.004	1.4592
48.97	2.030	1.5091
50.2	2.089	1.5412
51.65	2.104	1.5743
53.74	2.128	1.6230
56	2.149	1.6714
58.2	2.209	1.7201
59.3	2.259	1.7422

Tabla 2

Capacitancia- Vo

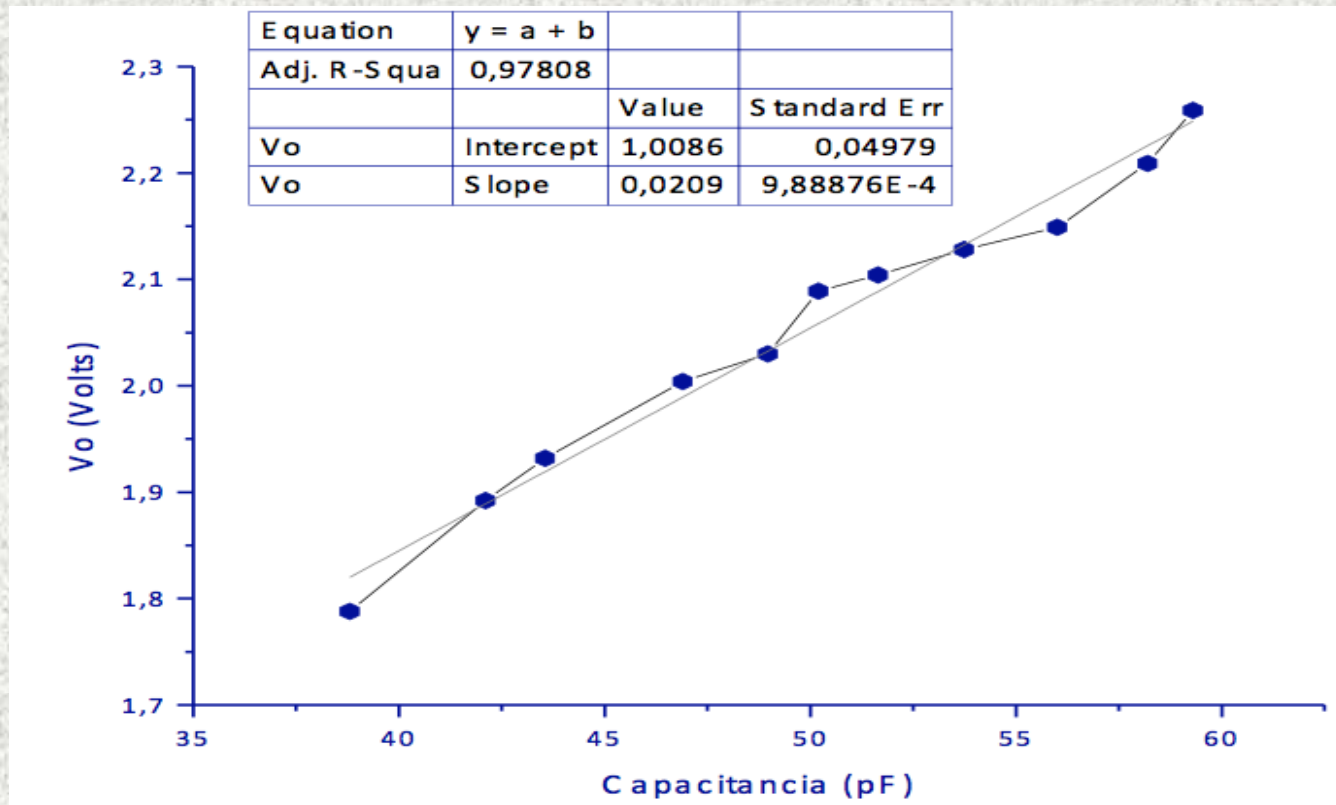


Figura 24

$$E = \left| \frac{V_{0s} - V_{0m}}{V_{0m}} \right| * 100 = \left| \frac{1.7422 - 2.259}{2.259} \right| * 100 = 22.87\%$$

Diseño de estructuras de prueba



Análisis electrostático

- La fuerza electrostática tiene múltiples aplicaciones en los actuadores de microsistemas.
- Estudio de la variación de la capacitancia en un peine de dedos electrostáticos.
- El trabajo se llevó a cabo en COMSOL/Multiphysics, el cual está basado en el método de elemento finito.
- Uno de los elementos de prueba que contienen los acelerómetros comerciales es una estructura capacitiva que se incluye dentro de la masa de prueba, la cual se puede polarizar para provocar una fuerza electrostática con la cual se accionan las placas del capacitor de manera que una de las placas se desplace, es decir adopta la función de un actuador. De esta manera, se deberá obtener una respuesta a la salida del acelerómetro, lo cual indica que éste se encuentra funcional.

Ecuaciones características

- Fuerza electrostática:

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{(d-x)^2} V^2 \quad (5)$$

- Balance de fuerzas:

$$F = F_e + F_k = 0 \quad (6)$$

- Posición de equilibrio:

$$x < \frac{1}{3}d \quad (7)$$

- Voltaje crítico:

$$V_{po} = \sqrt{\frac{8kd^3}{27A\epsilon\epsilon_0}} \quad (8)$$

Ecuaciones para movimiento en peine de dedos

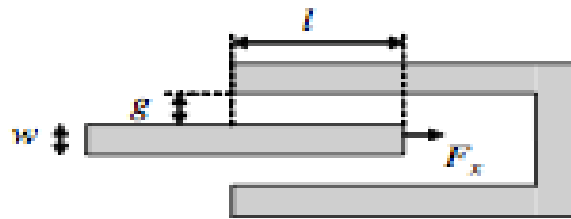


Figura 25

$$F_x = \frac{\epsilon t}{g} V^2$$

$$F_{total} = n F_x$$

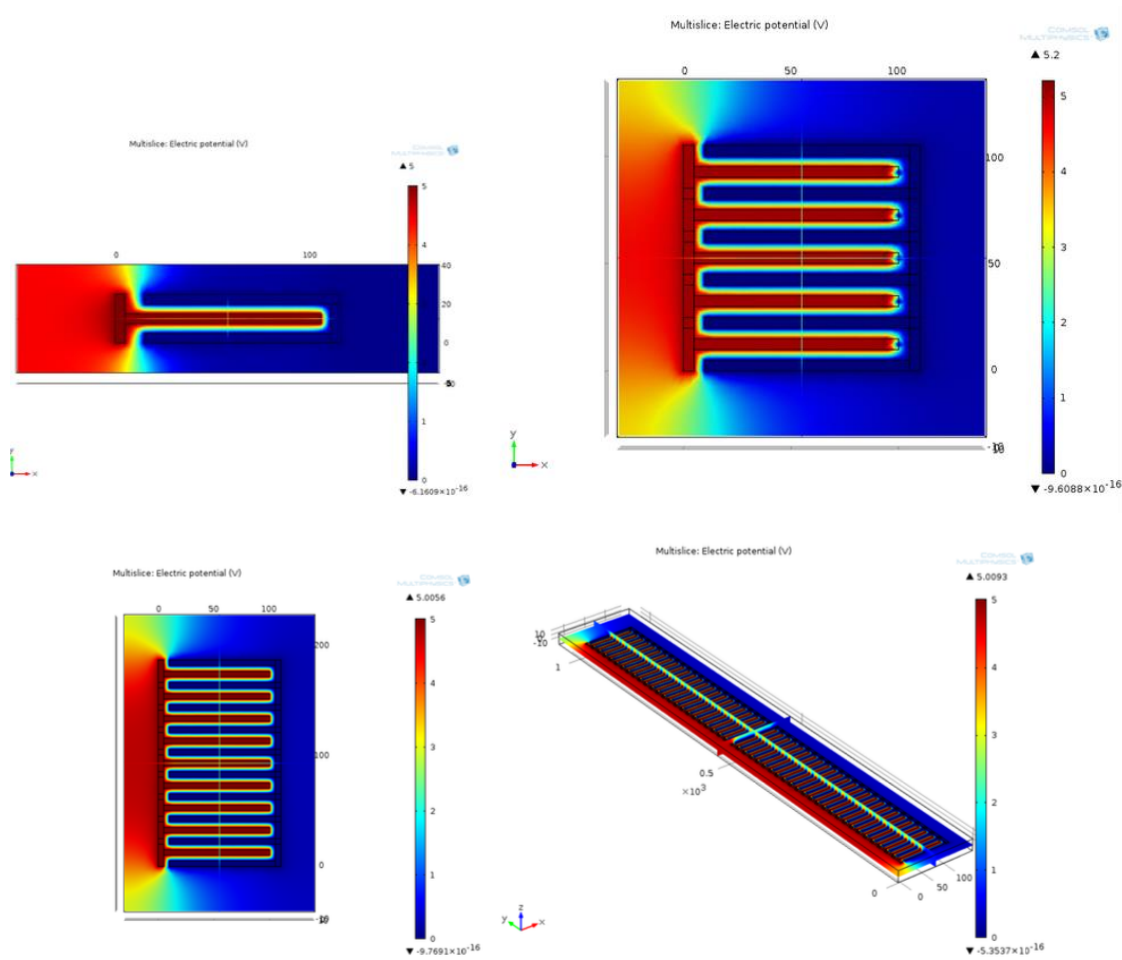
$$F_{total} = k_x \delta_x$$

$$\delta_x = \frac{\epsilon t n}{k_x g} V^2$$

$$C = \frac{2 n \epsilon t l}{g}$$

Donde, ϵ = permitividad del espacio libre, V = voltaje de actuación, n = número de dedos, t = espesor de dedo, F_x = fuerza electrostática en dirección x, g = separación entre dedos, δ_x = desplazamiento del combo de dedos en dirección x, k_x = constante elástica para soportar la viga en dirección x, C = capacitancia del combo de dedos (el factor 2 se debe a los dos lados del dedo).

Estructuras propuestas



(a) Peine de 10 dedos

(b) Peine de 50 dedos

Figura 26

Resultados

Variación de n para calcular C
4.012fF-0.211 pF

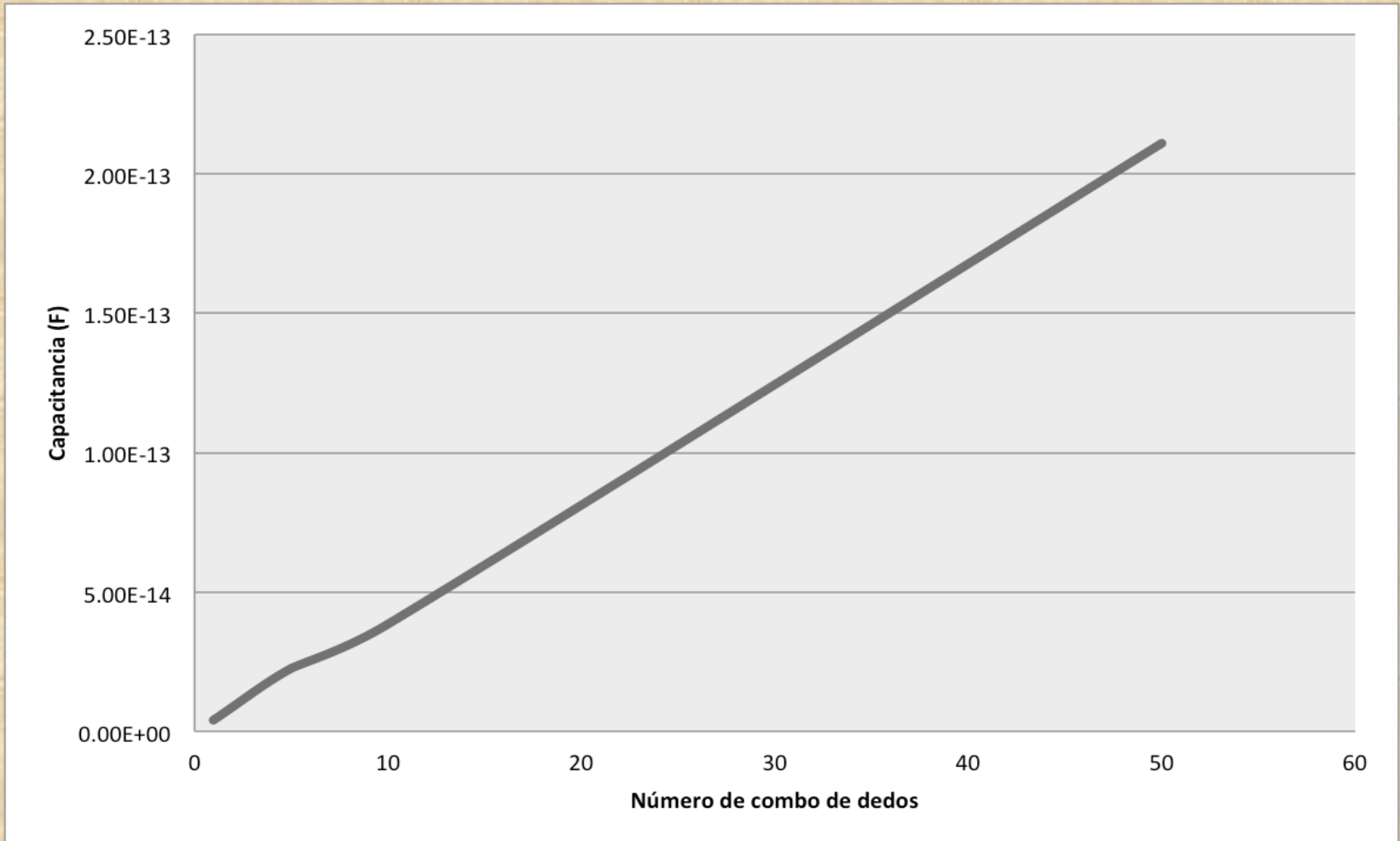


Figura 27

Relación Fuerza Vs Capacitancia

0.221 N-11.07 N

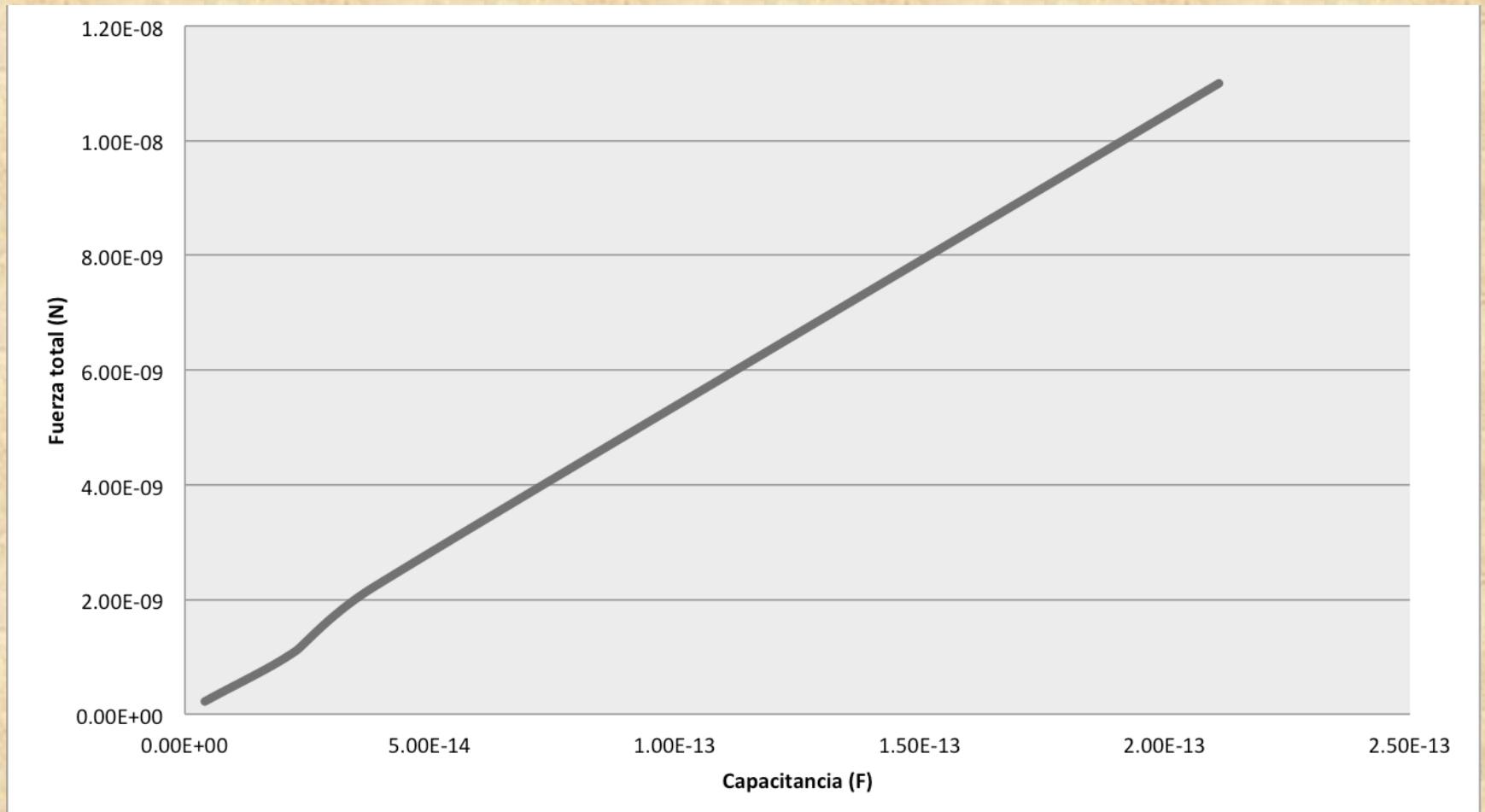
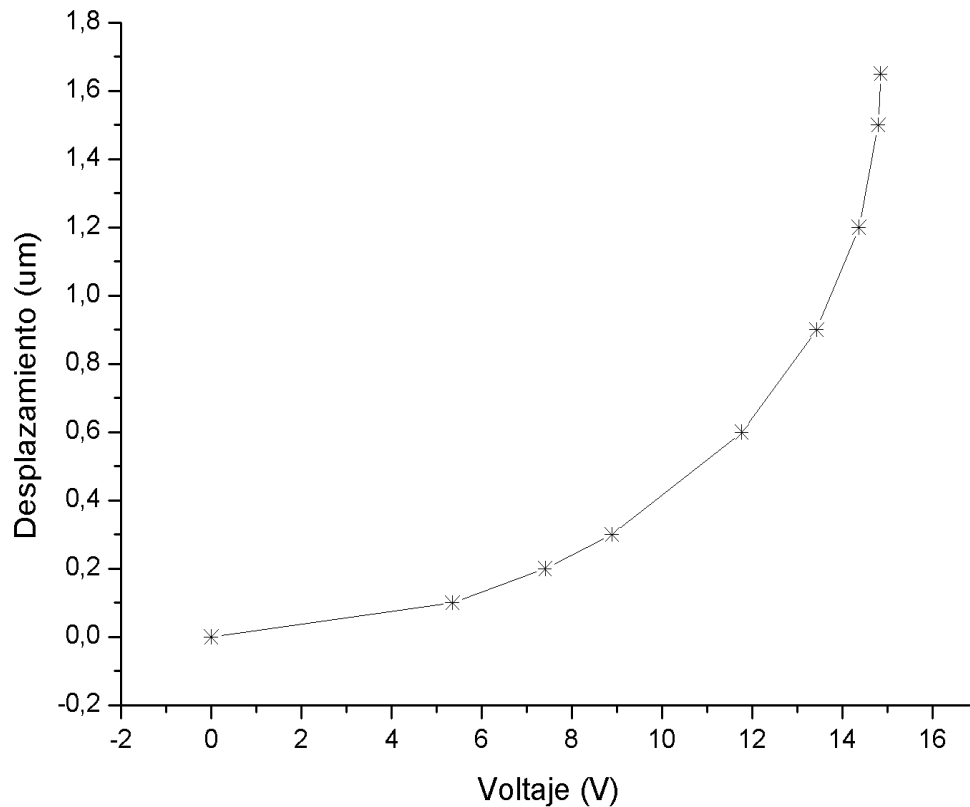


Figura 28

Rango dinámico de actuación



$d = 50 \mu\text{m}$
 $x < 1,67 \mu\text{m}$
 $V_{po} = 14,86 \text{ V}$

Figura 29

Relación V-C en rango dinámico

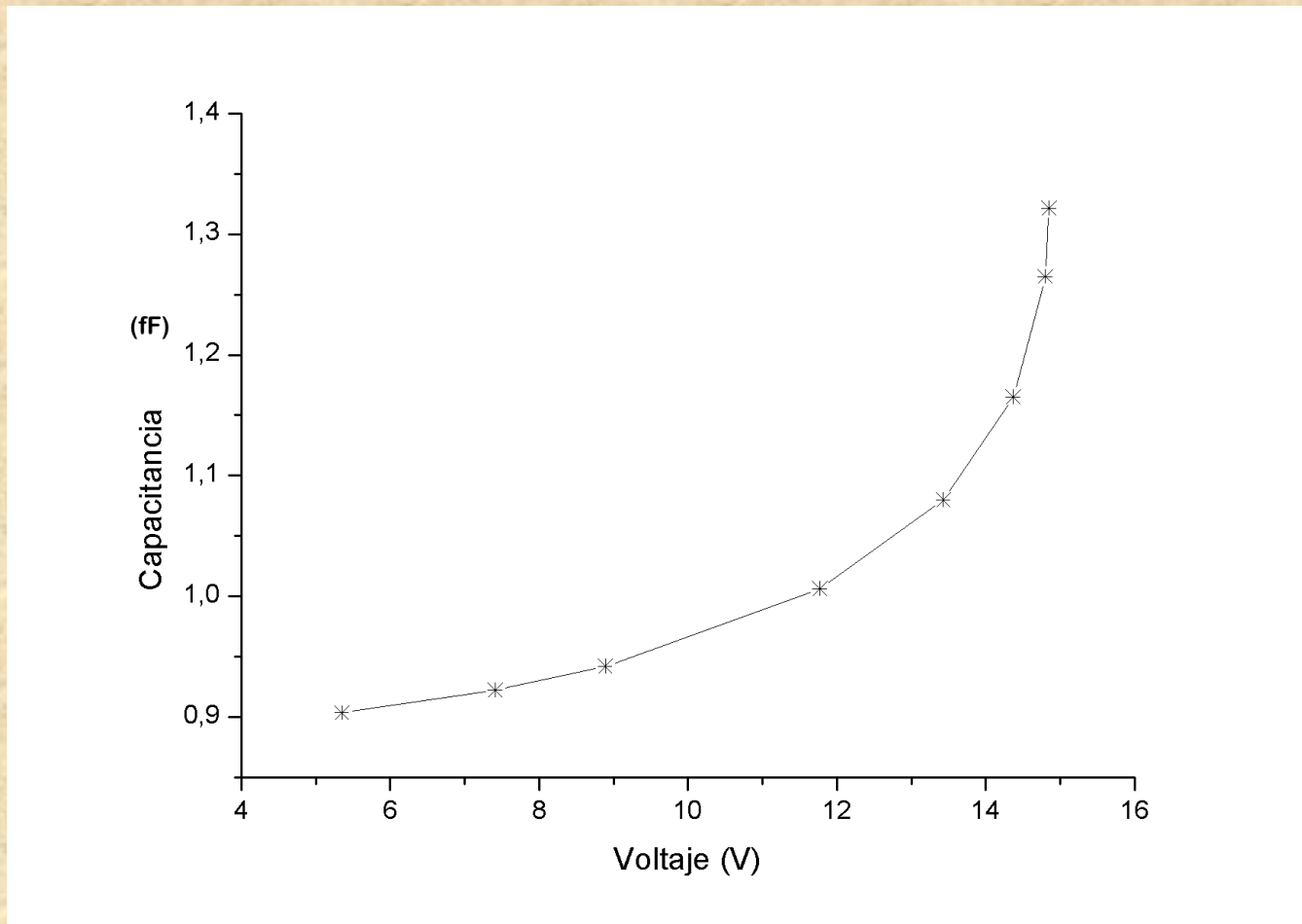


Figura 30

Parámetros característicos para estructura de 50 pares de dedos

Desplazamiento μm	Voltaje de actuación V	Capacitancia (fF)
0.1	5.35	2.83490
0.2	7.41	2.83991
0.3	8.89	2.84025
0.6	11.77	2.85309
0.9	13.43	2.95147
1.2	14.37	2.96798
1.5	14.80	2.99088
1.65	14.85	3.02675

Tabla 2

Conclusiones



- En el desarrollo de este trabajo se creó e implementó un sistema de caracterización para el acelerómetro ADXL320 de Analog Devices. Dicho sistema se conformó de varias etapas que permiten al usuario la utilización y verificación de dicho sensor como un inclinómetro, hecho que posibilitó obtener la relación del valor de la inclinación a la cual está sometido el acelerómetro con respecto al valor de la aceleración del sensor, postulándolo así como un dispositivo de rango limitado en aplicaciones de aceleración para altas G's, pero que permite su utilización dentro del laboratorio como un dispositivo de prueba y análisis.

- También se diseñó e implementó un circuito de lectura para las diferencias capacitivas provenientes de un acelerómetro diseñado dentro del laboratorio de VLSI-SEES obedeciendo las reglas de diseño pactadas por la tecnología CMOS estándar de $0.5\mu\text{m}$. Debido al enfoque práctico, esta etapa se creó y optimizó considerando los valores de capacitores existente en el mercado para crear el puente capacitivo que fungiera como la estructura de variaciones capacitivas.

- Obedeciendo las reglas de diseño establecidas por la tecnología CMOS estándar de $0.5\mu\text{m}$, con base en las consideraciones electrostáticas teóricas y mediante la herramienta de simulación de elemento finito (COMSOL) se diseñaron las estructuras de prueba en forma de peine de dedos (en ingles, comb- fingers) como la configuración idónea para obtener un análisis detallado de la variación de la capacitancia con respecto a las variaciones geométricas del diseño.

¡GRACIAS!

