

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



“Diseño y análisis de un micromotor lineal
basado en tecnología CMOS-MEMS”

Ing. Andrea López Tapia

ASESORES:

Dr. Alfredo Reyes Barranca

Dra. Griselda Abarca Jiménez

CONTENIDO

- **Objetivo General**
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



OBJETIVO GENERAL

Diseñar un MEMS Micromotor lineal con desplazamiento en dos direcciones y el circuito de control para el mismo, además de tener todo el sistema en un solo sustrato (chip), el cual es posible fabricarlo con tecnología CMOS estándar de $0.5\mu\text{m}$.



CONTENIDO

- Objetivo General
- **Objetivos específicos**
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una estructura para configurar un micromotor lineal.
- Diseñar un circuito que sirva para monitorear el movimiento de la estructura, empleando un FGMOS.
- Diseñar un circuito electrónico para controlar el desplazamiento del micromotor.
- Integrar en un solo sustrato (monolítico) tanto el circuito electrónico como la estructura del micromotor.

CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- **Justificación**
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



JUSTIFICACIÓN

- Las familias de dispositivos MEMS conocida como micromotores, en específico micromotores lineales, no ha sido muy desarrollada.
- Un diseño de micromotor con mayor libertad de desplazamiento para poder ser aplicado a una mayor cantidad de sistemas mecánicos.
- Se elimina la fricción (presente en otros diseños) entre la pieza móvil y las capas inferiores, y por lo tanto el desgaste por fricción.
- Se tendrá en el mismo sustrato tanto el circuito electrónico como la estructura mecánica.
- Otra aportación de este diseño es obtener experiencia y conocimientos acerca de dispositivos MEMS como sistemas de actuación (micromotores) dentro del Grupo de Sistemas VLSI de la SEES, así como ampliar horizontes para potenciales aplicaciones.



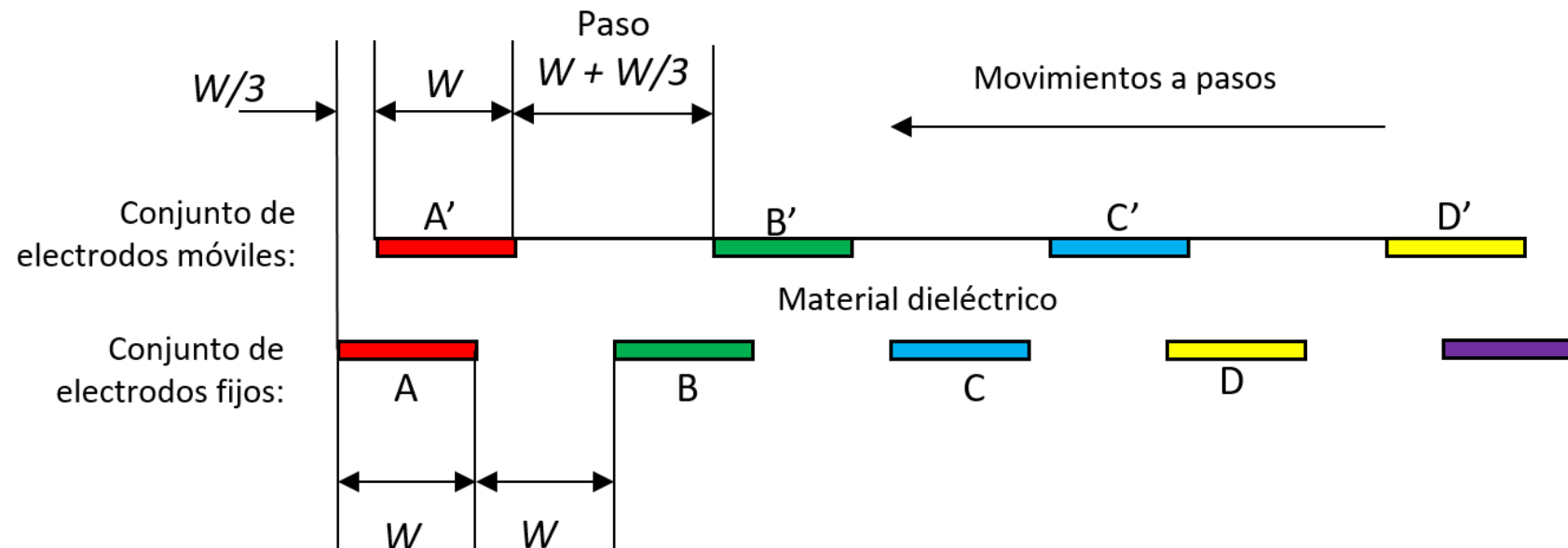
CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- **Introducción**
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



INTRODUCCIÓN

- El micromotor lineal es un actuador ,es decir ,un dispositivo mecánico para mover algo.
- Las fuerzas de accionamiento para micromotores son primordialmente fuerzas electrostáticas (que se basan en la atracción de cargas). La fuerza tangencial generada en pares de placas eléctricamente energizadas, proporciona el movimiento requerido.



El micromotor lineal diseñado consiste en :

- Una estructura mecánica que soporta al sistema de actuación en conjunto con los electrodos fijos.
- Un sensor de posición del micromotor utilizando un FGMOS.
- Un circuito de control para el desplazamiento del micromotor.

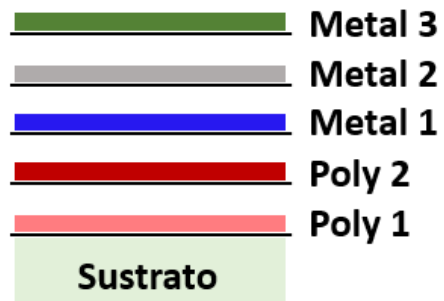
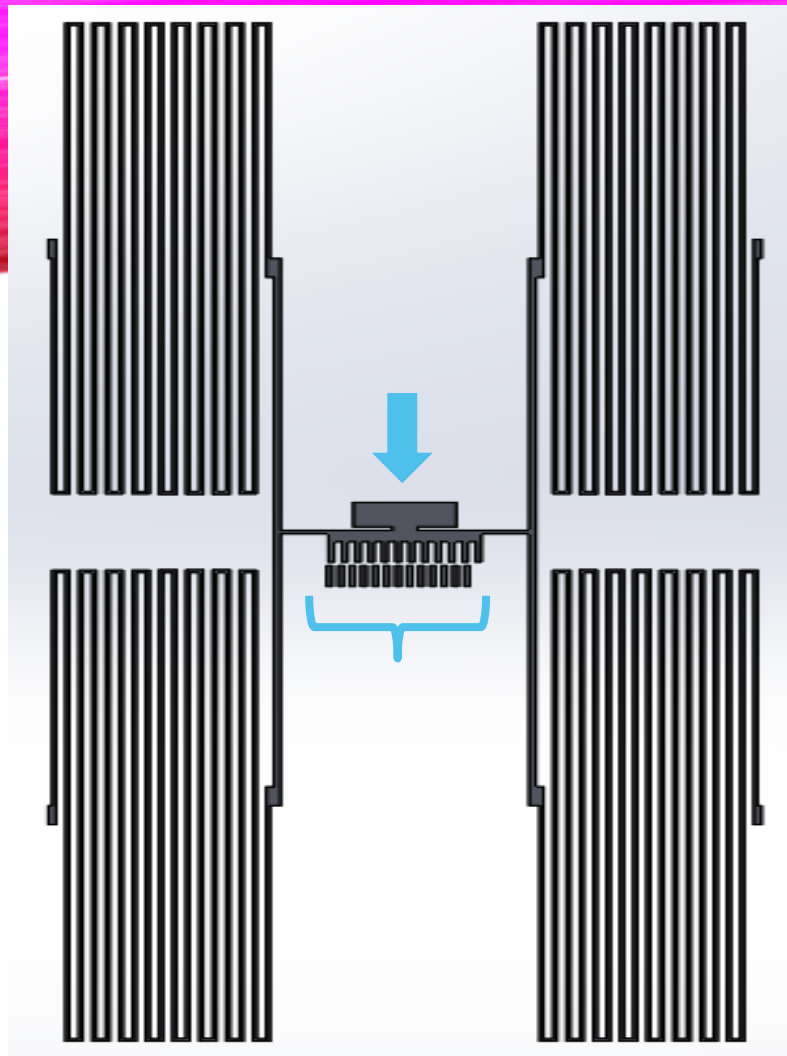
Integrado todo en un solo chip y basándose en la fabricación de la tecnología CMOS estándar de $0.5\mu\text{m}$.

CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- **Estructura**
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



ESTRUCTURA



- El micromotor consiste en cuatro resortes que soportan a los electrodos móviles para la actuación electrostática y a una de las placas para el sensor de posición, además de electrodos fijos.
- Proceso de micromaquinado superficial.
- Su construcción se hace en la capa de Metal 1.



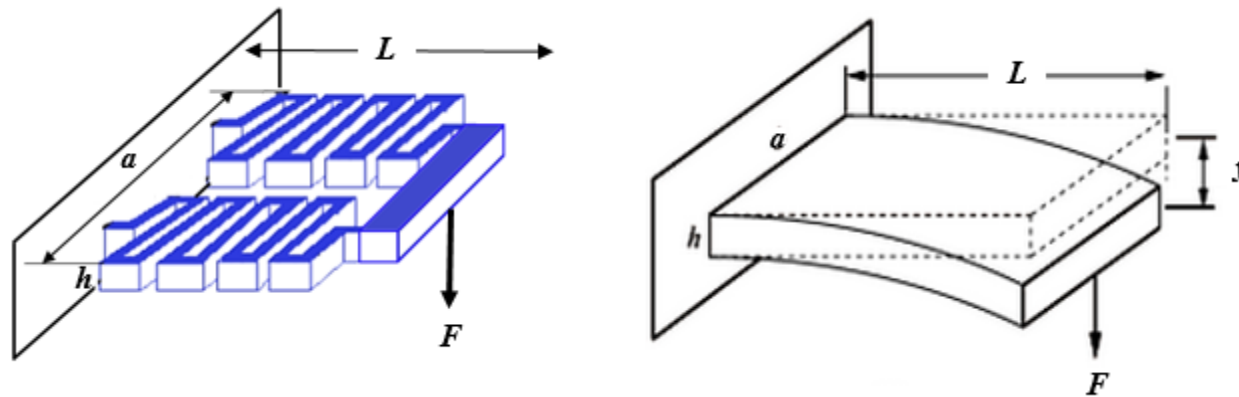
CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - **Deflexión de resortes**
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



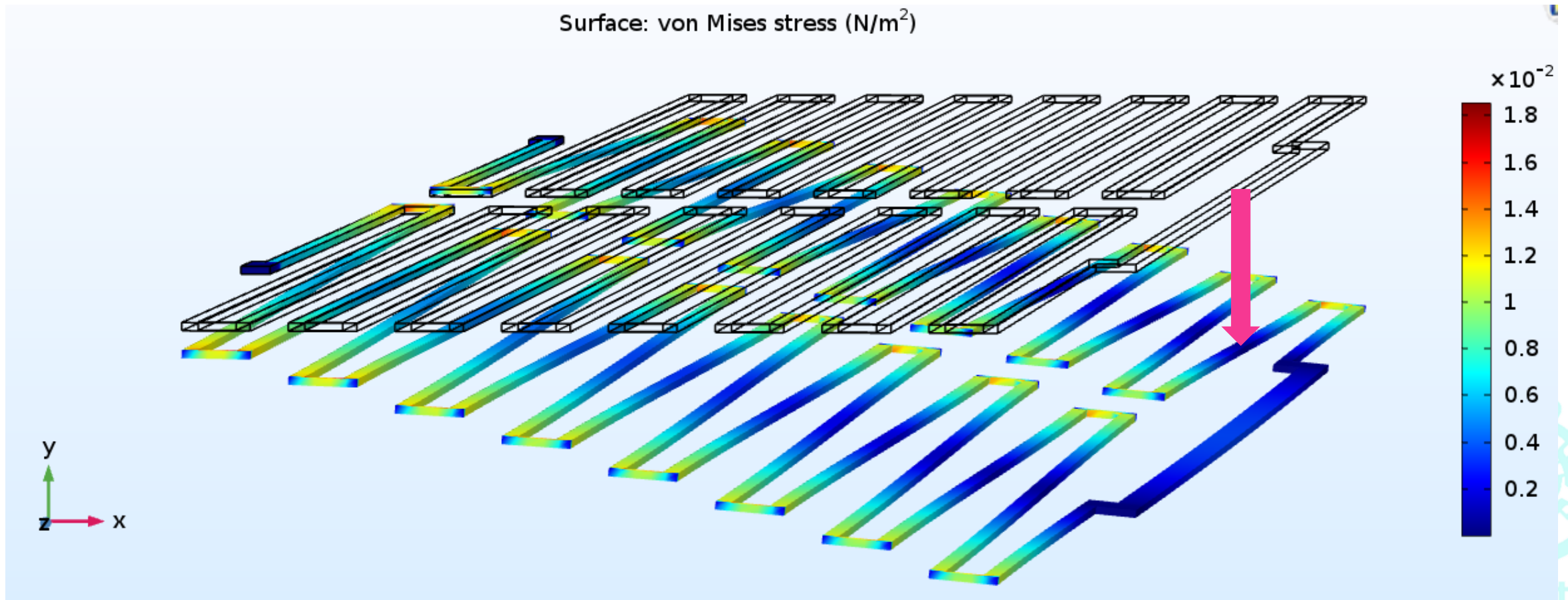
DEFLEXIÓN DE LOS RESORTES

- Considerando que el par de resortes es idealmente una barra uniforme empotrada en un extremo, y que carga la mitad del peso de la estructura móvil del motor en el otro extremo, entonces se puede idealizar como una barra en cantiléver.
- El desplazamiento total en el eje y está dado por $y = 2.9 \times 10^{-12} \mu m$



SIMULACIÓN DE DEFLEXIÓN

- Deflexión en el eje y obtenida por la simulación: $y = 1.08 \times 10^{-7} \mu m$



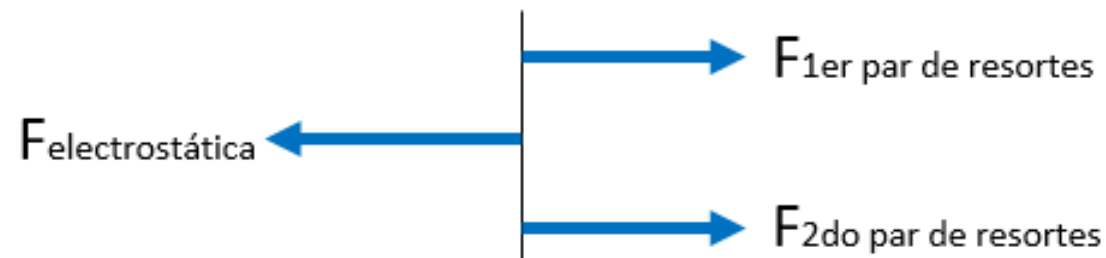
CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - **Fuerza electrostática**
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



FUERZA ELECTROSTÁTICA

- La fuerza electrostática necesaria para poder desplazar toda la estructura debe contrarrestar a las fuerzas que se oponen al movimiento, las cuales son la suma de las fuerzas requeridas para desplazar cada par de resortes.

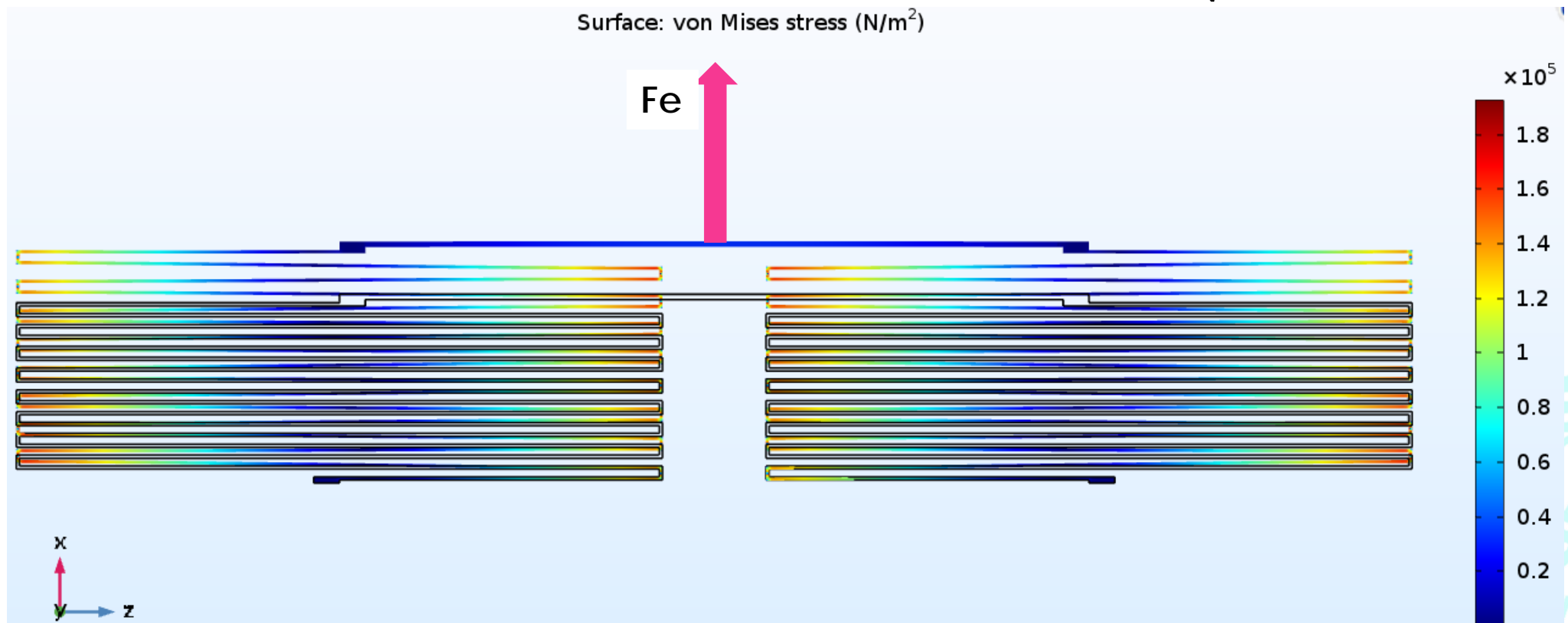


- Para obtener la fuerza de los resortes, se calcula la constante de rigidez del resorte de cada par y se considera que se desplazarán el valor de un paso ($0.6\mu\text{m}$).

SIMULACIÓN APLICANDO LA FUERZA

- Aplicando el valor de la fuerza, se obtiene un desplazamiento (el valor de cada paso) del par de resortes en la simulación de:

$$x = 0.612 \mu m$$



CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - **Voltaje del micromotor**
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



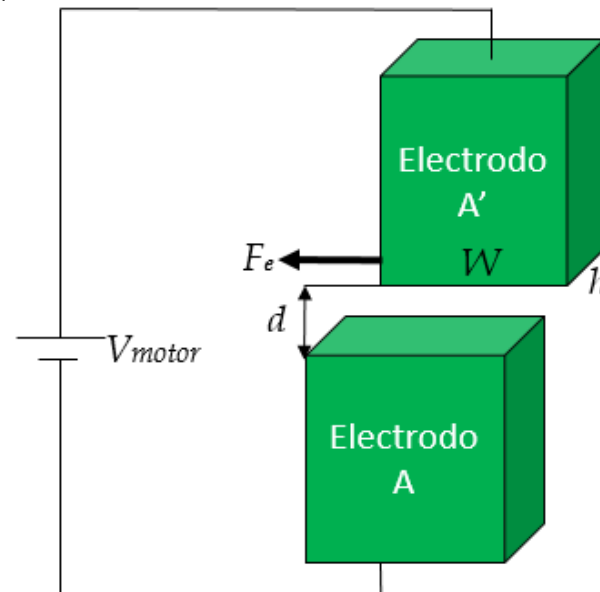
VOLTAJE REQUERIDO PARA EL MICROMOTOR

Considerando:

- el valor de la fuerza total requerida para desplazar a los resortes (F_k)
- la separación entre electrodos (d)
- el espesor de los electrodos (h)
- la fuerza eléctrica (F_e) entre dos electrodos que se comportan como dos placas paralelas

Se obtiene el valor del voltaje.

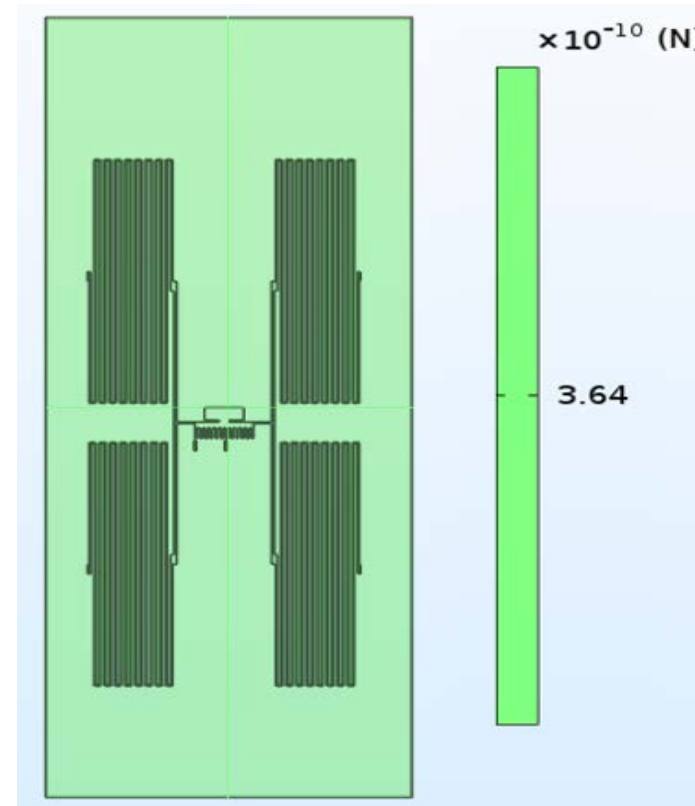
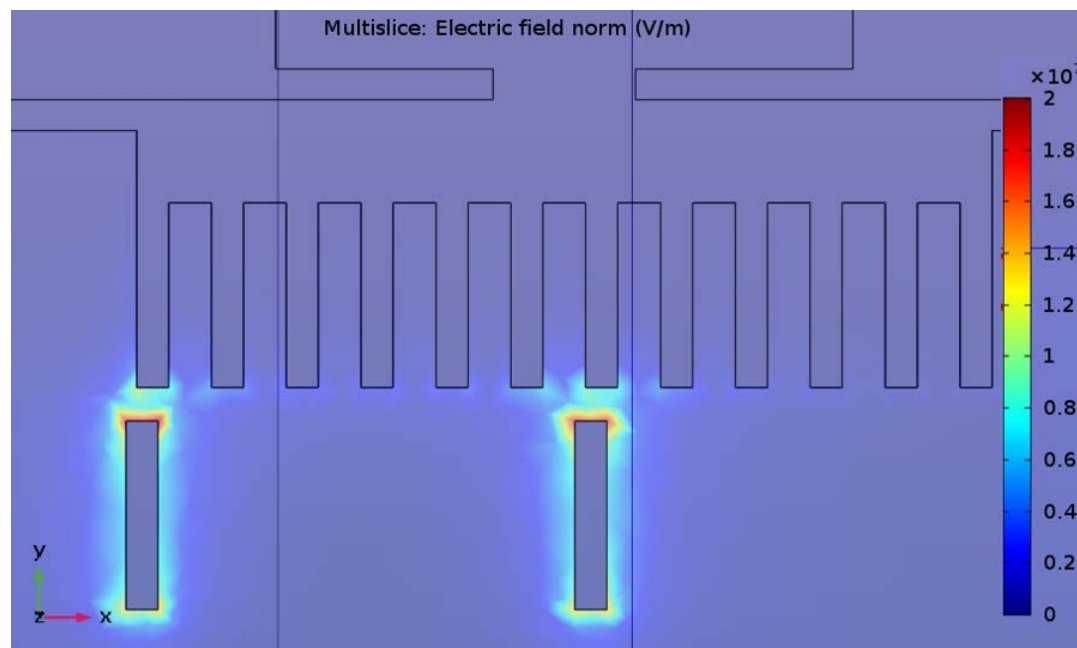
$$F_{ktot} = F_k + F_k = 2k\delta \quad F_e = n \frac{1}{2} \frac{\epsilon h}{d} V^2$$



$$V_{motor} = \sqrt{\frac{2d \cdot F_{ktot}}{n\epsilon h}} = \mathbf{16V}$$

SIMULACIÓN APLICANDO EL VOLTAJE EN LOS ELECTRODOS

- Aplicando el valor del voltaje (V_{motor}), se genera una fuerza electrostática en la simulación de: $F_e = 364\text{pN}$ $F_{\text{ktot}} = 371.6\text{pN}$



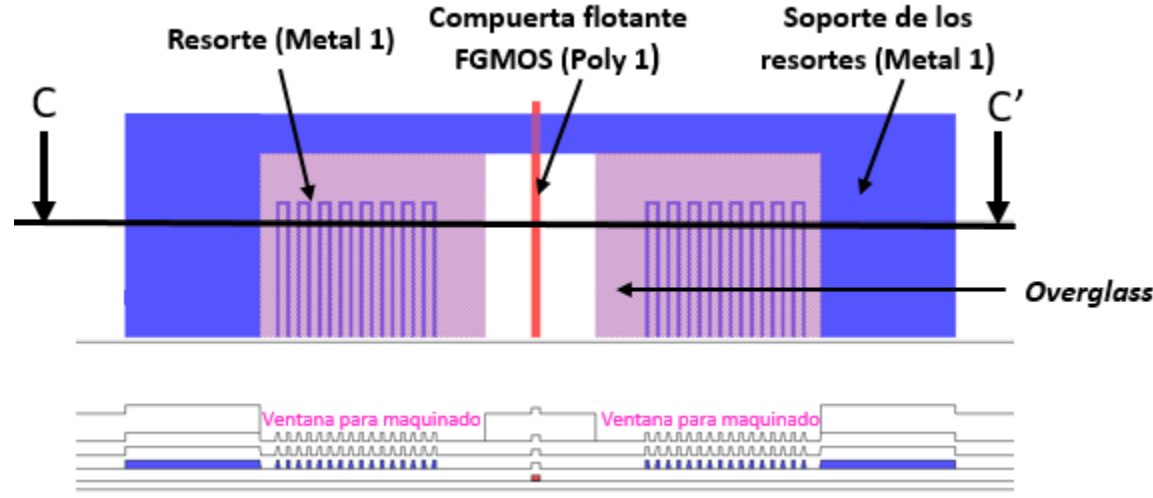
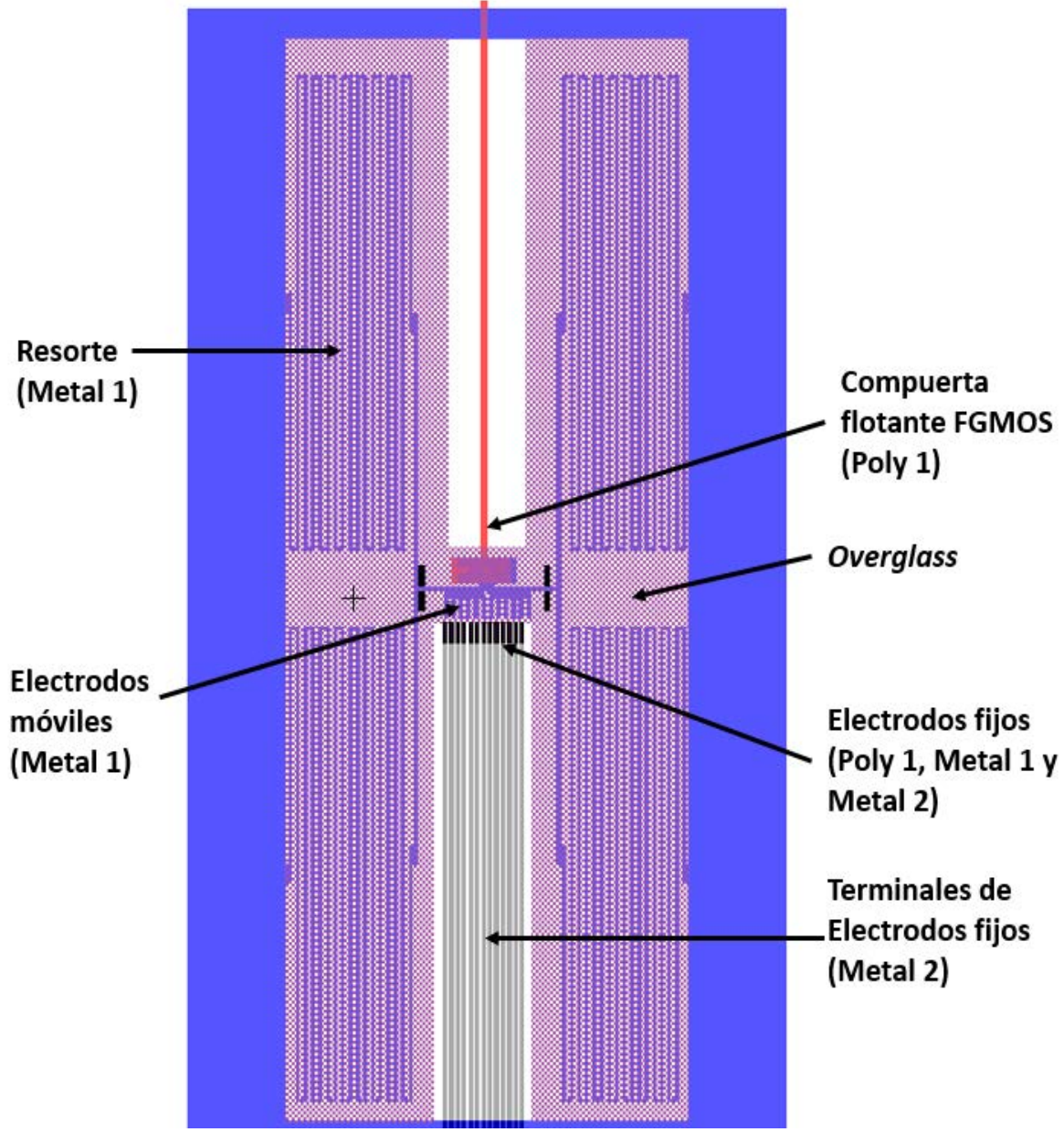
CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - **Parámetros finales**
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



PARÁMETROS FINALES DE LOS RESORTES

PARÁMETRO	VALOR
Espeor de metal 1 (h)	0.64 μm
Módulo de Young Metal 1 (E1)	70 GPa
Número de vigas(N)	16
Ancho de una viga (w)	1.2 μm
Largo de una viga (Lv)	250 μm
Largo de la unión (Lu)	3 μm
Ancho de un electrodo (W)	1.8 μm
Paso del motor($W/3=\delta$)	0.6 μm
Separación entre placas (d)	1.95 μm
Número de resortes en paralelo (P)	2
Número de electrodos activados (n)	2

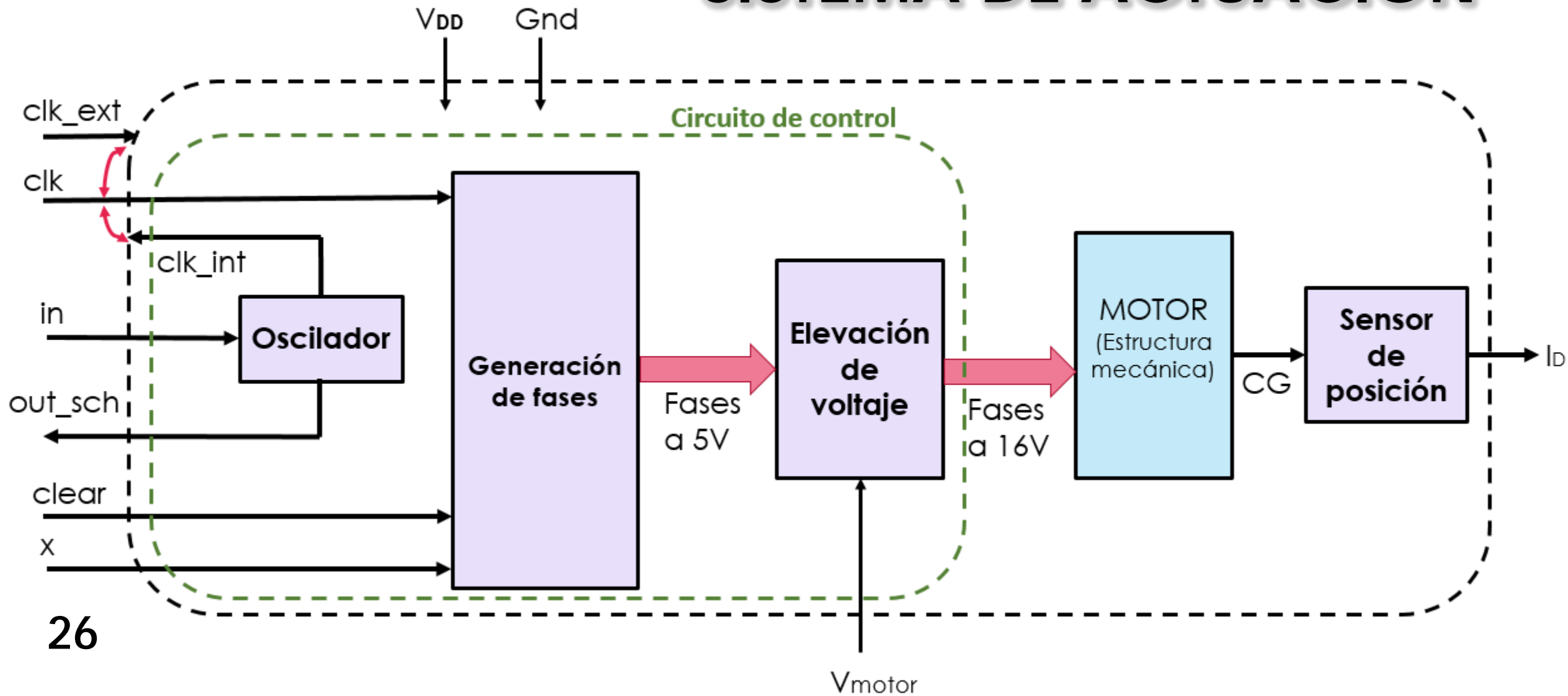


CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



SISTEMA DE ACTUACIÓN



CONTENIDO

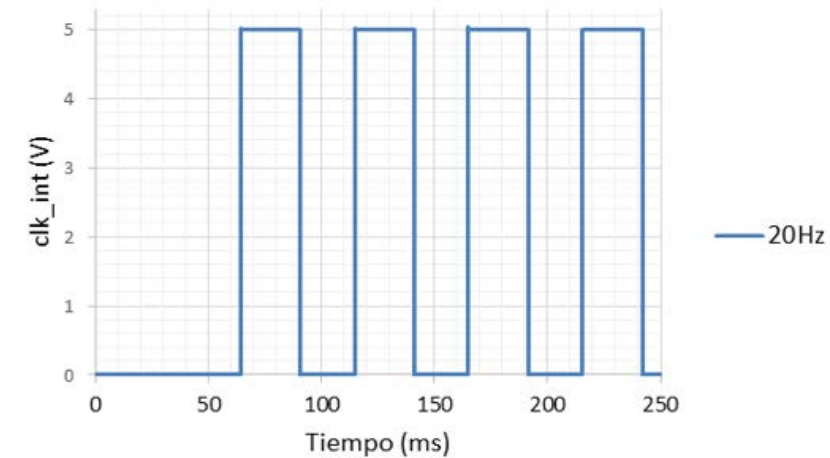
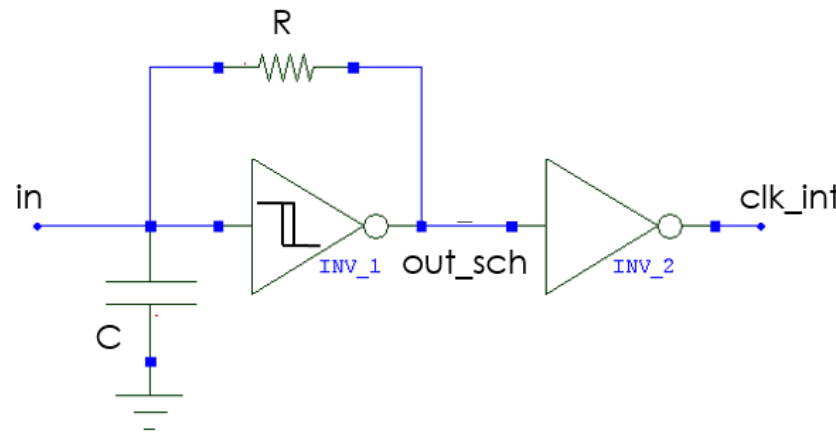
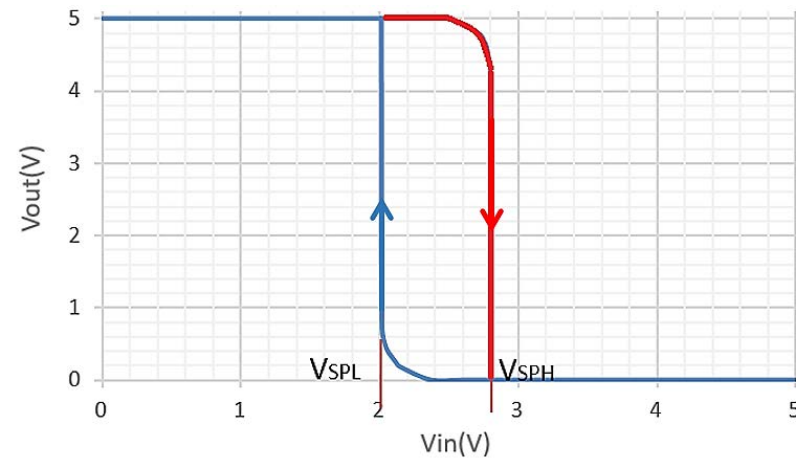
- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - **Circuito de control**
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



OSCILADOR

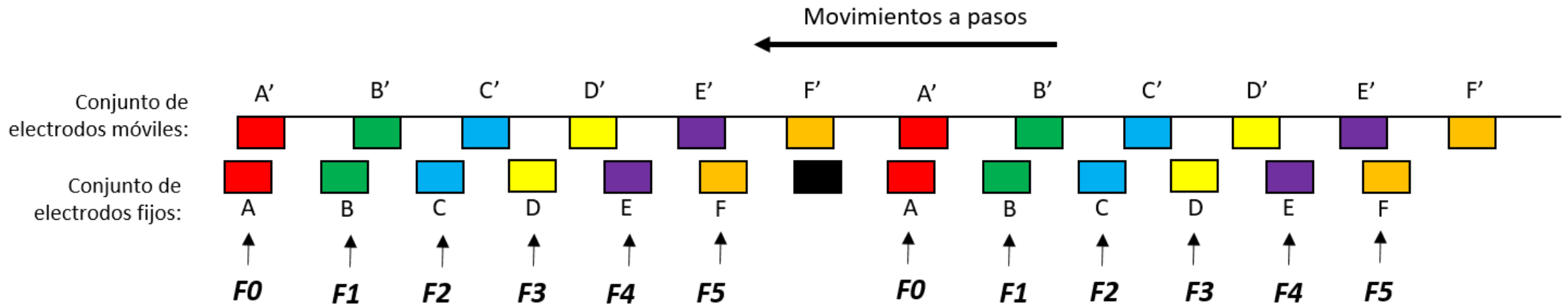
En un oscilador con Schmitt trigger, el valor de su frecuencia de oscilación depende de los voltajes de conmutación superior e inferior, en el caso del oscilador de la librería de Tanner se tiene:

$$f_{osc} = \frac{1}{RC \left[\ln \frac{V_{SPH}}{V_{SPL}} + \ln \frac{VDD - V_{SPL}}{VDD - V_{SPH}} \right]} = \frac{1}{0.646 RC}$$

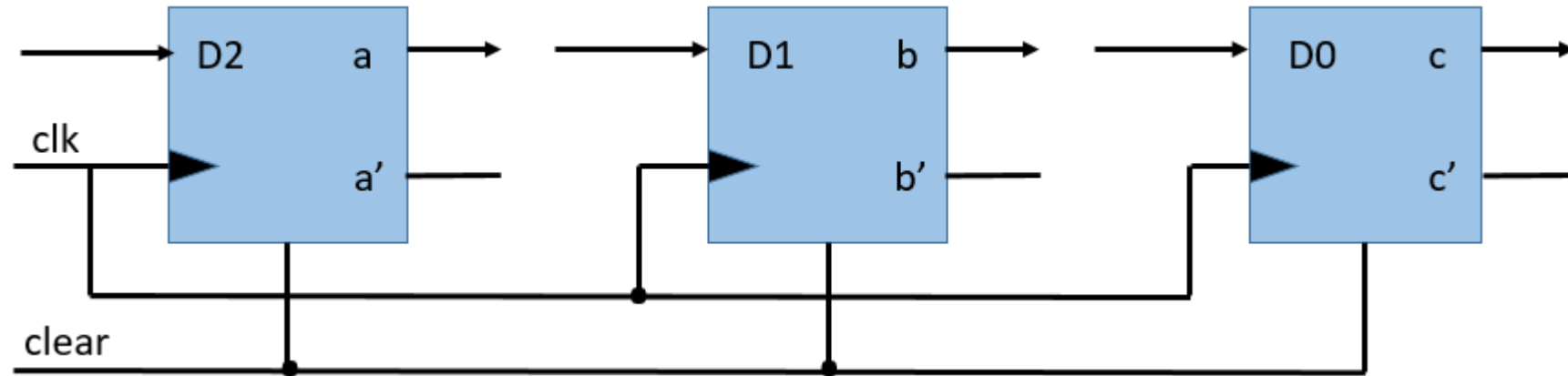


CONTADOR ASCENDENTE Y DESCENDENTE

Se requiere un contador ascendente para llevar una cuenta desde F0 a F5, y un contador descendente para una cuenta de F5-F0.



Dicho contador está constituido por 3 Flip-Flops tipo D y circuito combinatorio.



$$D_{2A} = a + bc$$

$$D_{1A} = a'b'c + bc'$$

$$D_{0A} = a + c'$$

$$D_{2D} = ac$$

$$D_{1D} = bc + ac'$$

$$D_{0D} = ac' + bc'$$

$$D_2 = x'D_{2A} + xD_{2D}$$

$$D_1 = x'D_{1A} + xD_{1D}$$

$$D_0 = x'D_{0A} + xD_{0D}$$

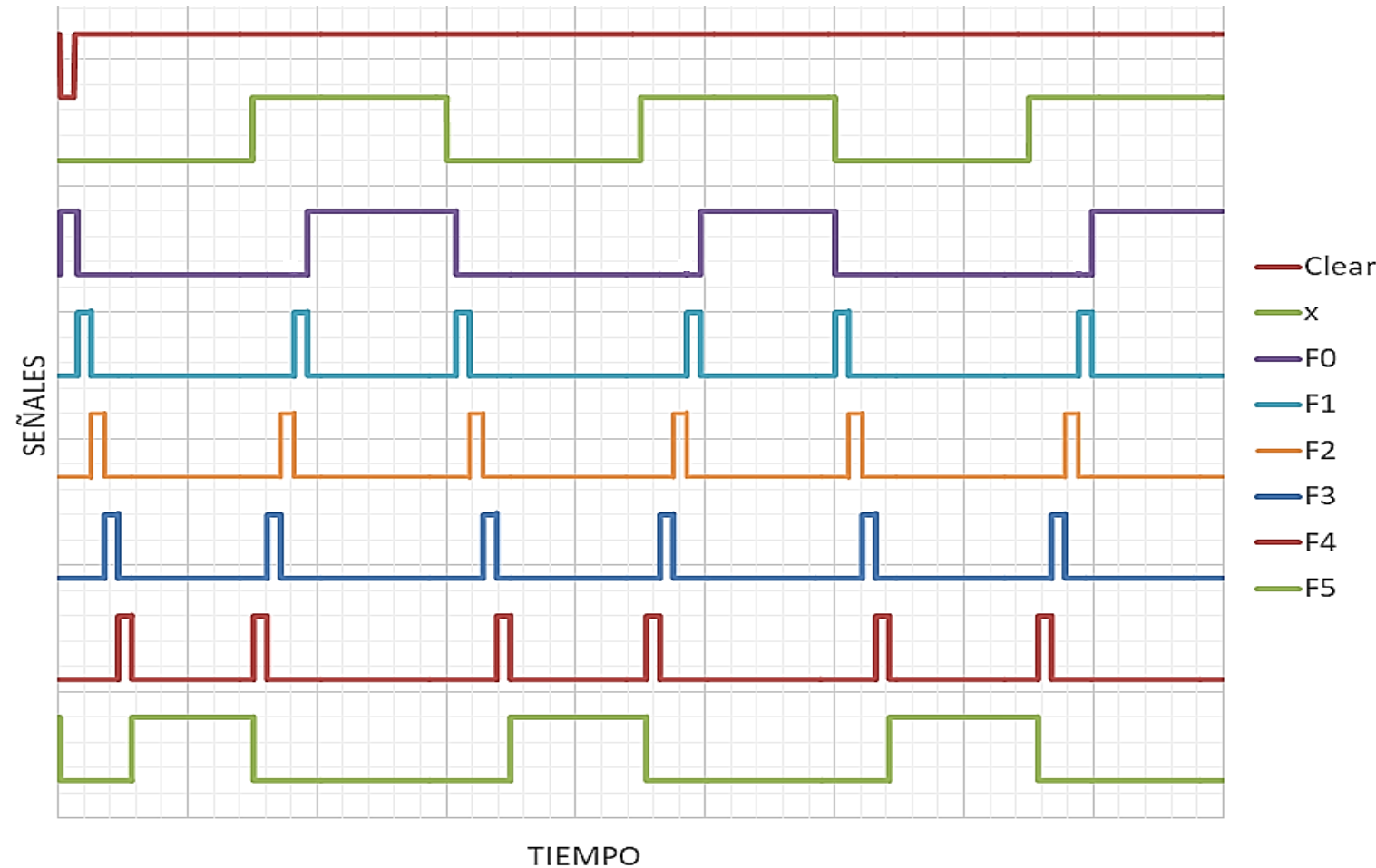
CIRCUITO COMBINATORIO

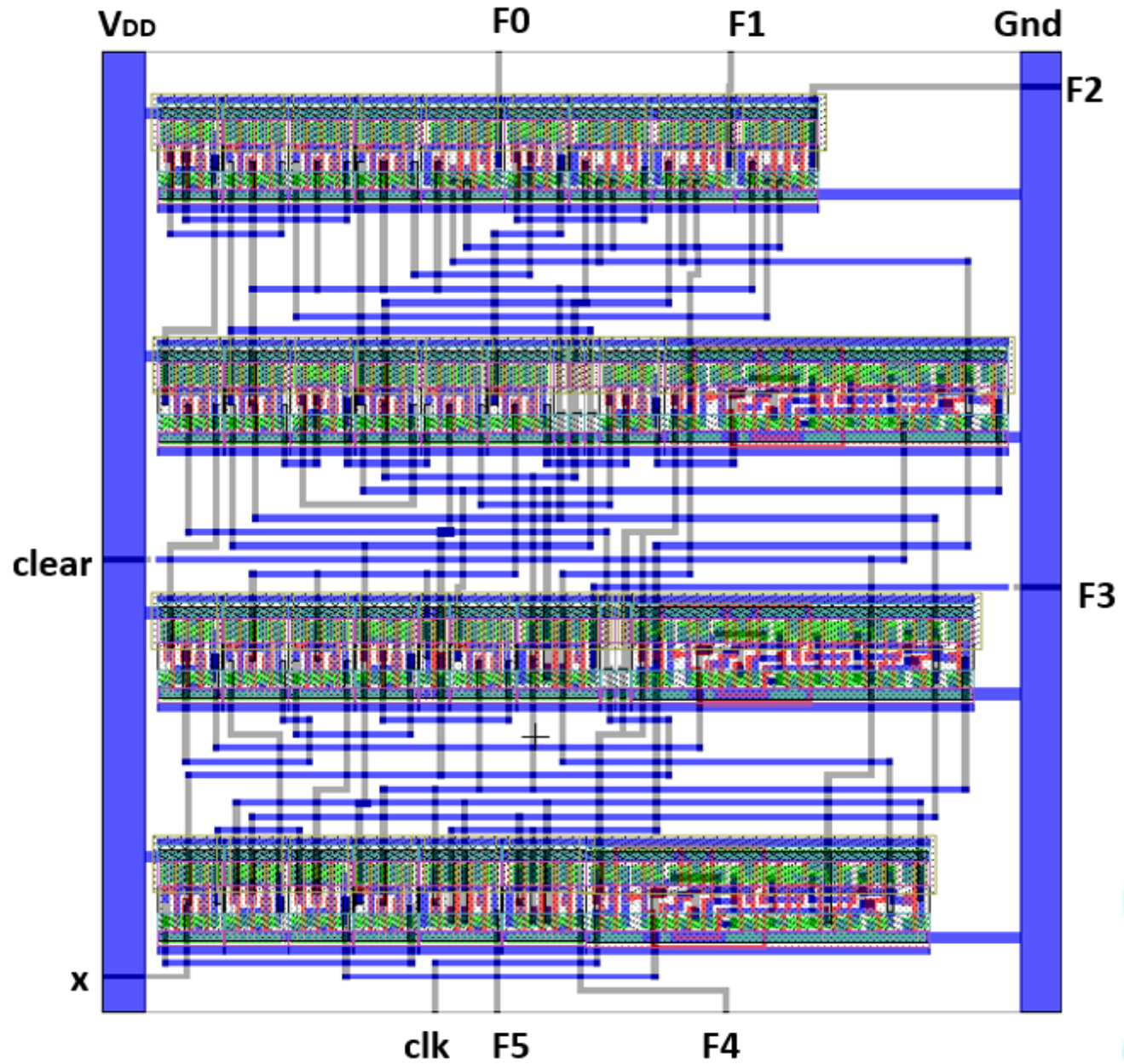
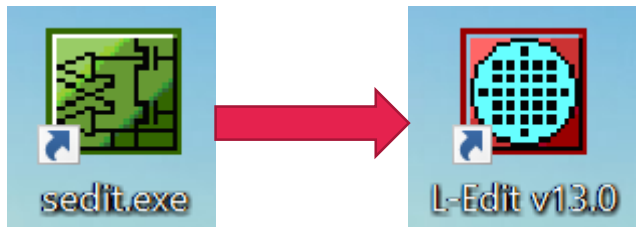
- Para cada cuenta se tiene una fase, es decir cuando la cuenta está en 0, corresponde la fase F0.

$$F0 = a'b'c' \quad F3 = a'bc$$

$$F1 = a'b'c \quad F4 = ab'c'$$

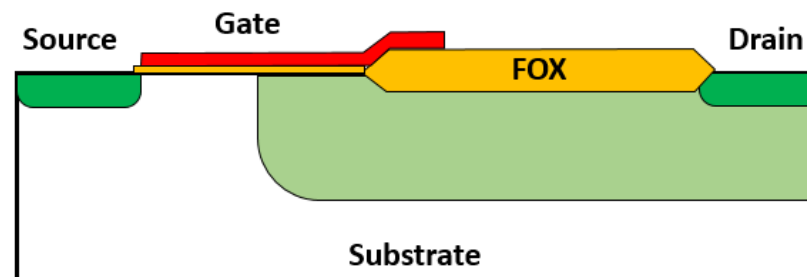
$$F2 = a'bc' \quad F5 = abc$$

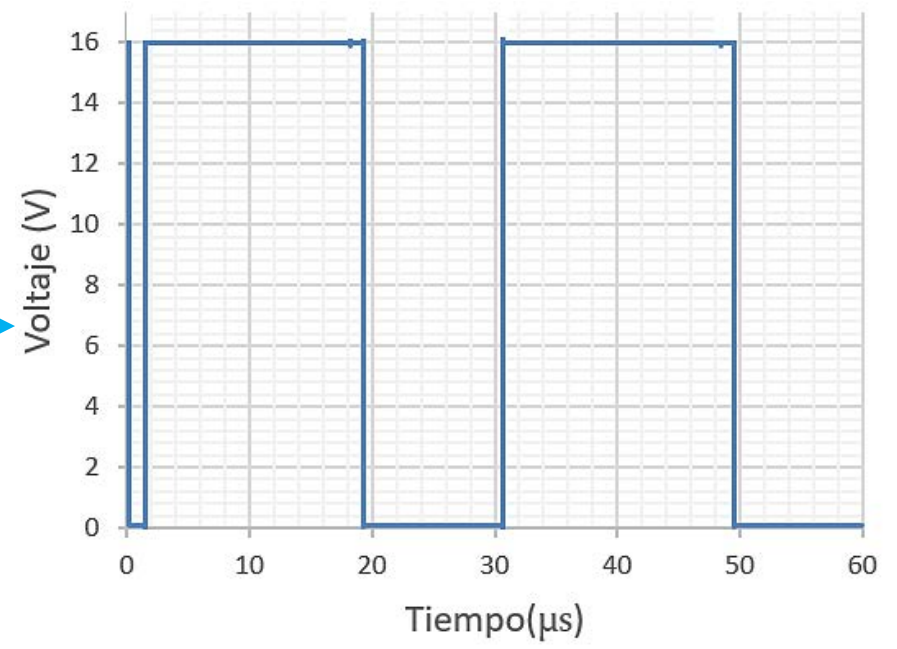
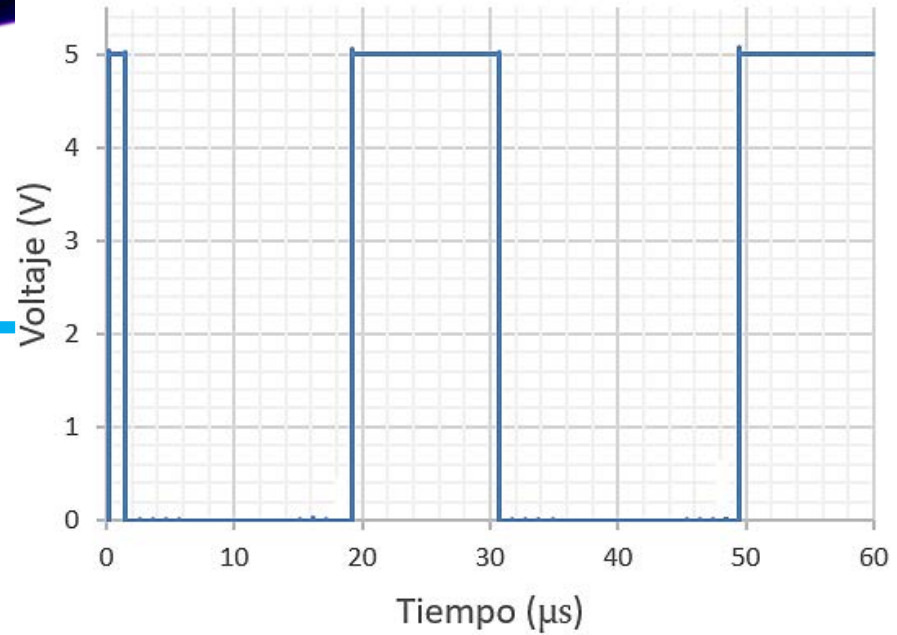
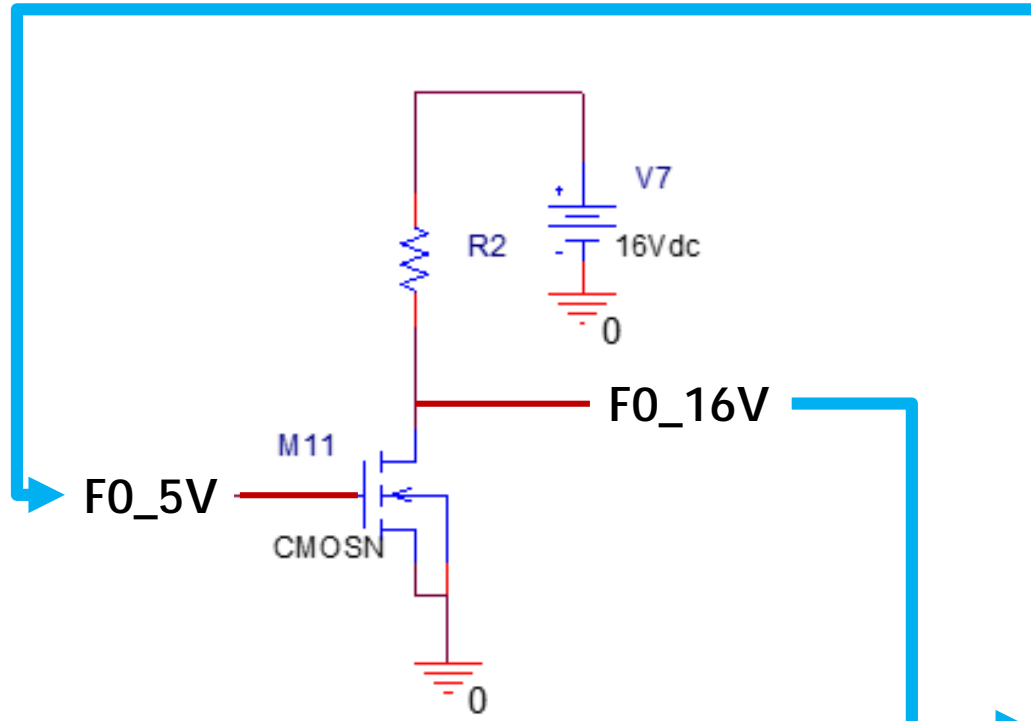




ELEVACIÓN DE VOLTAJE

- Debido a que las fases están en niveles lógicos de 0V-5V, y que se requieren 16V para alimentar los electrodos del motor, es necesario utilizar una etapa para elevar el voltaje.
- Debido al riesgo de ruptura por el alto voltaje que será aplicado al transistor, se utiliza un transistor MOS de drenador extendido (XDMOS) que se caracteriza por tener un Pozo N debajo del drenador.





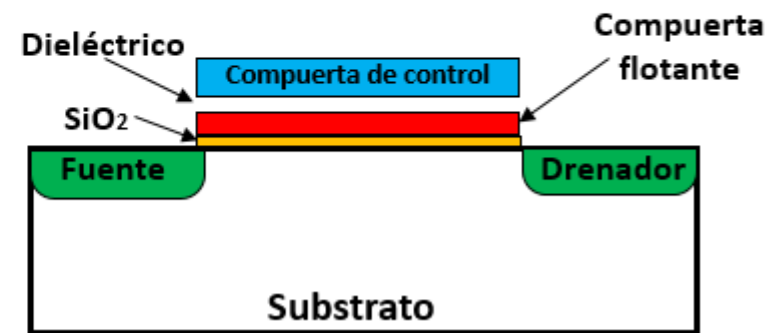
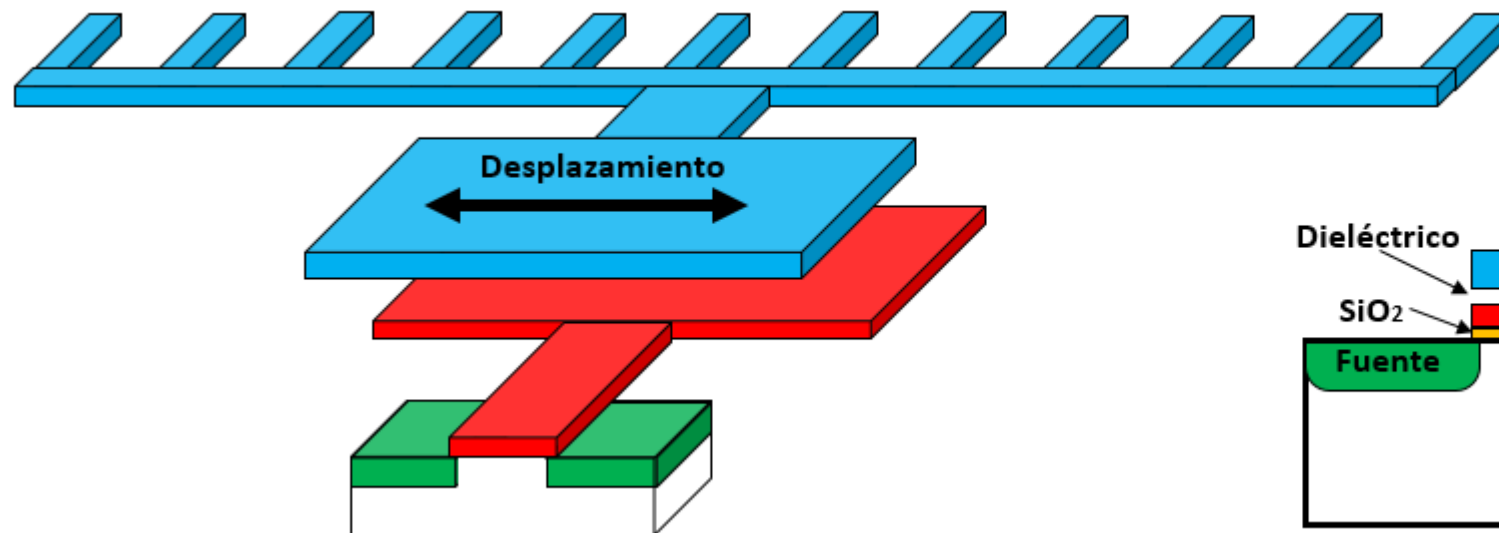
CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - **Sensor de posición**
- Conexiones finales
- Conclusiones
- Trabajo a futuro

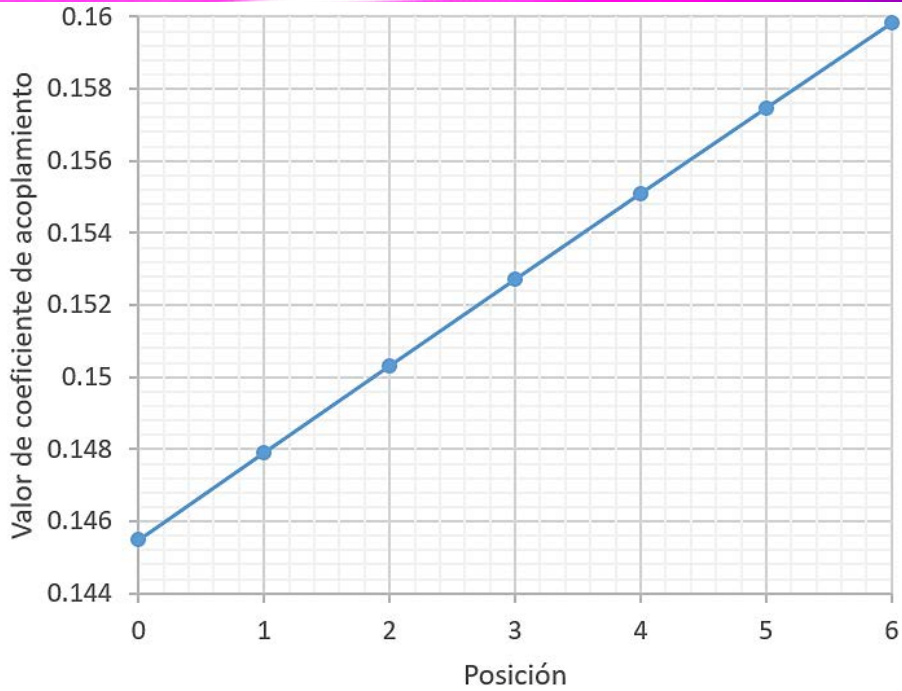


SENSOR DE POSICIÓN

El sensor está compuesto por un FGMOS, el cual se forma con la compuerta de control (constituida por la masa y electrodos móviles) que tiene desplazamiento a los lados, la compuerta flotante que permanece fija y finalmente drenador y fuente.

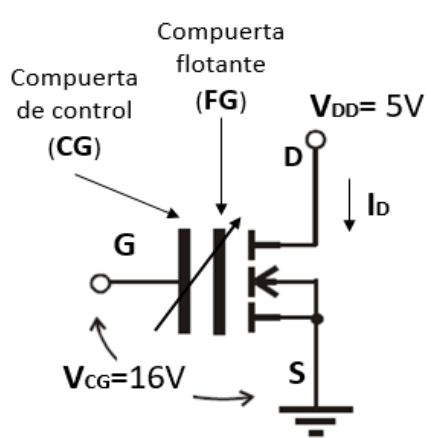


MEDICIONES

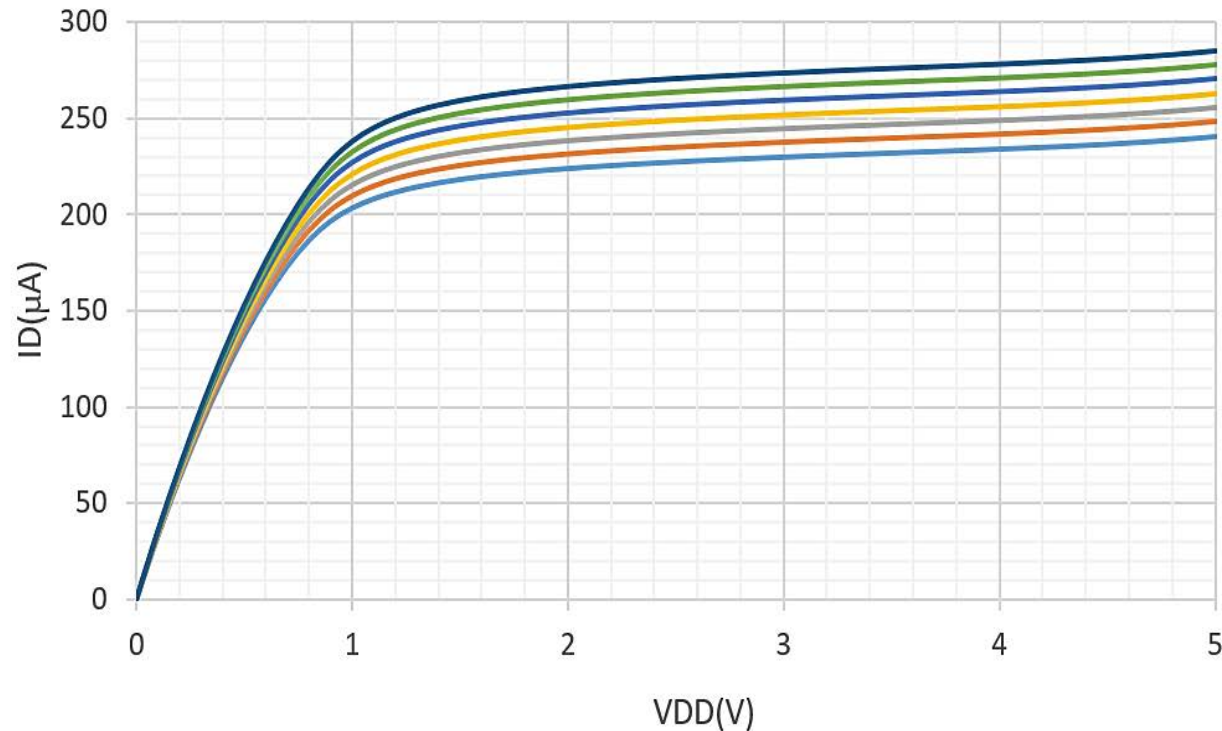


—●— KCG

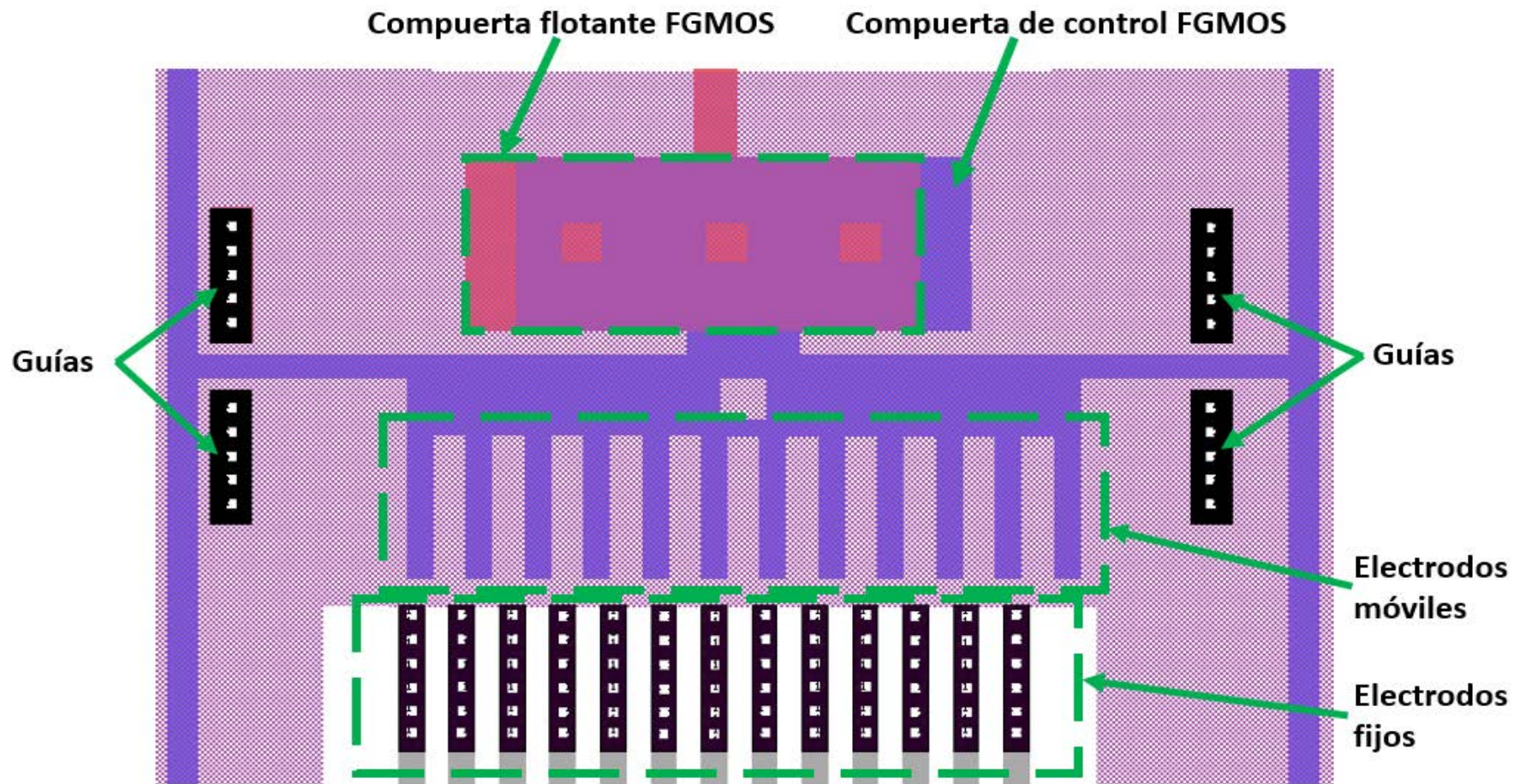
$$K_{CG} = \frac{C_G}{C_G + C_D + C_S + C_{OX} + C_{Poly}}$$



ID(μA)
240.54
248.04
255.52
262.99
270.44
277.88
285.29



- CG=7.164fF
- CG=7.304fF
- CG=7.444fF
- CG=7.584fF
- CG=7.724fF
- CG=7.864fF
- CG=8.004fF

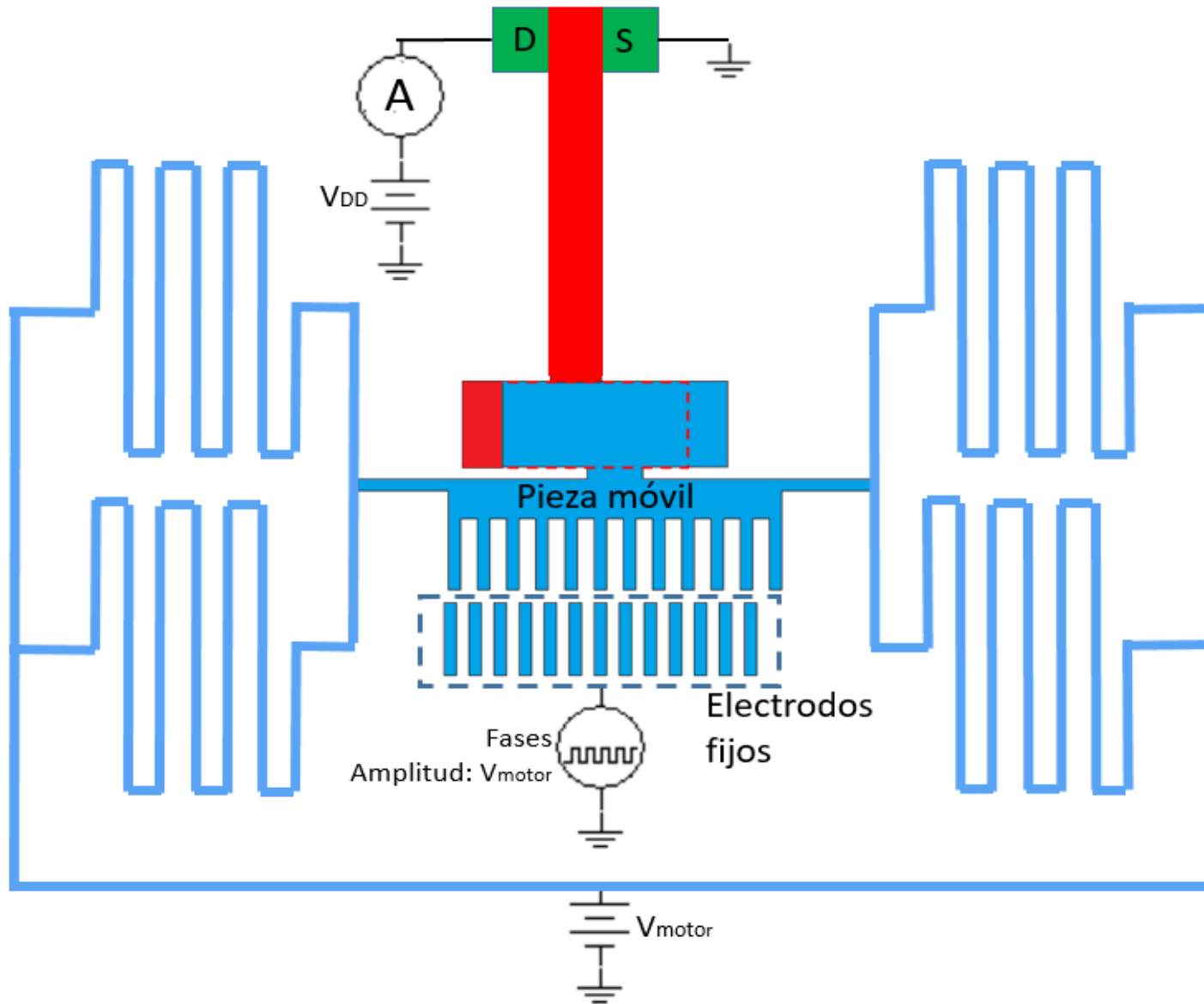


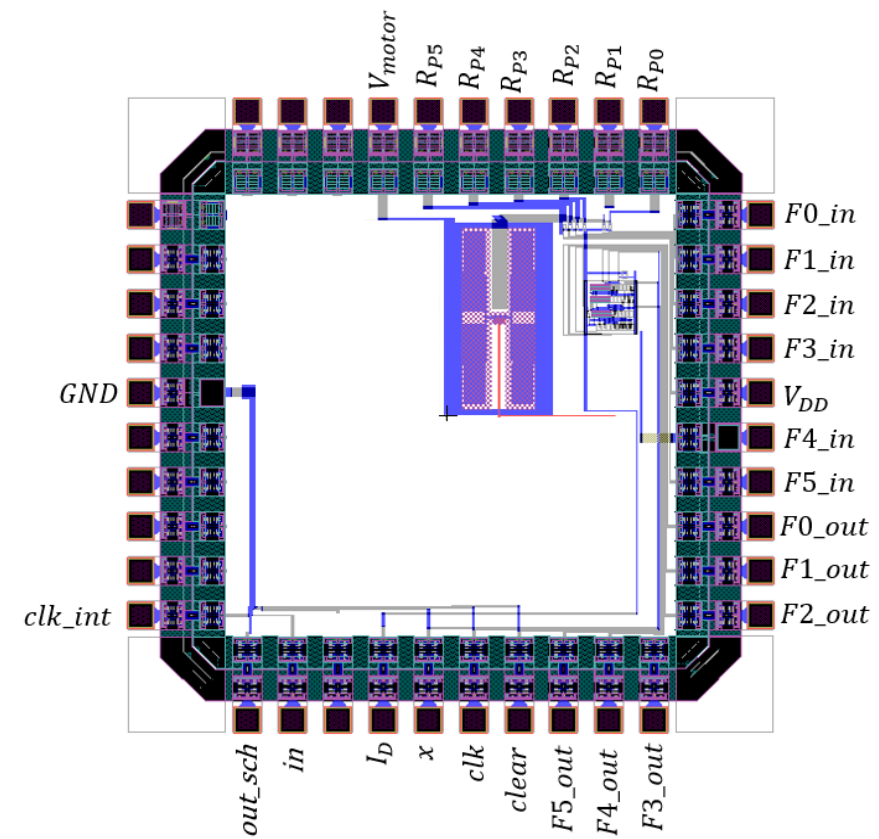
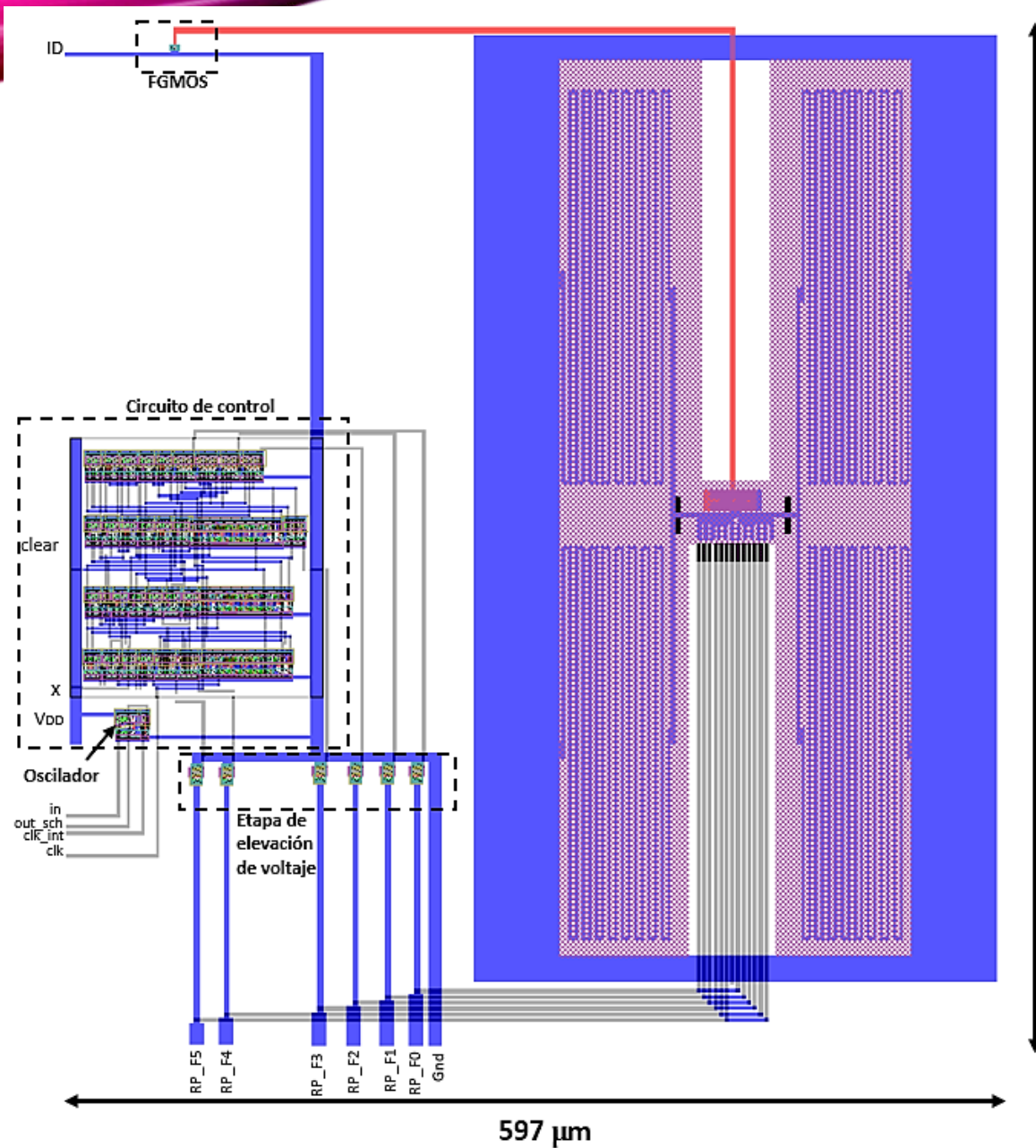
CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- **Conexiones finales**
- Conclusiones
- Trabajo a futuro



CONEXIONES FINALES





CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- **Conclusiones**
- Trabajo a futuro



CONCLUSIONES

- La estructura tiene suficiente rigidez como para no deformarse de manera que afecte el funcionamiento del micromotor.
- El circuito de control tendrá un amplio rango de frecuencias de trabajo, debido al oscilador externo y al oscilador interno que se puede configurar, lo cual permite hacer diferentes pruebas cuando se tenga el chip fabricado.
- Es posible obtener una medición perceptible de la posición del micromotor empleando un FGMOS como sensor.
- Se logró integrar un dispositivo MEMS con el circuito de control y el sensor en el mismo lo sustrato, utilizando las mismas reglas de diseño de la tecnología CMOS de 0.5 micras de On semiconductor.
- Se implementó exitosamente un MOSFET de drenador extendido para la elevación de voltaje.
- Se realizó el diseño topológico del circuito de control con la ayuda del software S-Edit vinculado con L-Edit.

CONTENIDO

- Objetivo General
- Objetivos específicos
- Justificación
- Introducción
- Estructura
 - Deflexión de resortes
 - Fuerza electrostática
 - Voltaje del micromotor
 - Parámetros finales
- Sistema de actuación
 - Circuito de control
 - Sensor de posición
- Conexiones finales
- Conclusiones
- **Trabajo a futuro**



TRABAJO A FUTURO

- Aumentar el número de electrodos para disminuir el voltaje requerido para mover el motor.
- Modificar la geometría de los electrodos para tener un mejor desempeño.
- Utilizar más capas para crear la estructura de los electrodos.
- Optimización de los resortes de la estructura con diferentes diseños para disminuir el área que ocupan.
- Acondicionar al motor para mover cargas (pesos) y utilizarlo en sistemas mecánicos más complejos.
- Realizar pruebas a diferentes frecuencias de oscilación, para obtener el mejor comportamiento del motor, es decir, que la estructura mecánica responda de manera adecuada a las señales aplicadas.
- Fabricar el *chip*, posteriormente realizar el micromaquinado para liberar la estructura móvil y someterlo a pruebas para verificar su funcionamiento.

**GRACIAS POR
SU ATENCIÓN**



Cinvestav