

Cinvestav

**Centro de Investigación y de Estudios
Avanzados del Instituto Politécnico Nacional**

Ingeniería Eléctrica
Sección de Electrónica del Estado Sólido



DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN MICROMOTOR ANGULAR BASADO EN TECNOLOGÍA CMOS-MEMS

Ing. Luis Sánchez Márquez

Asesores

Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca

Dra. Griselda Stephany Abarca Jiménez

CONTENIDO

1. OBJETIVO
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

CONTENIDO

1. OBJETIVOS

2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

OBJETIVO

Diseñar y simular un micromotor electrostático rotatorio compatible con la tecnología CMOS de $0.5\mu\text{m}$. Así mismo, proponer y realizar un diseño semicustom de un circuito de control de sentido de giro a nivel de compuertas lógicas. La velocidad de giro del motor podrá ser determinada usando un transistor de compuerta flotante (FGMOS) como principal elemento

OBJETIVOS PARTICULARES

- Diseñar la estructura del micromotor usando las capas disponibles en la tecnología On-Semi de $0.5\mu\text{m}$
- Simular el comportamiento de la estructura desde el punto de vista electromecánico
- Diseñar y simular un circuito de control de sentido de giro a nivel de compuertas lógicas.
- Diseñar un sistema de sensado de velocidad basado en FGMOS.
- Implementar el diseño topológico del circuito de control, del micromotor y del sistema de sensado
- Integrar la microestructura, el circuito de control y de sensado dentro del mismo chip.

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
- 2. JUSTIFICACIÓN**
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

JUSTIFICACIÓN

El grupo de investigación del laboratorio de VLSI de la SEES Cinvestav-Zacatenco tiene experiencia trabajando con sistemas micro electro mecánicos (MEMS) empleados como sensores; sin embargo, poco se ha trabajado con micro actuadores, razón por la cual este trabajo busca aportar nuevos conocimientos y experiencia en el campo de la actuación de MEMS.

JUSTIFICACIÓN

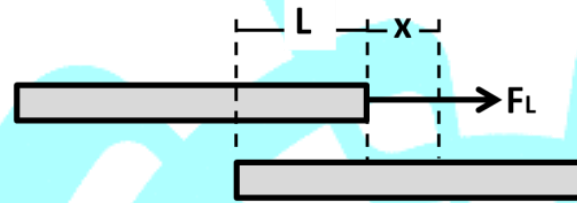
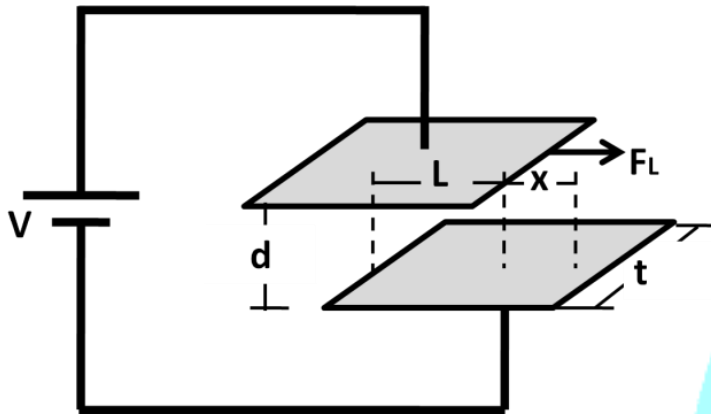
Otra área de gran experiencia e interés del grupo de VLSI es la de los transistores de compuerta flotante (FGMOS), por lo cual se busca aplicar este dispositivo como principal elemento para determinar la velocidad de giro del micromotor

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
- 3. ACTUACIÓN CAPACITIVA**
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

ACTUACIÓN CAPACITIVA

Capacitor longitudinal



$$F_L = \epsilon \frac{t}{2d} V^2$$

Donde

d : separación entre las placas (gap)

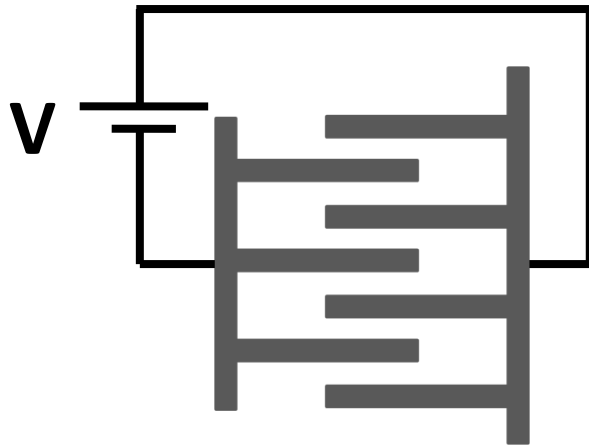
V : voltaje de control

t : largo de las placas

ϵ : permitividad del dieléctrico

ACTUACIÓN CAPACITIVA

Capacitor longitudinal con N traslapes



Capacitor longitudinal
con seis traslapes
(Estructura tipo peine)

$$F_L = N\varepsilon \frac{t}{2d} V^2$$

Donde

d: separación entre las placas (gap)

V: voltaje de control

t : largo de las placas

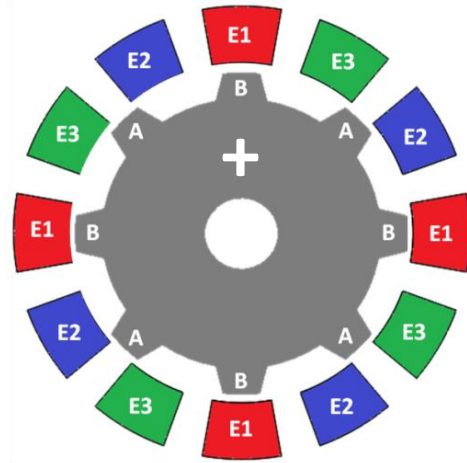
ε : permitividad del dieléctrico

N: número de traslapes

CONTENIDO

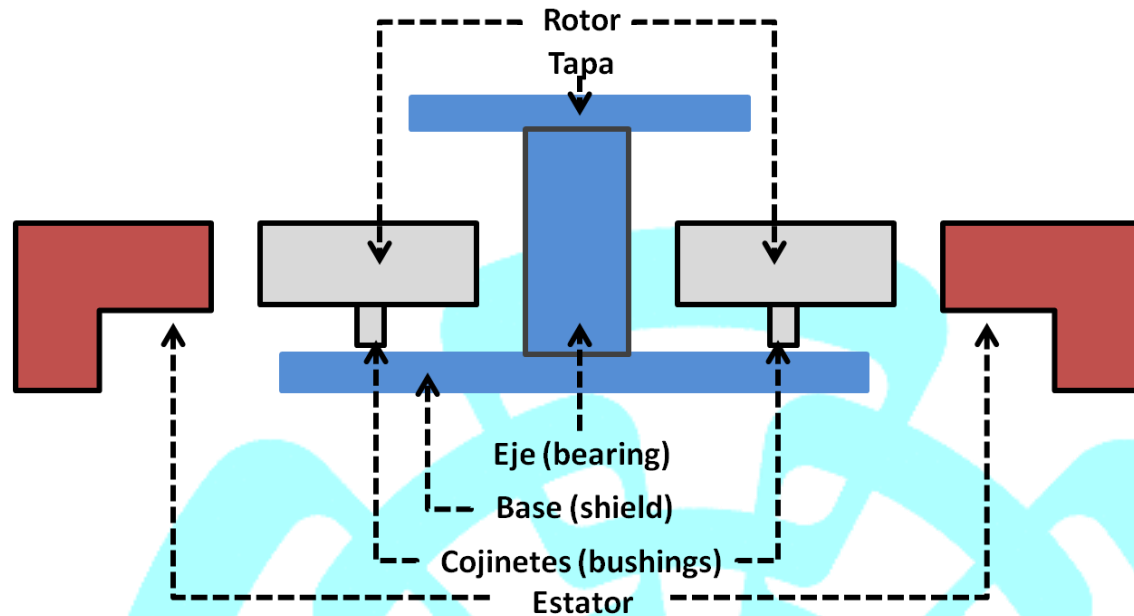
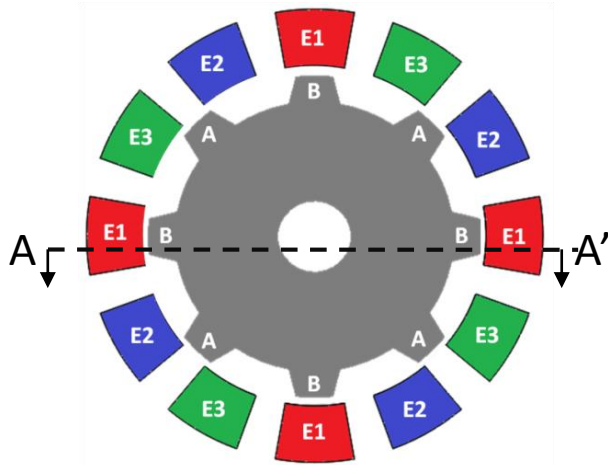
1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
- 4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR**
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR



- Se aplica el voltaje de control a los polos desalineados, se genera una fuerza electrostática cuya componente tangencial provoca que el rotor de un paso.
- El rotor está conectado al potencial positivo
- Los polos del estator están conectados en una secuencia alternada de tres fases eléctricas

PARTES QUE CONSTITUYEN A UN MICROMOTOR

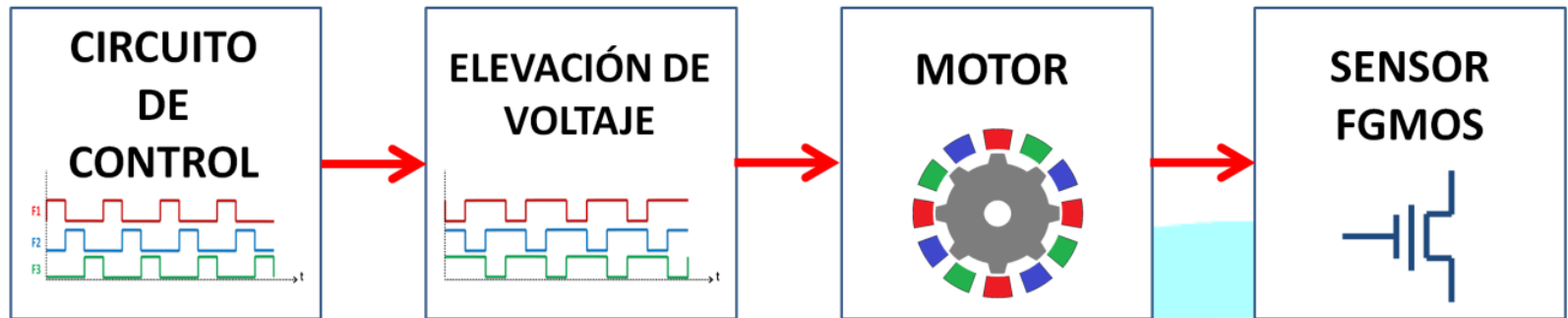


- El rotor, estator, eje y base son construidos de algún material conductor. Los cojinetes sirven como contacto eléctrico para alimentar al rotor y también como contacto mecánico, es decir, sobre estos se desplaza el micromotor.
- Debido al contacto existe una fuerza de fricción

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
- 5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO**
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO



Circuito de control: Se generan las señales eléctricas en un orden adecuado para hacer que el micromotor gire

Elevación de voltaje: Las señales se elevan a un mayor voltaje

Motor: Diseño de la estructura adecuándola a la tecnología CMOS de $0.5\mu\text{m}$

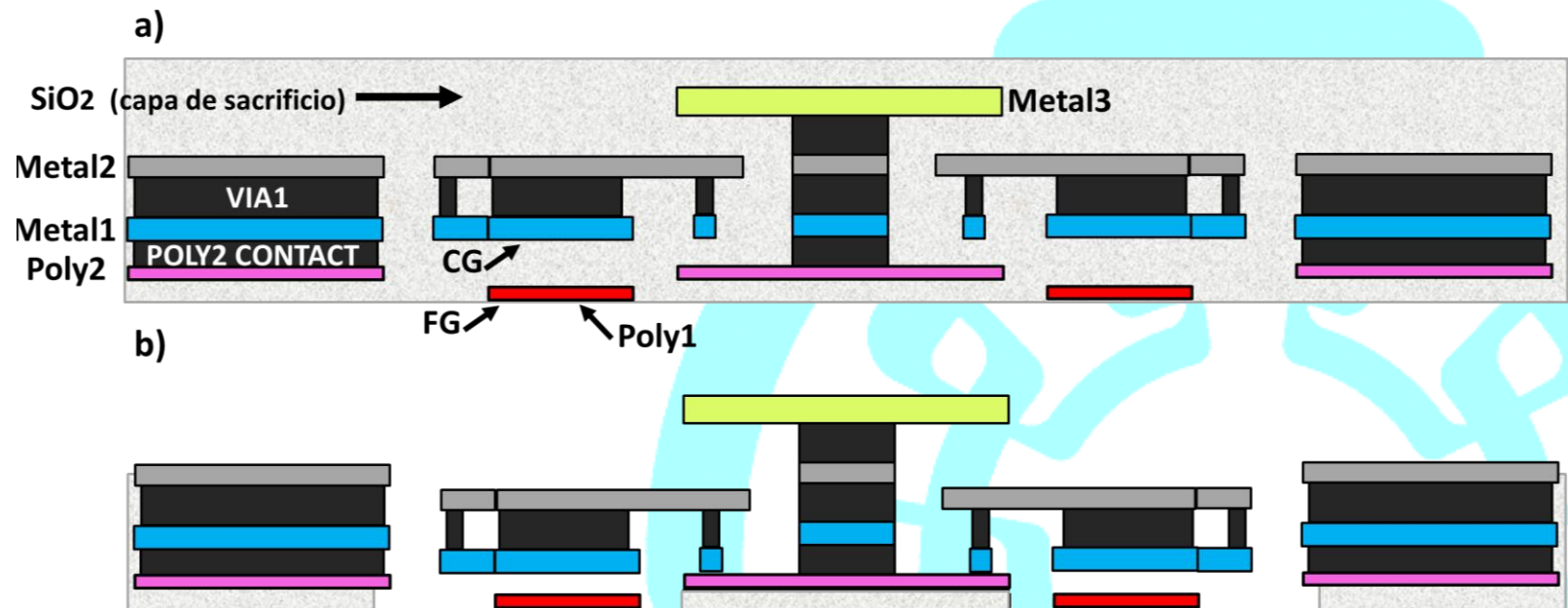
Sensor FGMOS: Un FGMOS cuya compuerta de control es una estructura fija al rotor del micromotor (auxiliar para medir la velocidad del motor)

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
- 6. MICROMOTOR**
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

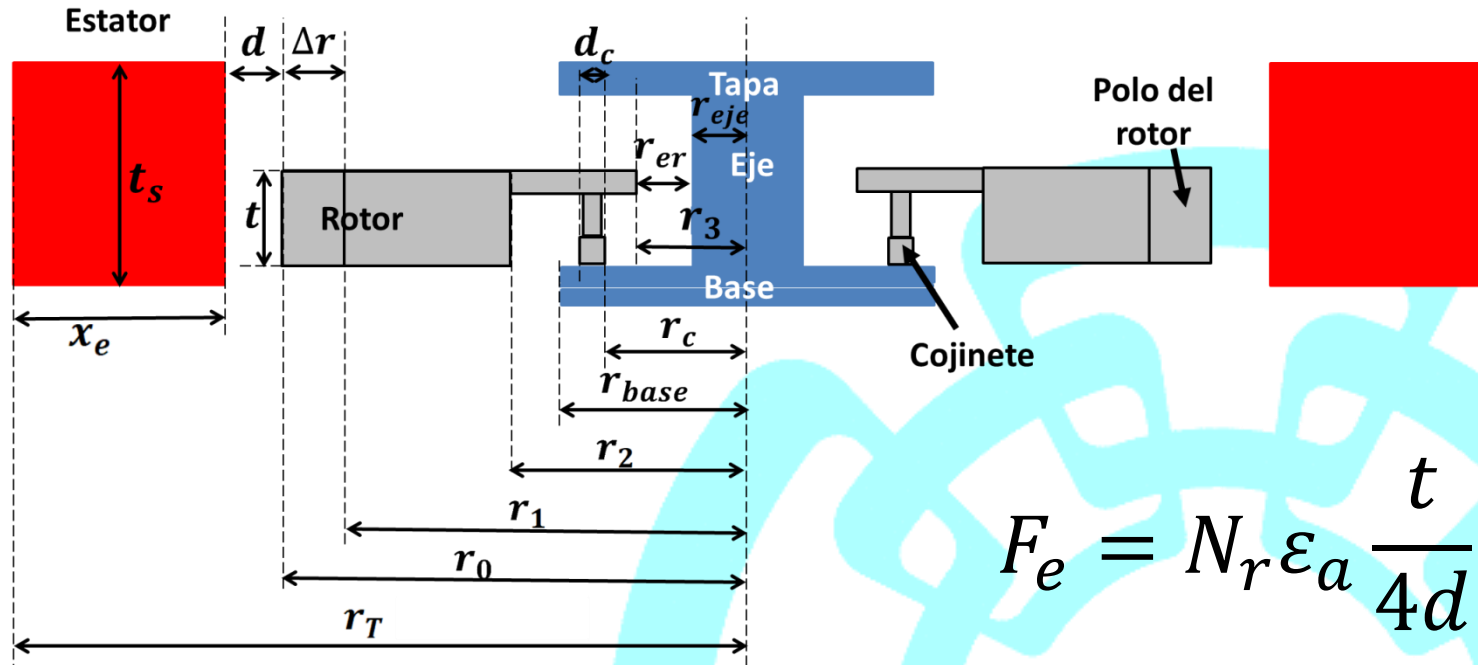
CAPAS EMPLEADAS EN LA ESTRUCTURA DEL MICROMOTOR

Tecnología CMOS de $0.5\mu\text{m}$ de OnSemiconductor



Antes de la liberación está todo cubierto por óxido de silicio y tras la liberación el rotor cae haciendo que el rotor quede en contacto con la base de giro

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL MICROMOTOR



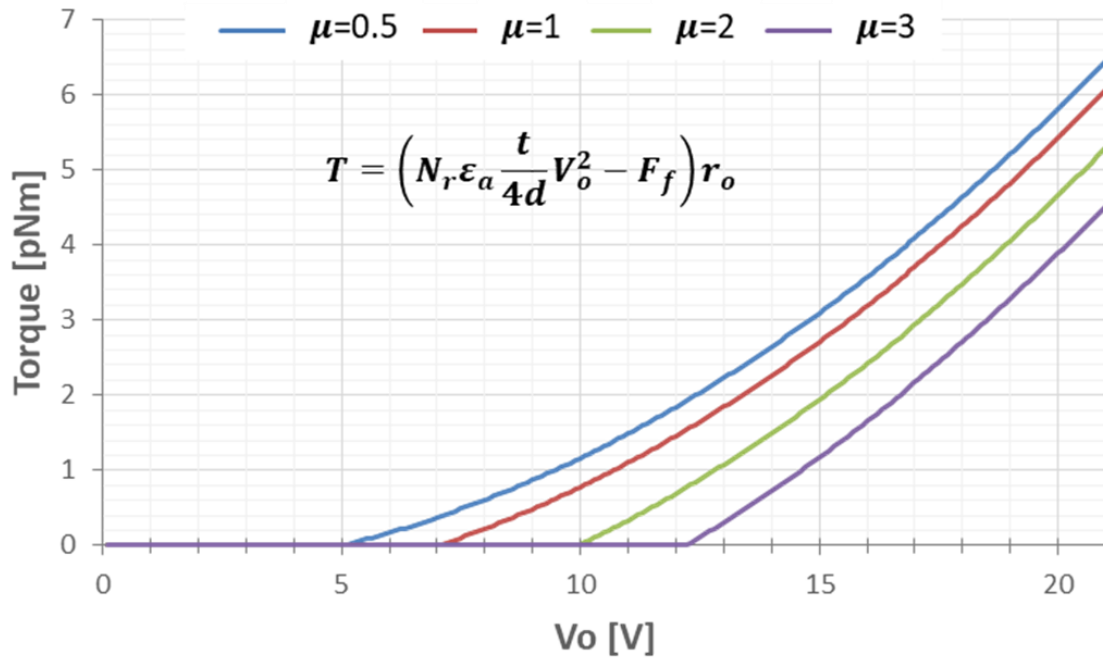
$$F_e = N_r \epsilon_a \frac{t}{4d} V_o^2$$

Se requiere definir algunos parámetros geométricos que cumplan con las reglas de diseño para la tecnología CMOS de 0.5micras

- Parámetros de seguridad
- Parámetros para mejorar desempeño del micromotor

TORQUE VS VOLTAJE DE CONTROL

- El rotor comienza a girar una vez que se ha vencido a la fuerza de fricción (cuando $V_o > V_o \text{ min}$)
- Coeficiente de fricción desconocido



$V_o \text{ min} = 4.981 \text{ V}$ para $\mu = 0.5$;

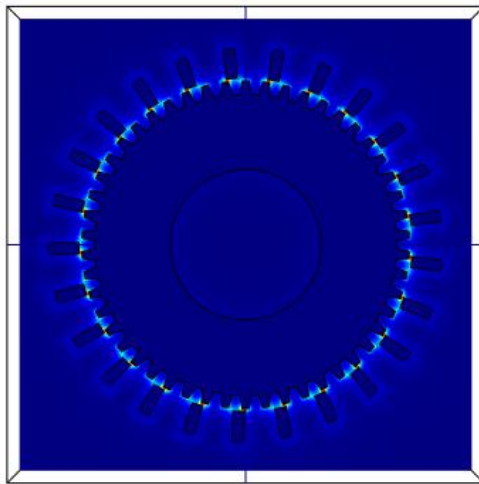
$V_o \text{ min} = 7.045 \text{ V}$ para $\mu = 1$;

$V_o \text{ min} = 9.963 \text{ V}$ para $\mu = 2$;

$V_o \text{ min} = 12.203 \text{ V}$ para $\mu = 3$.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN ELECTROSTÁTICA

Intensidad de campo eléctrico



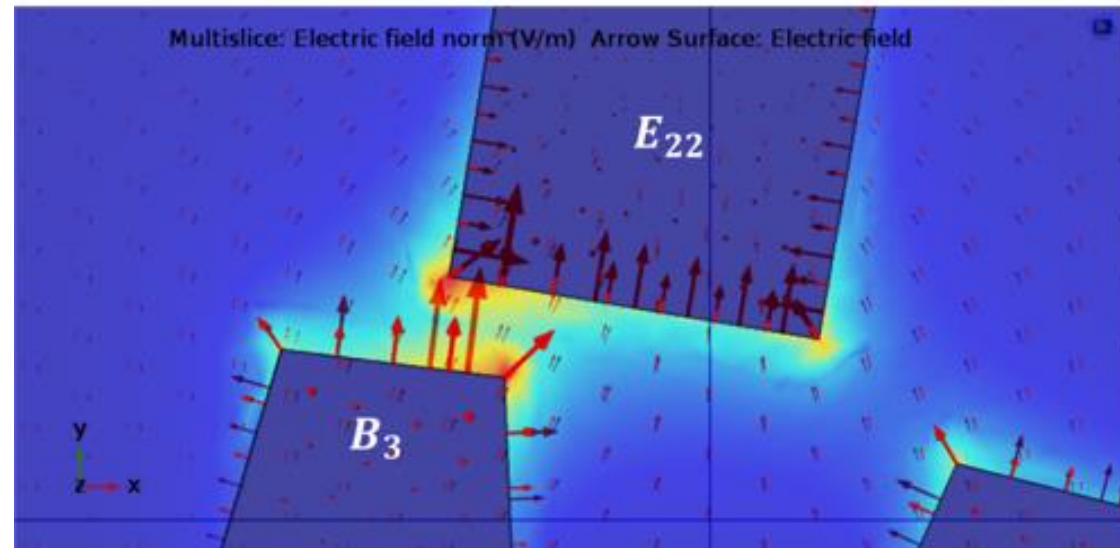
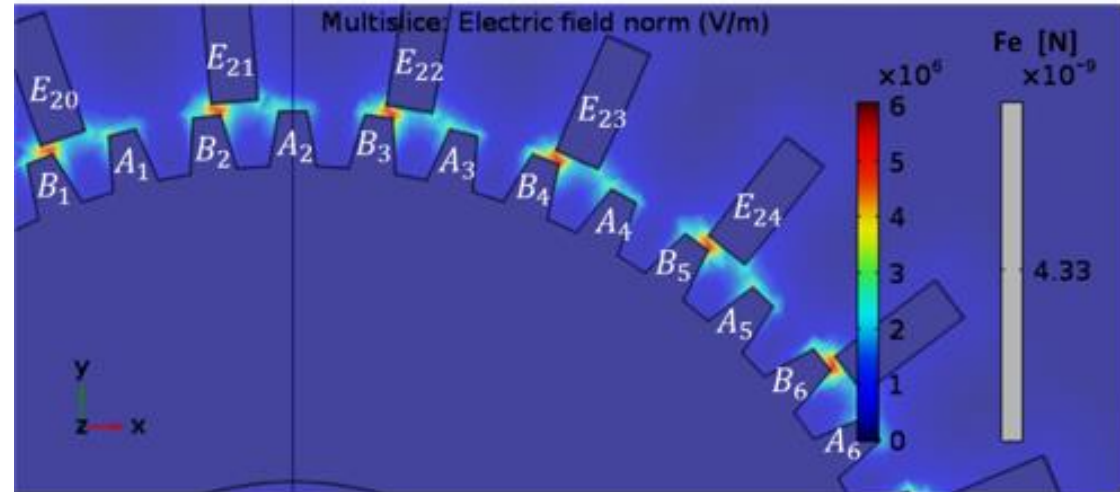
$$V_0 = 18V$$

Simulación

$$F_e = 4.33 \times 10^{-9} N$$

Teórico

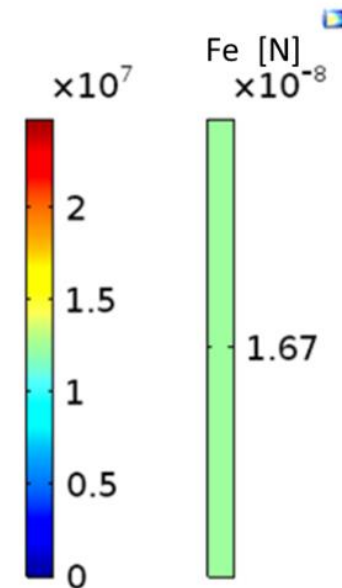
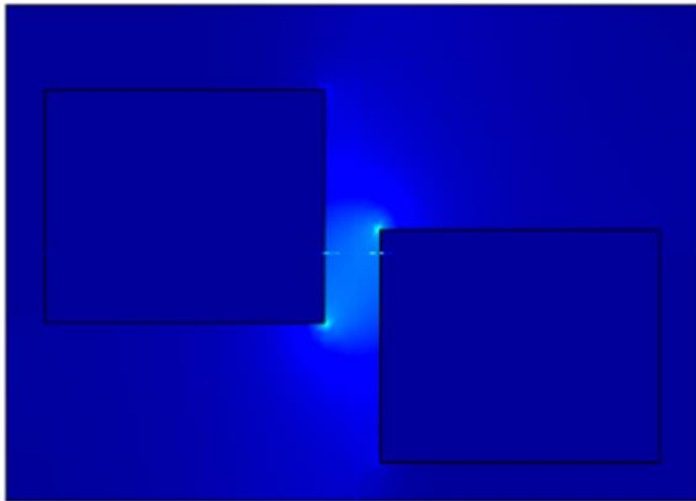
$$F_e = 22.998 \times 10^{-9} N$$



RESULTADOS DE SIMULACIÓN ELECTROSTÁTICA

Fuerza de actuación calculada

$$F_e = 22.998 \times 10^{-9} N$$



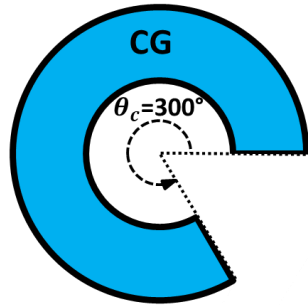
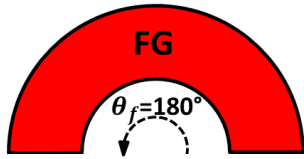
Fuerza de actuación en simulación

$$F_e = 16.7 \times 10^{-9} N$$

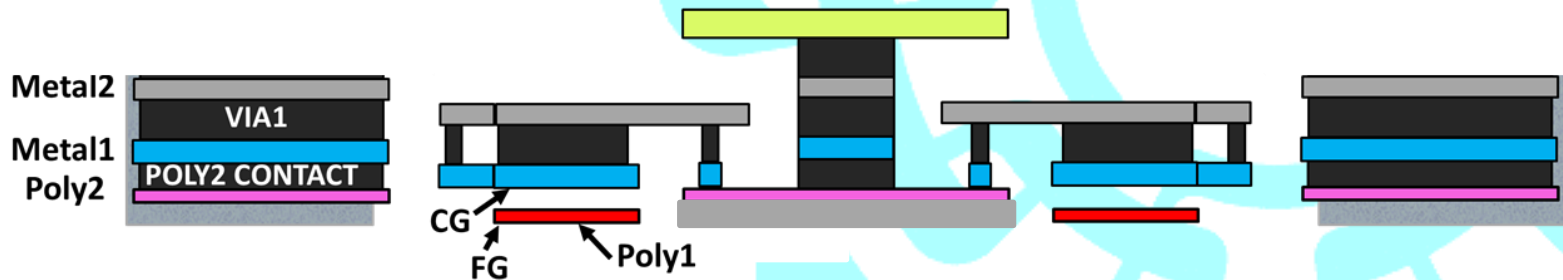
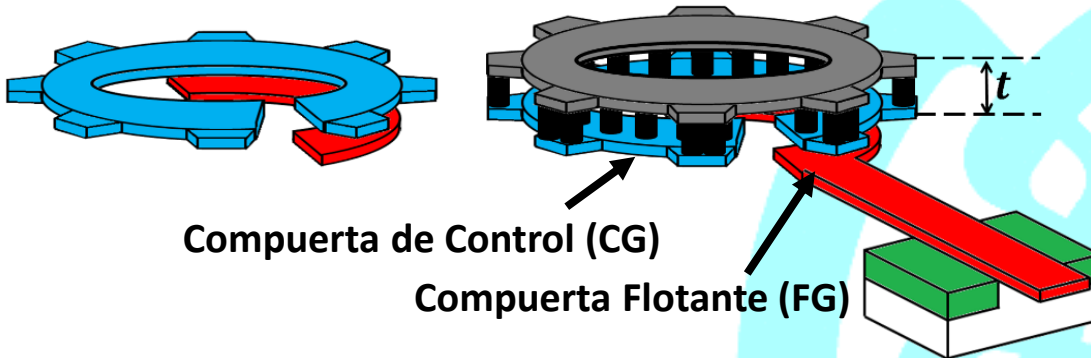
CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
- 7. SENSOR FGMOS**
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

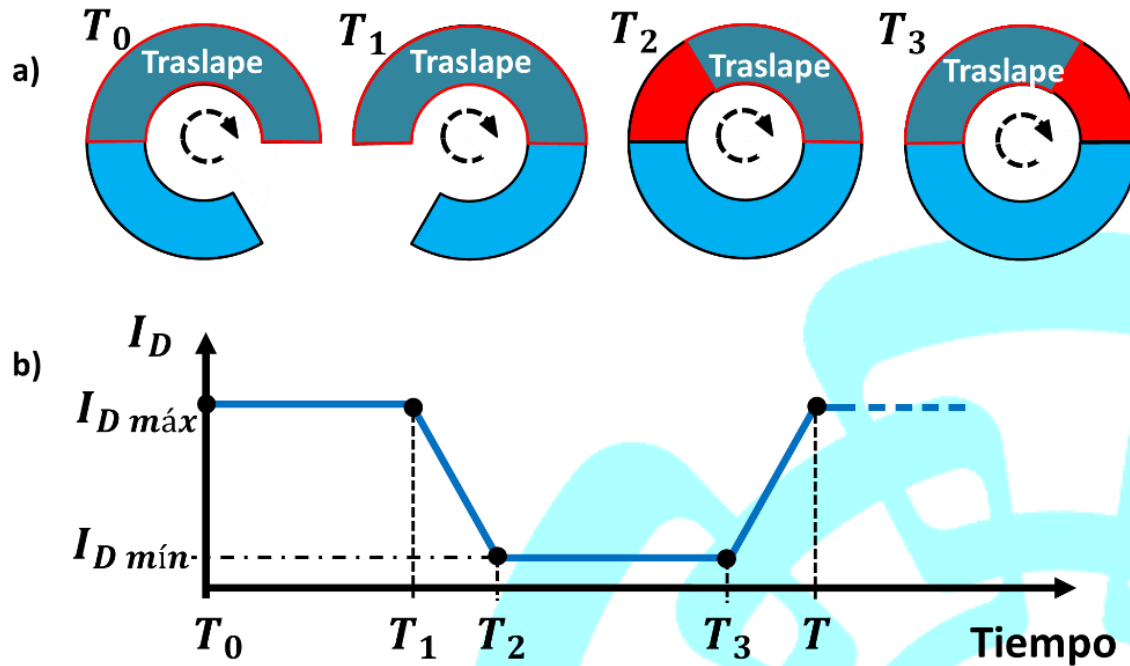
ESTRUCTURA DEL FGMOS PARA MEDIR VELOCIDAD DE GIRO



$$V_{FG} \approx \frac{C_c}{C_c + C_D + C_S + C_{OX} + C_{poly}} V_o = K_{CG} V_o$$



CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE GIRO

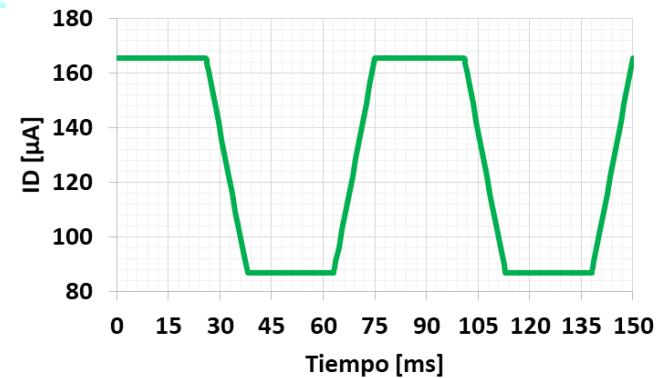
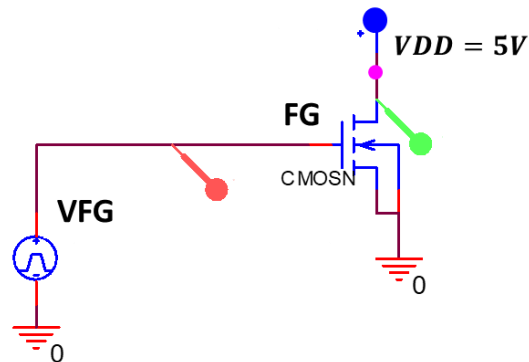
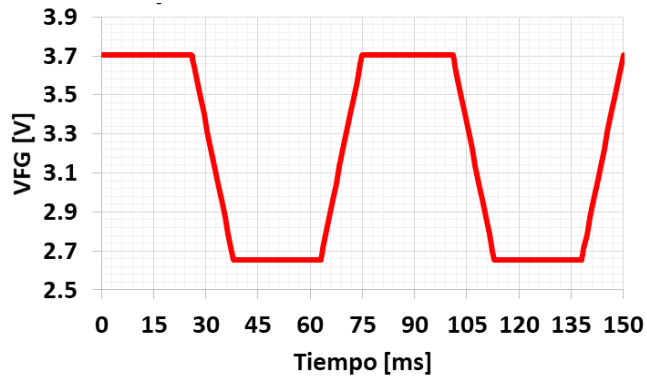
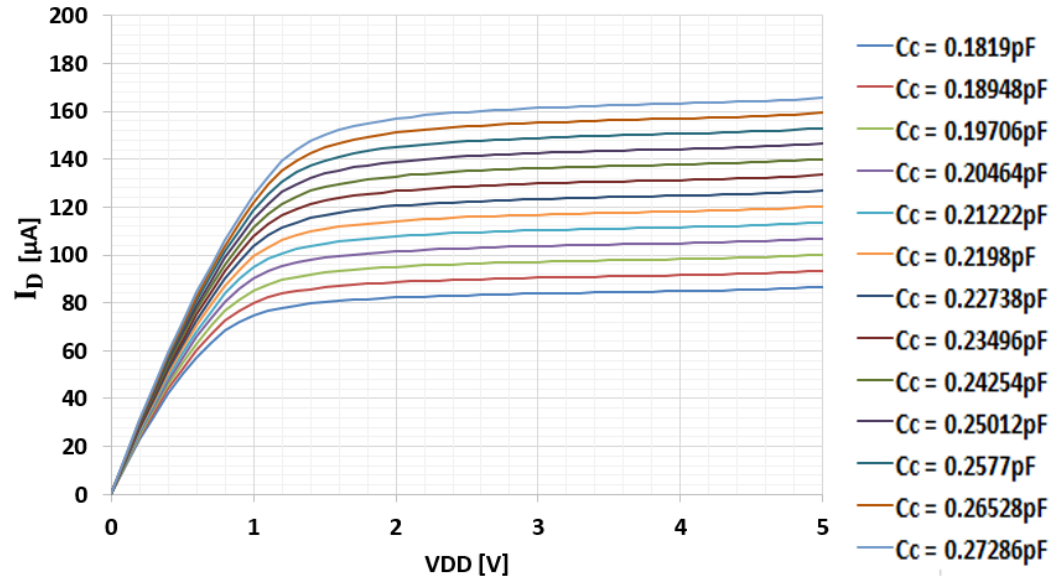


Si el rotor gira a una velocidad constante, basta con medir el tiempo T que le toma a la estructura dar una vuelta (medir el periodo T de la señal a la salida del FGMOS) para saber la velocidad angular del rotor.

$$\omega_{rotor} = \frac{2\pi}{T} \text{ [rad/s]} \quad v_{rpm} = \frac{30 \omega_{rotor}}{\pi}$$

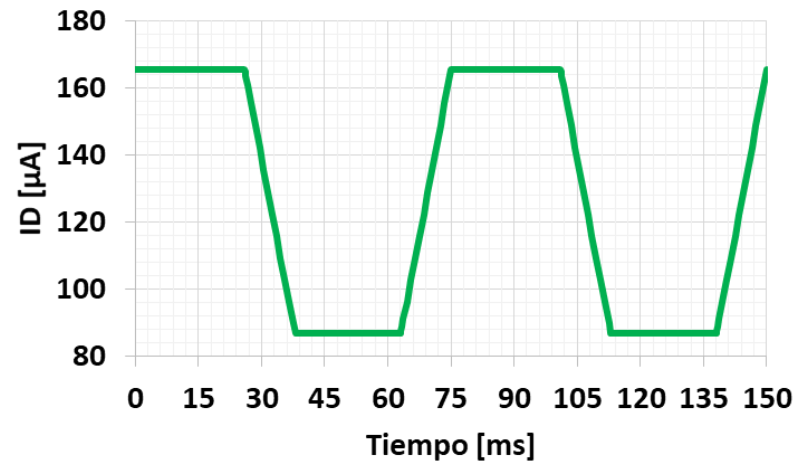
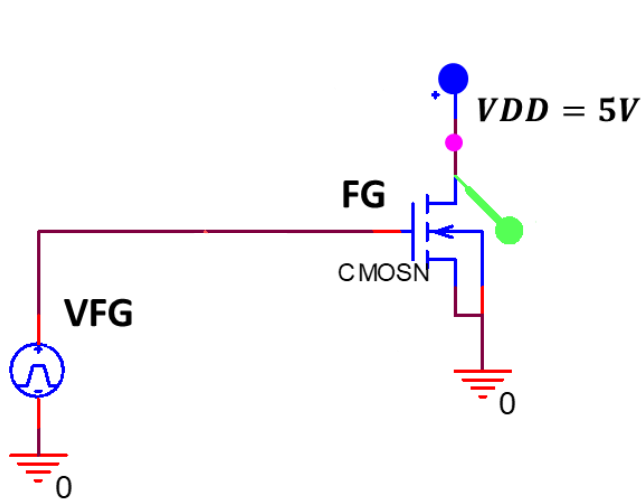
RESULTADOS

SENSOR DE VELOCIDAD



RESULTADOS

SENSOR DE VELOCIDAD

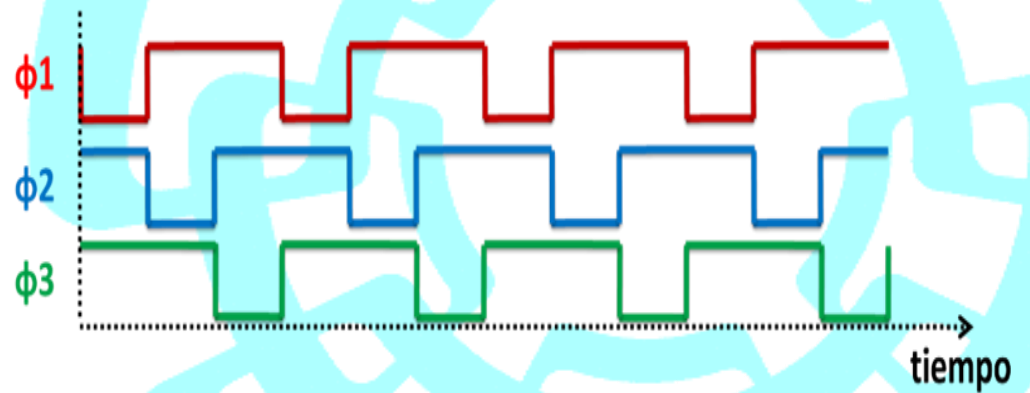
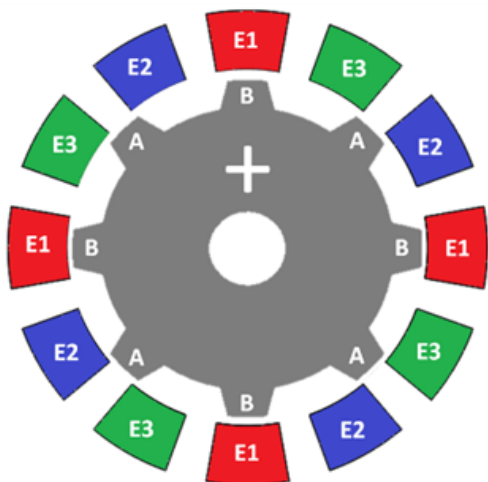
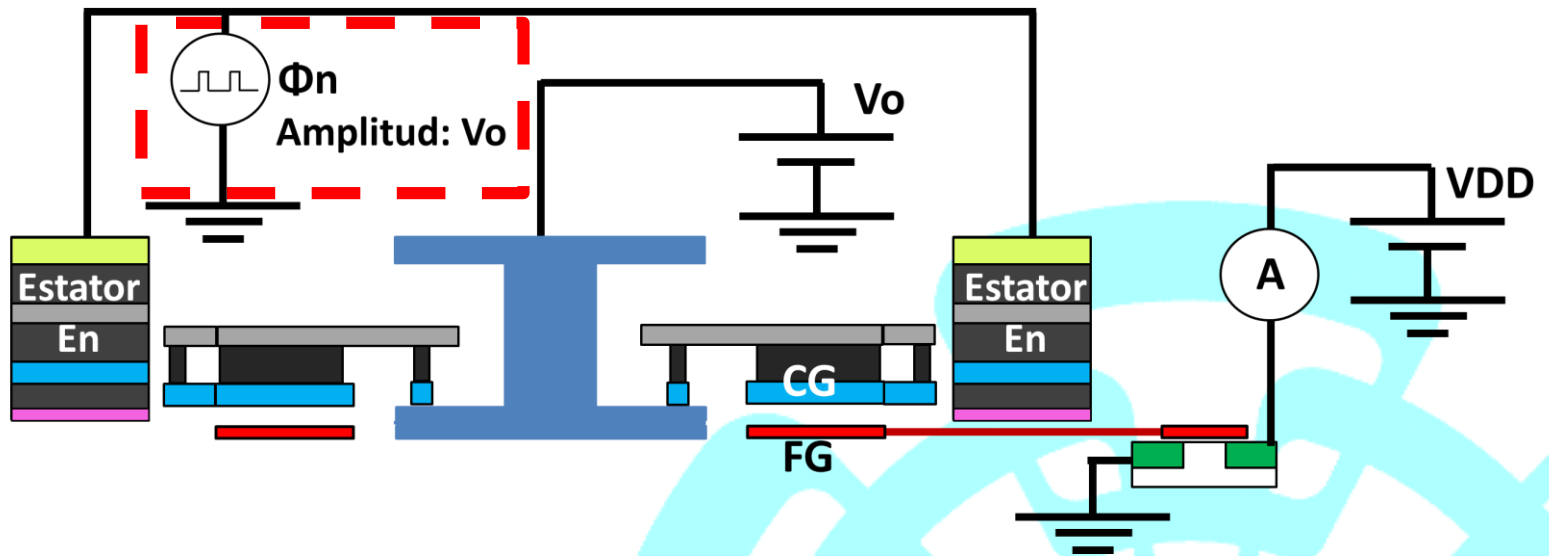


f_{osc}	$\omega_{rotor} \left(\frac{rad}{s} \right)$	$v_{rpm} (rpm)$
10Hz	0.837	8
100Hz	8.377	80
1KHz	83.77	800

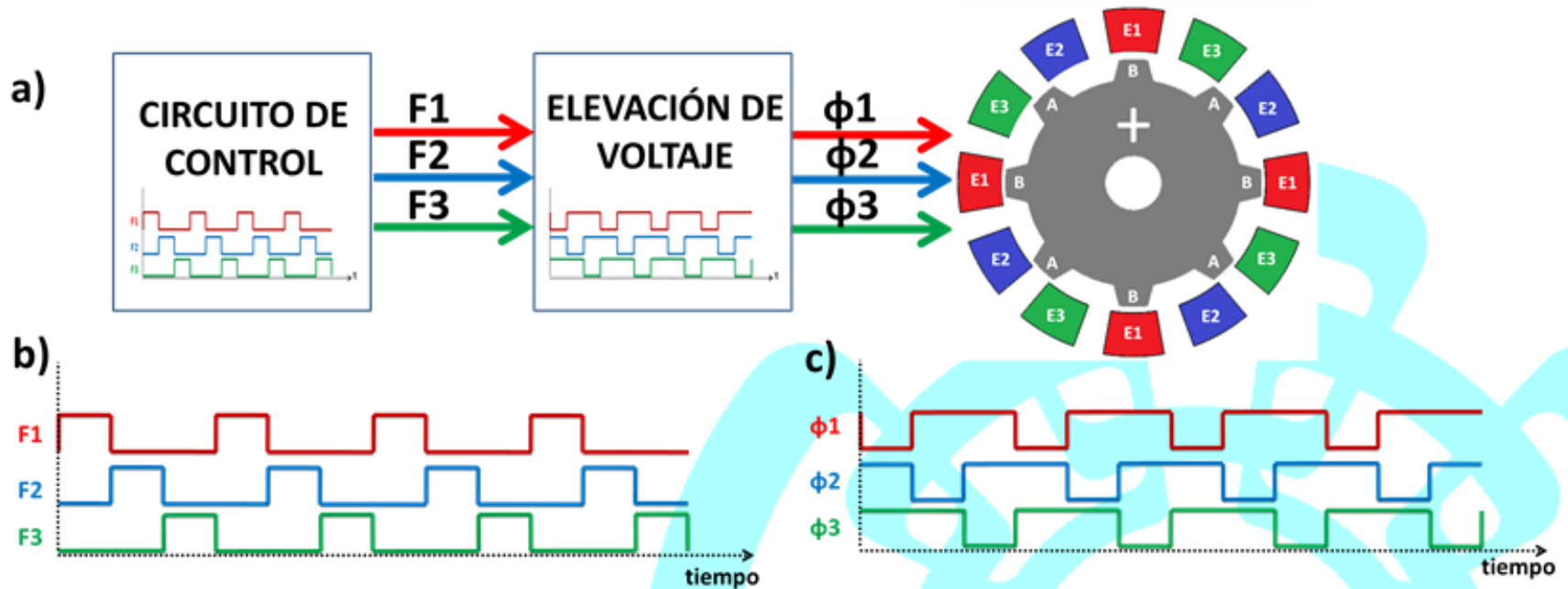
CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
- 8. CIRCUITO DE CONTROL**
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

CONEXIONES ELÉCTRICAS DEL SISTEMA



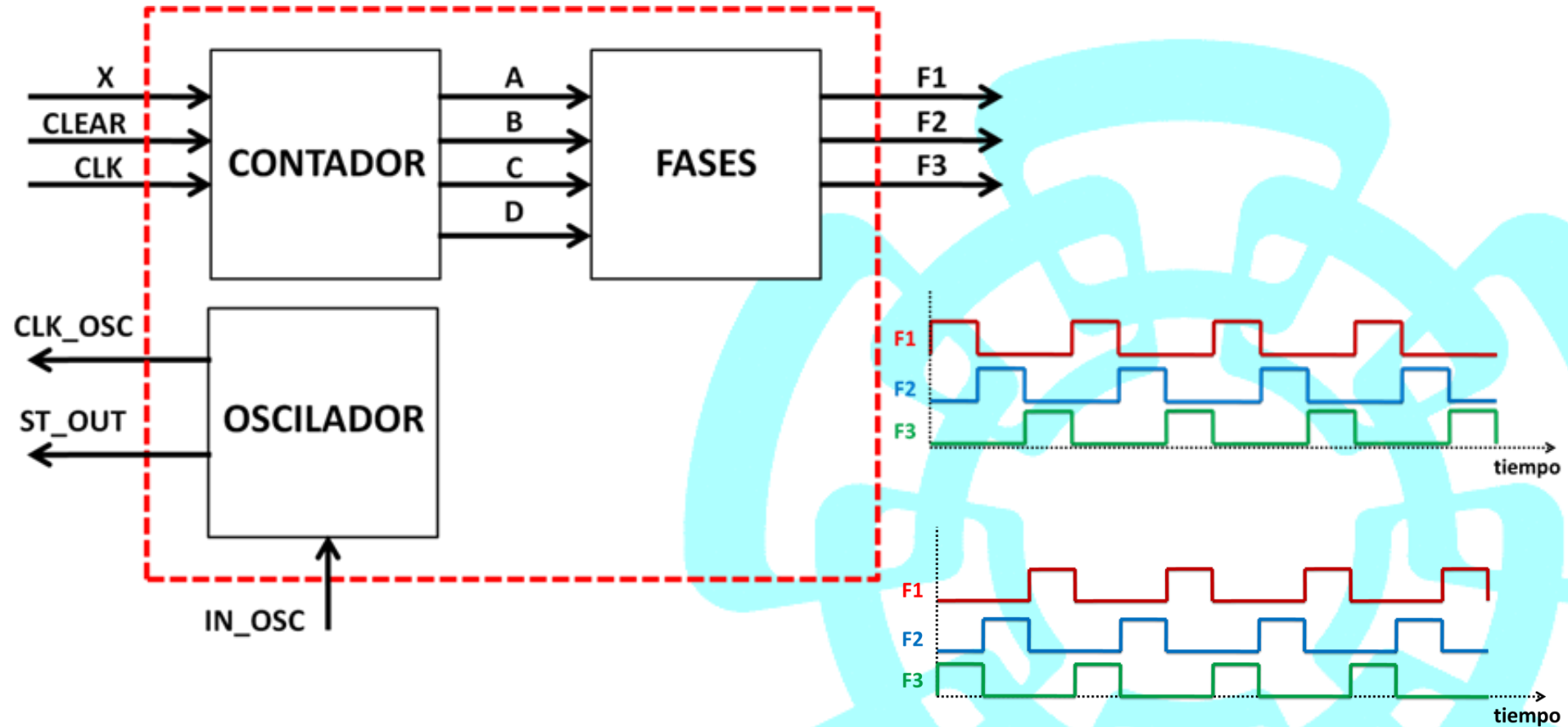
CONTROL-ELEVACIÓN DE VOLTAJE-MOTOR



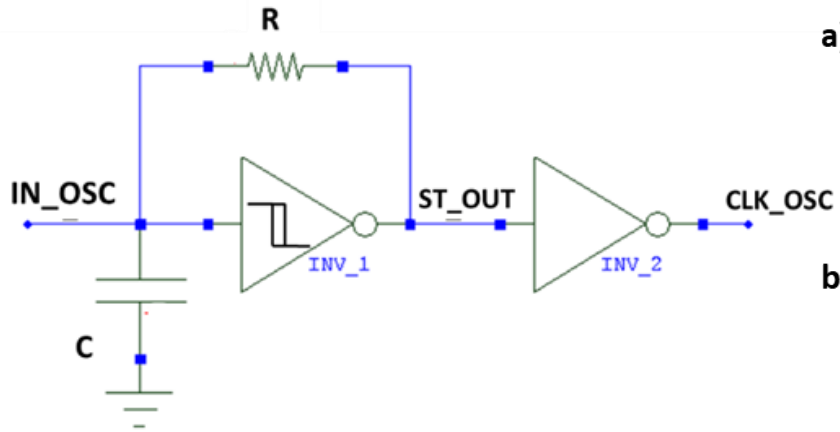
En el *circuito de control* se generan los pulsos que indican la dirección de giro y la velocidad de giro del rotor

En la *elevación de voltaje* se les da la polaridad adecuada a los pulsos (Se invierten y se eleva el voltaje)

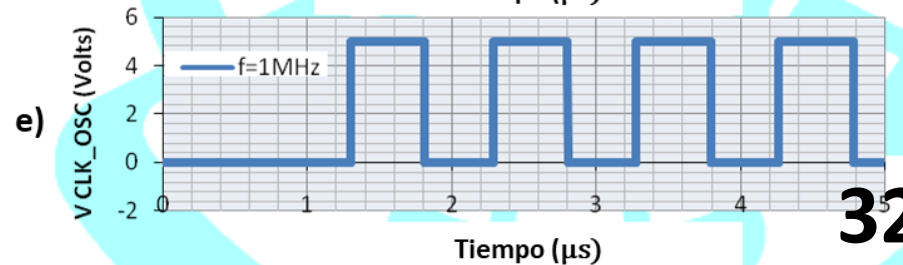
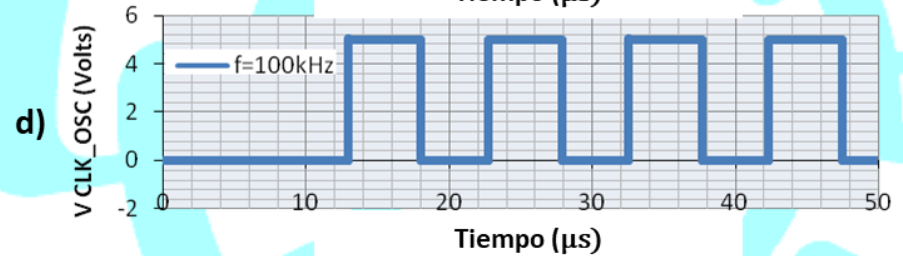
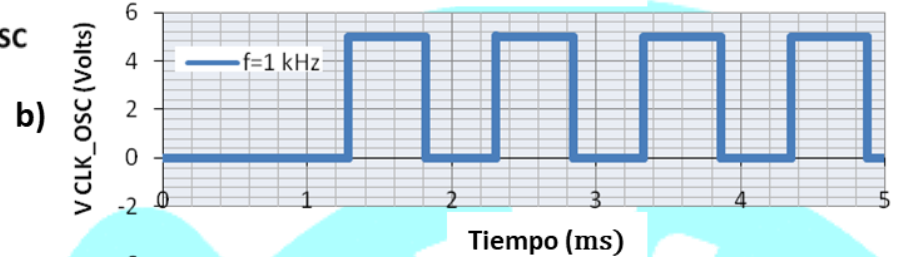
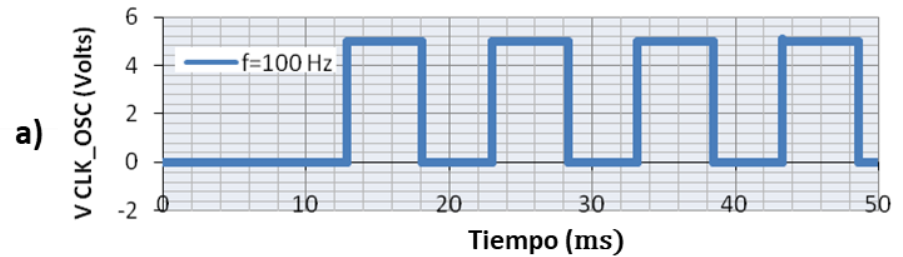
CIRCUITO DE CONTROL



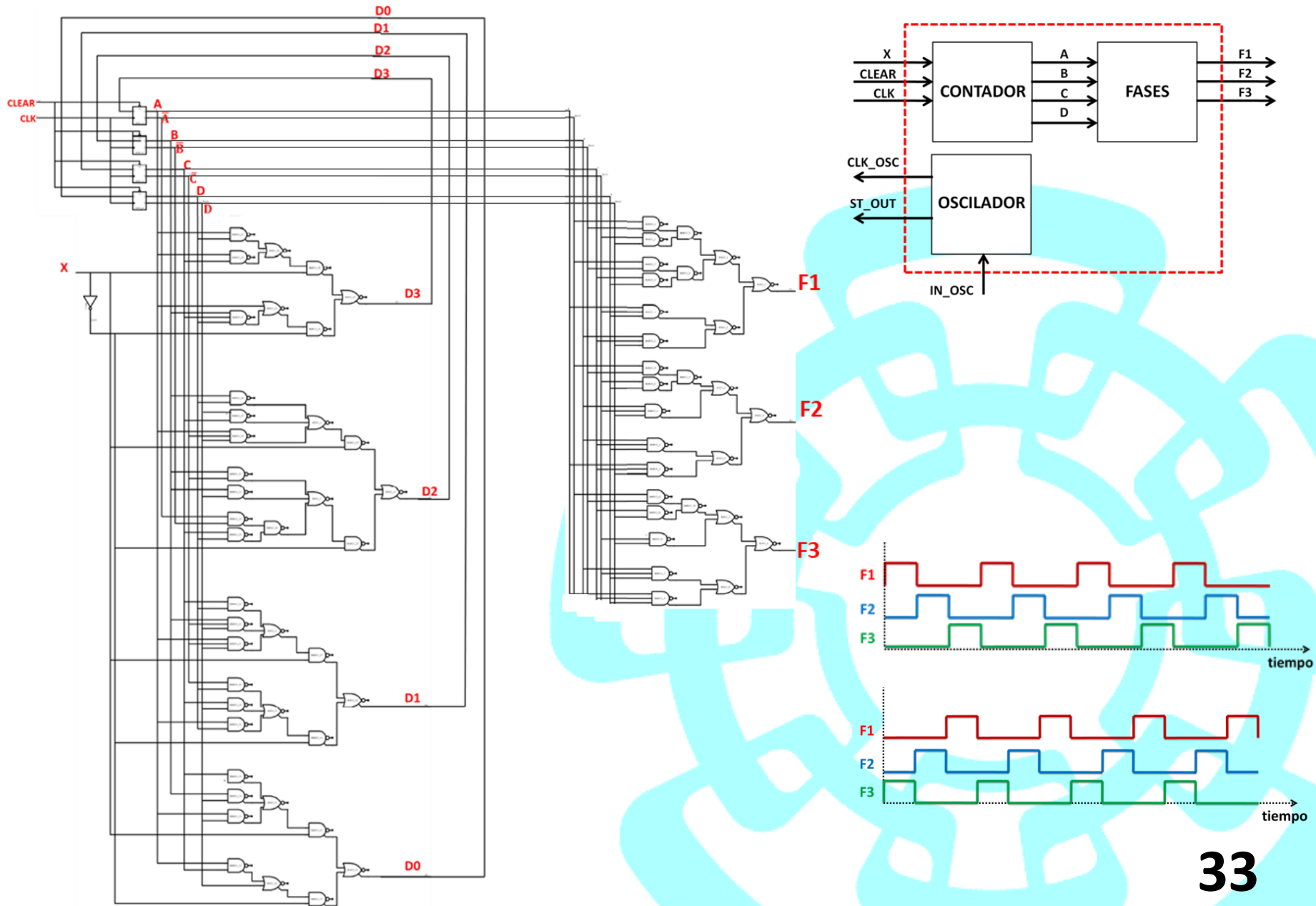
CIRCUITO OSCILADOR



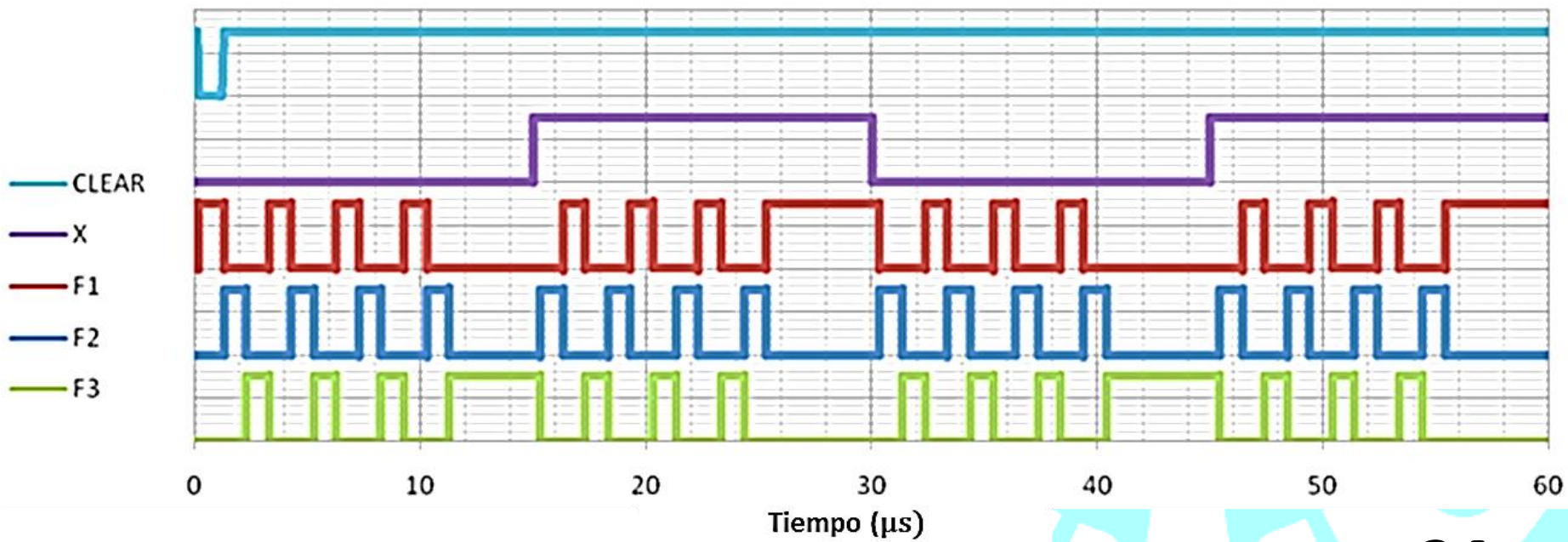
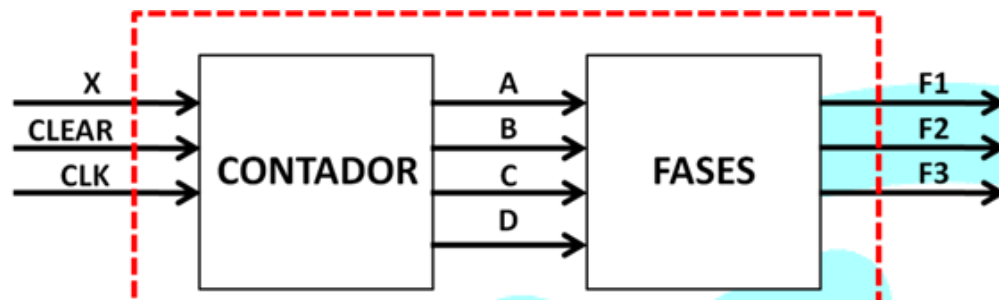
R y C son elementos externos al chip



CIRCUITO CONTADOR Y GENERADOR DE FASES



RESULTADOS DEL CIRCUITO DE CONTROL

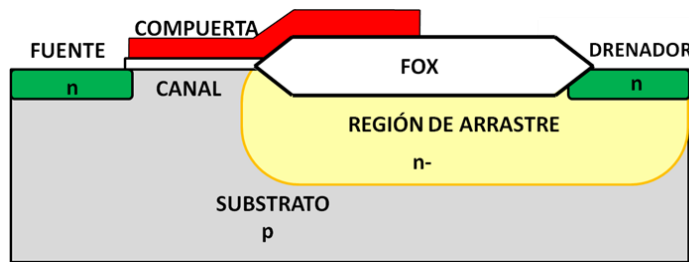


CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
- 9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE**
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

ELEVACIÓN DE VOLTAJE

Las señales del circuito de control son de 5 Volts.
Se elevan a un voltaje mayor para poder hacer girar al motor.

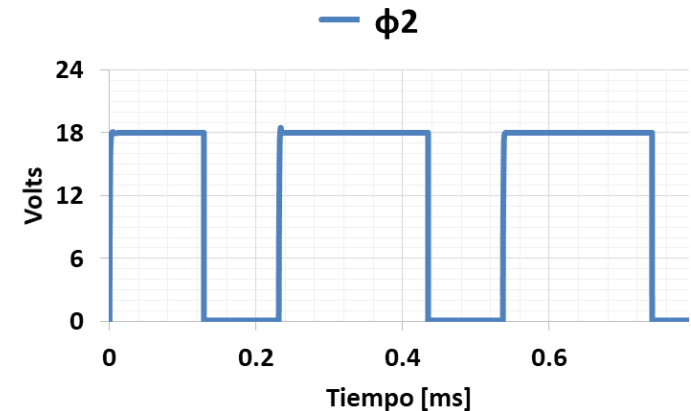
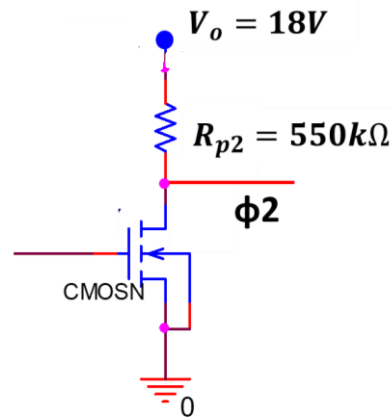
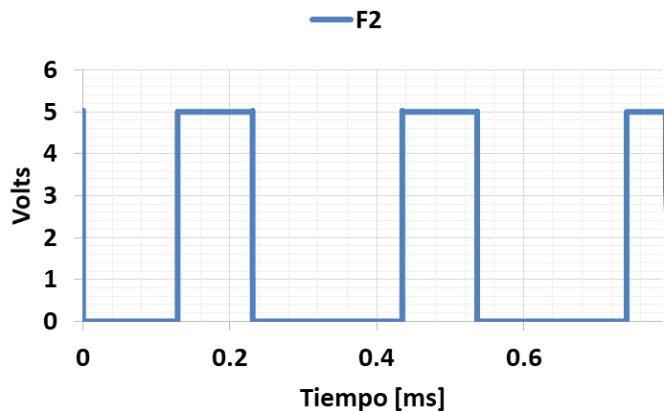


$$V_{o \text{ mín}} = 4.981 \text{ V para } \mu = 0.5;$$

$$V_{o \text{ mín}} = 7.045 \text{ V para } \mu = 1;$$

$$V_{o \text{ mín}} = 9.963 \text{ V para } \mu = 2;$$

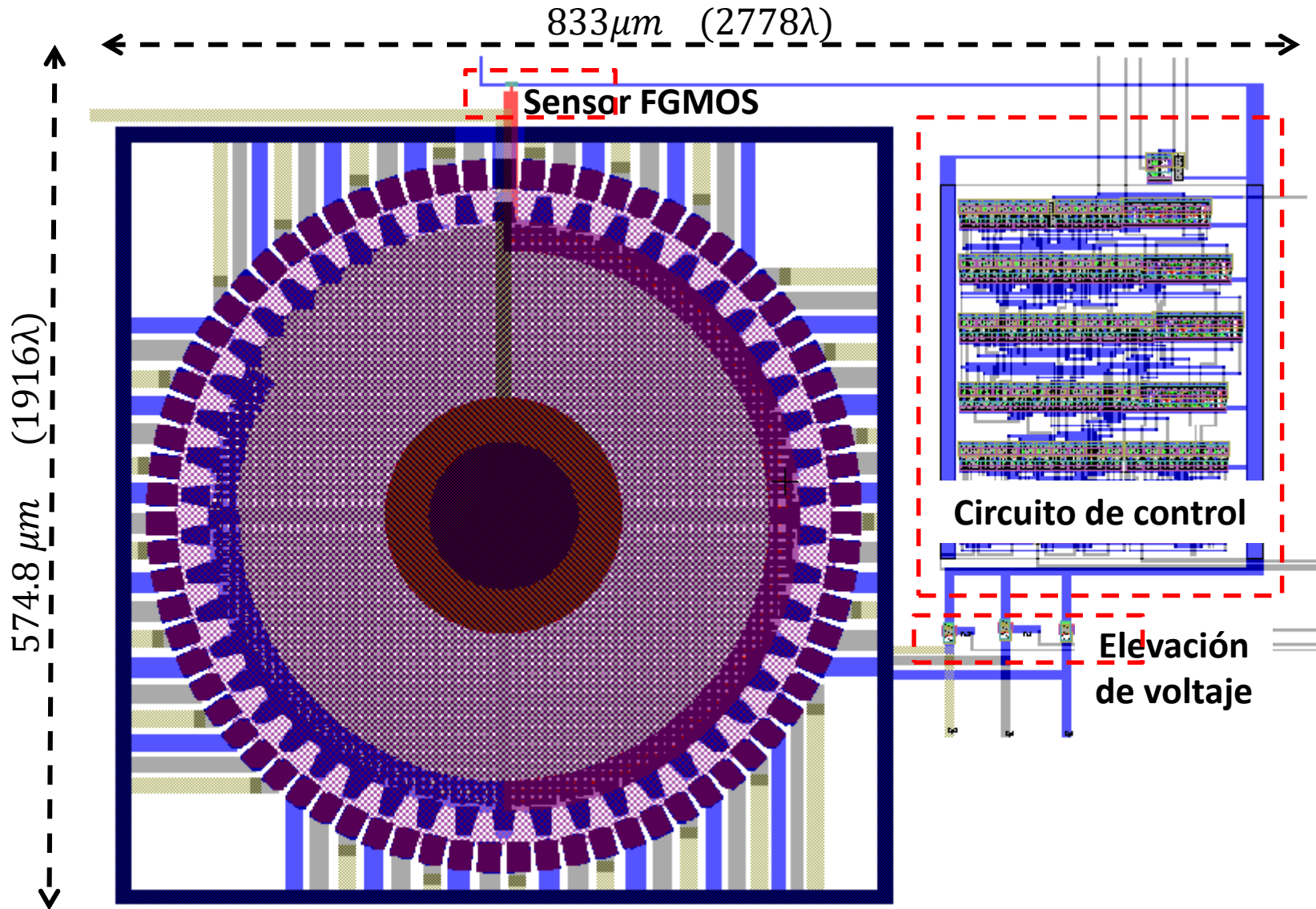
$$V_{o \text{ mín}} = 12.203 \text{ V para } \mu = 3.$$



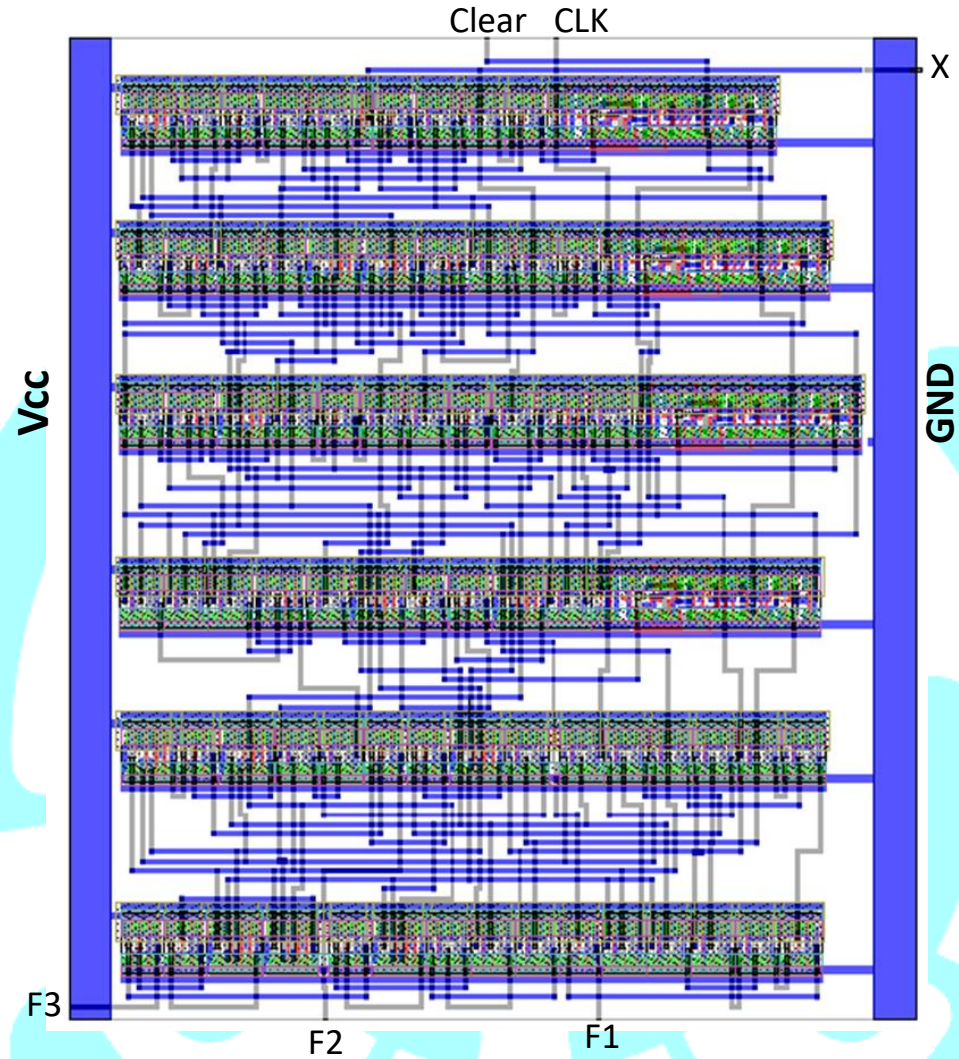
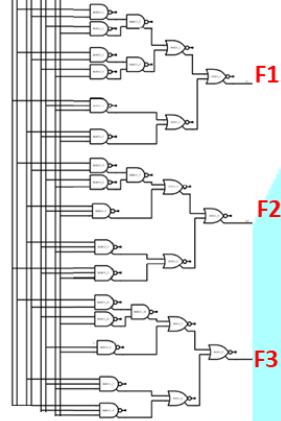
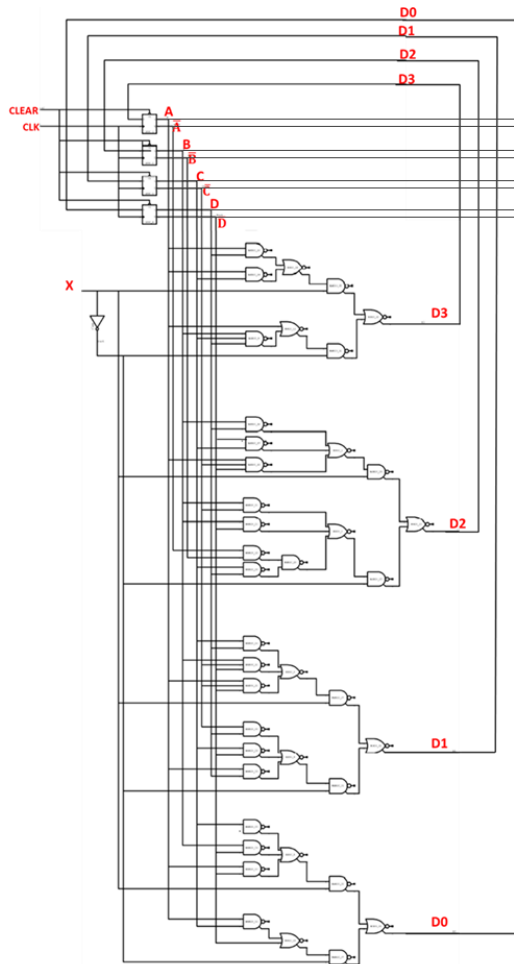
CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
- 10. DISEÑO TOPOLÓGICO**
11. CONCLUSIONES
12. TRABAJO A FUTURO

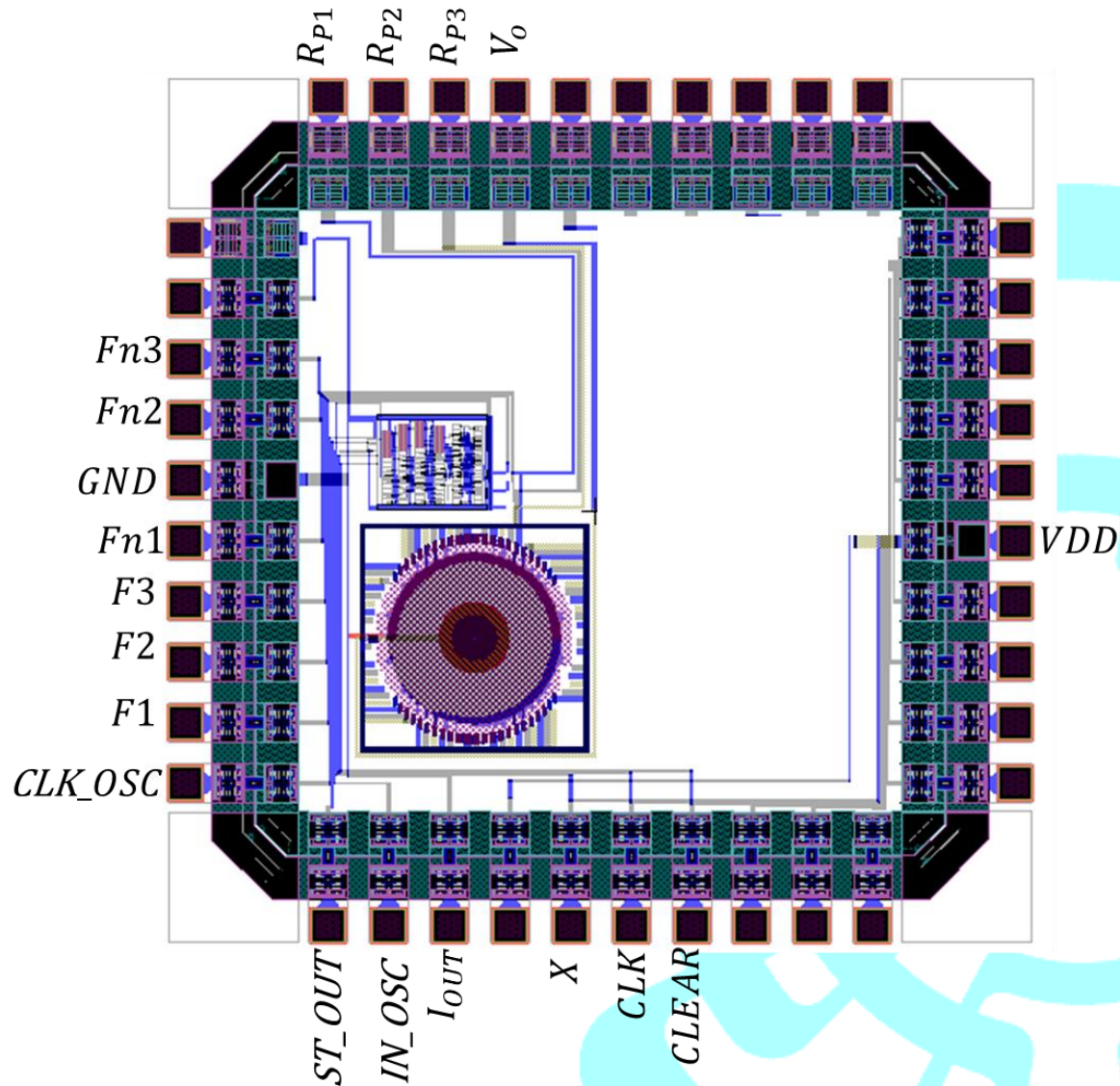
DISEÑO TOPOLÓGICO EN L-EDIT



DISEÑO TOPOLÓGICO EN L-EDIT CIRCUITO DE CONTROL



DISEÑO TOPOLÓGICO EN L-EDIT DEL CHIP COMPLETO



CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
- 11. CONCLUSIONES**
12. TRABAJO A FUTURO

CONCLUSIONES

- Es posible fabricar un micromotor electrostático angular empleando la tecnología CMOS de $0.5\mu\text{m}$
- Se observó que la forma de los dientes del rotor modifica el valor de la fuerza electrostática
- Es posible emplear un FGMOS como principal elemento para medir la velocidad de giro del micromotor
- Es posible integrar dentro de un mismo chip al micromotor, el circuito de control y el sensor de velocidad de giro, empleando las reglas de diseño de la tecnología CMOS de $0.5\mu\text{m}$

CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. JUSTIFICACIÓN
3. ACTUACIÓN CAPACITIVA
4. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EN UN MICROMOTOR
5. DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROYECTO
6. MICROMOTOR
7. SENSOR FGMOS
8. CIRCUITO DE CONTROL
9. ELEVACIÓN DE VOLTAJE
10. DISEÑO TOPOLÓGICO
11. CONCLUSIONES
- 12. TRABAJO A FUTURO**

TRABAJO A FUTURO

- Diseñar un transistor de potencia para manejar mayores voltajes de control
- Mejorar el circuito de medición de velocidad de giro del motor
- Hacer mejoras al circuito de control
- Simulaciones en COMSOL: Influencia de la forma de los dientes y estudio electromecánico
- Mandar a fabricar el chip, hacer el micro maquinado para liberar la estructura y realizar pruebas del funcionamiento del sistema

GRACIAS

