



Cinvestav

# CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Sección de Electrónica del Estado Sólido



# **Caracterización de las Propiedades Funcionales de un Acelerómetro CMOS-MEMS Basado en el FGMOS**

Tesis que para obtener el grado de

**Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica**

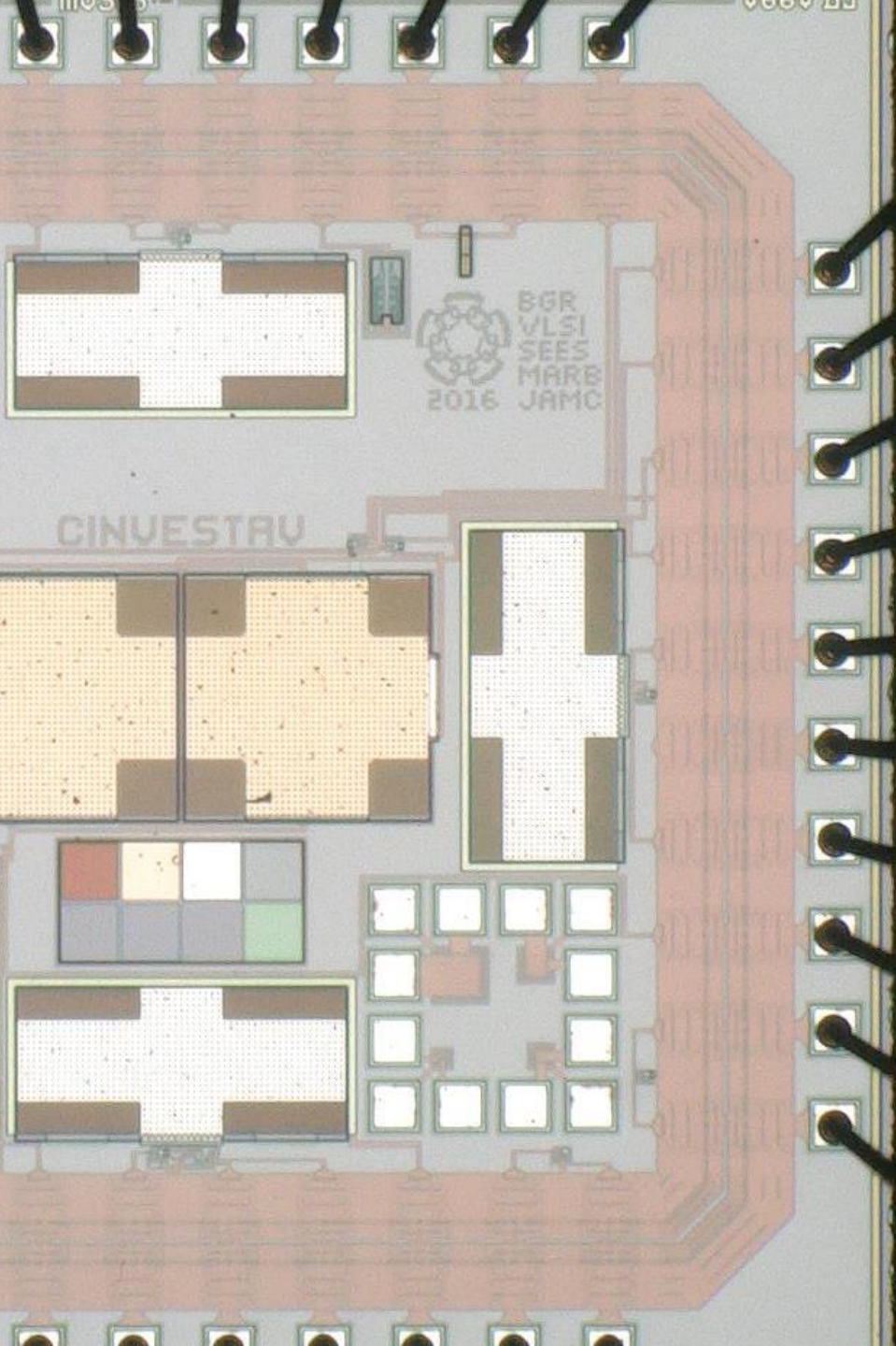
presenta:

**M. en C. Benito Granados-Rojas**

Director de tesis:

**Dr. Mario Alfredo Reyes-Barranca**

Agosto 31, 2021



# Contenido

- Objetivos e Introducción
- MEMS y CMOS-MEMS
- Metodología CMOS-MEMS (diseño)
- Análisis de propiedades (chip fabricado y procesado)
- Diseño metaheurístico
- Conclusiones



# Objetivos

## General

Dar continuidad al trabajo realizado en el grupo de Sistemas VLSI respecto al diseño de sensores inerciales basados en el Transistor de Compuerta Flotante FGMOS, partiendo de las características y puntos de operación de este tipo de dispositivos.

## Objetivos particulares

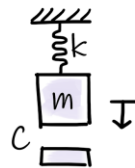
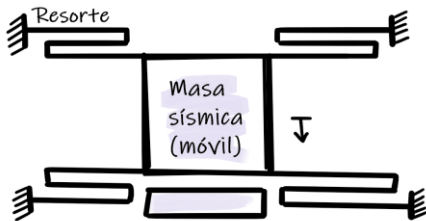
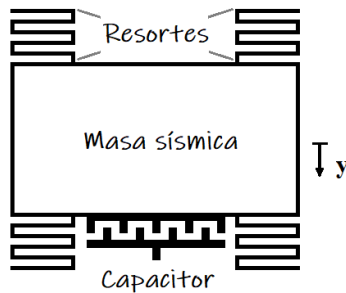
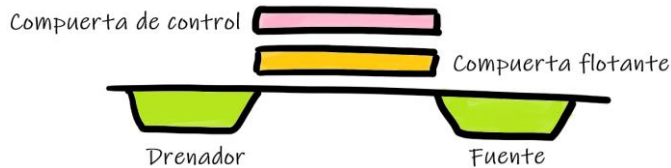
- Profundizar en el modelado del transistor FGMOS como elemento principal de transducción.
- Detallar las implicaciones que presenta el post-proceso de micro-maquinado superficial.
- Realizar una revisión de los métodos iterativos de diseño y adaptarlos a una versión basada en objetivos.
- Obtener un modelo dinámico apropiado para un sensor monolítico CMOS-MEMS.
- Promover la implementación de técnicas de inteligencia artificial y cómputo evolutivo en la automatización del diseño topológico



# Introducción

Los dispositivos transductores basados en el transistor de compuerta flotante **FGMOS** dentro de la tecnología **CMOS** estándar se han estudiado por parte de nuestro grupo de trabajo como elemento principal en el diseño de sensores MEMS, en particular, acelerómetros capacitivos.

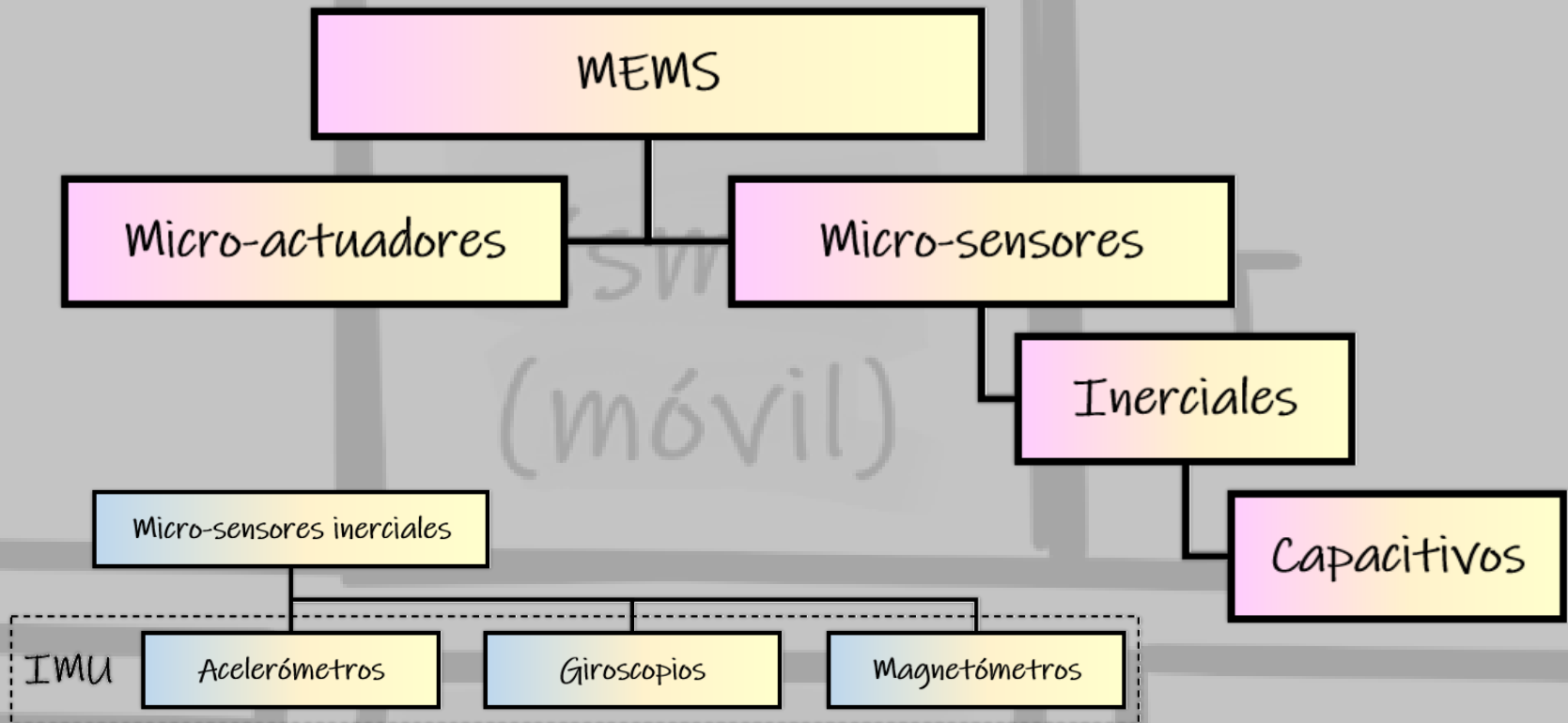
El presente trabajo aborda, principalmente, los métodos de **diseño topológico, micro-maquinado superficial y optimización metaheurística**, en función de las propiedades eléctricas y geométricas propias de un sensor inercial.



# MEMS y CMOS-MEMS

Los sistemas micro-electro-mecánicos MEMS están presentes en múltiples aplicaciones de la vida cotidiana. En combinación con la tecnología CMOS y en particular con el transistor MOS de compuerta flotante (FGMOS) se potencializa una alternativa de bajo costo para la producción de sensores inerciales.

# Clasificación MEMS



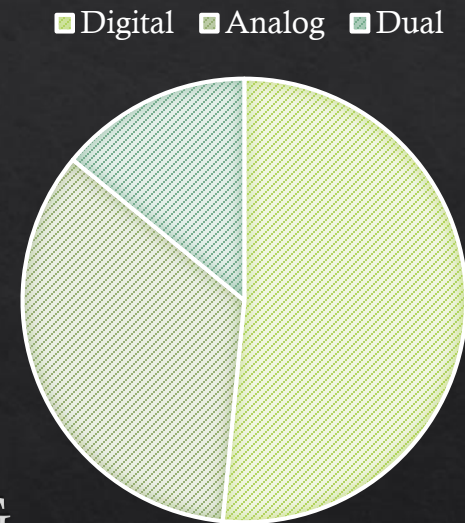


# Estado del Arte

## (Resumen de dispositivos comerciales)

64 acelerómetros comerciales:

- Rangos de aceleración: **1G – 120G**
- Valores de alimentación: **3.3V, 5V (3-6V)**
- Consumo de corriente: **700nA – 24mA**
- Resolución en digitales: **10 – 24 bits**
- Sensitividad: **5mV/G @100G – 1V/G @1.7G**



# Estado del Arte

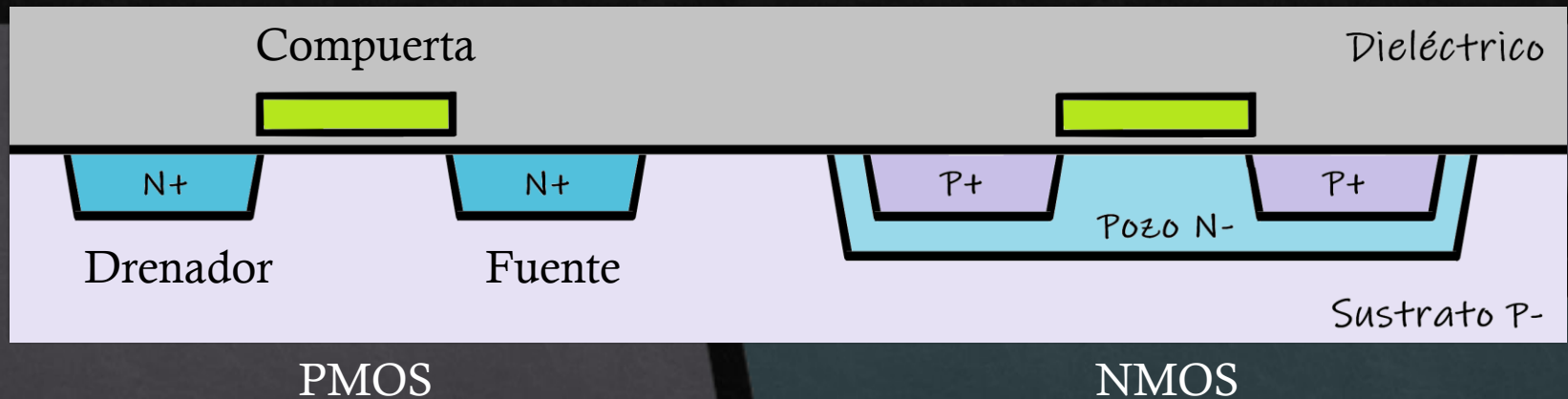
(Resumen de proyectos académicos)

| Sensitividad  | Rango de operación | Publicación          |
|---------------|--------------------|----------------------|
| 1.22 V/G      | $\pm 3$ G          | Yuntao 2009          |
| 2.1 V/G       | 10 G               | Chih-Ming 2009       |
| 0.1 $\mu$ A/G | $\pm 33$ G         | Benxian 2009 *       |
| 0.7 V/G       | —                  | Kim 2012             |
| 0.4 fF/G      | 7.5 G              | Daisuke 2014 *       |
| 0.8 fF/G      | 6 G                | Sheng-Hsiang 2014    |
| 0.6 V/G       | 1 G                | Daisuke 2015 *       |
| 0.13 V/G      | 20 G               | Gonseth 2015         |
| 20 fF/G       | 20 G               | Yamare 2015          |
| 1.78 V/G      | 0.1 G              | Kavitha 2016         |
| 0.8 V/G       | $\pm 2$ G          | <b>Granados 2017</b> |
| 35 fF/G       | $\pm 5$ G          | Zakriya 2018         |

\*CMOS – MEMS

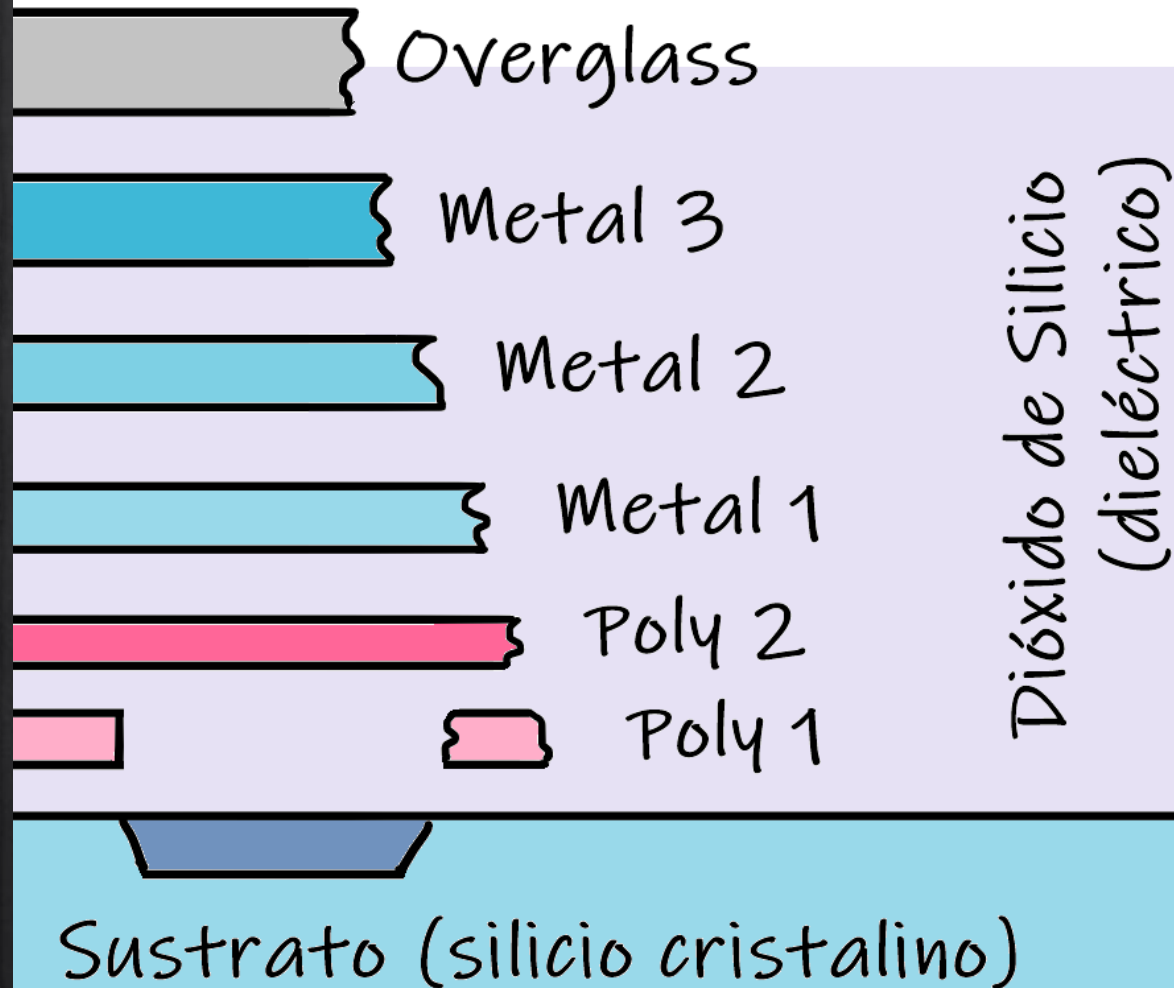
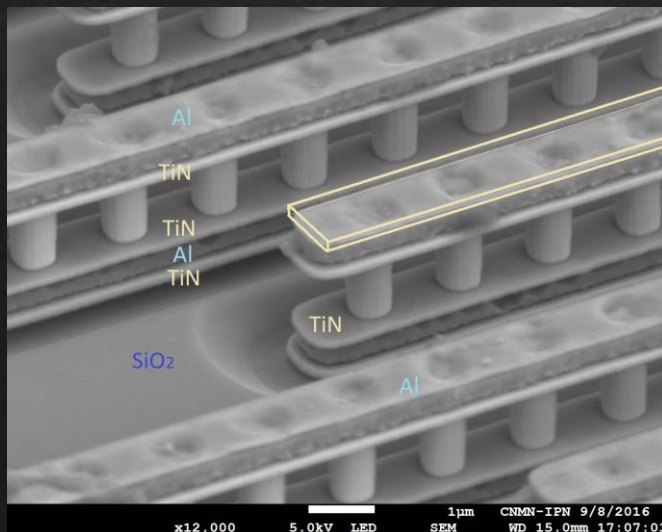
# Tecnología CMOS

Complementary Metal-Oxide-Semiconductor



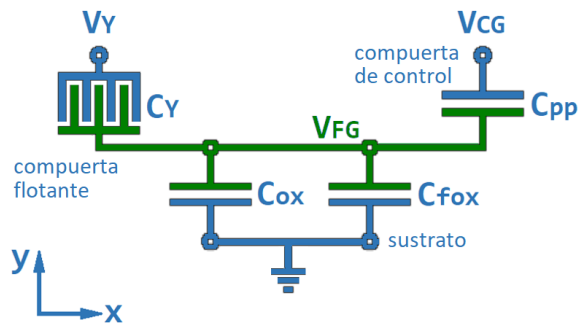
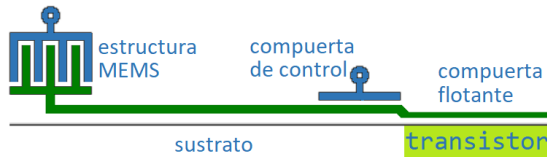
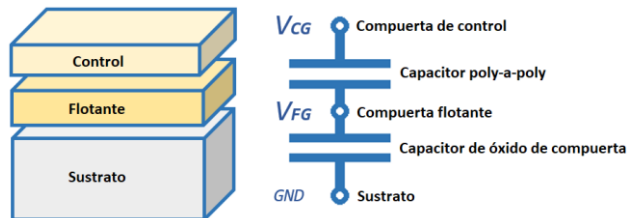
# Tecnologías CMOS y CMOS-MEMS

Las capas semiconductoras y metálicas de la tecnología CMOS convencional, permiten generar estructuras mecánicas y electro-mecánicas, útiles para la implementación de dispositivos MEMS.





# Compuerta flotante



$$V_{FG} = \frac{C_Y V_Y + C_{pp} V_{CG}}{C_Y + C_{pp} + C_{ox} + C_{fox}}$$

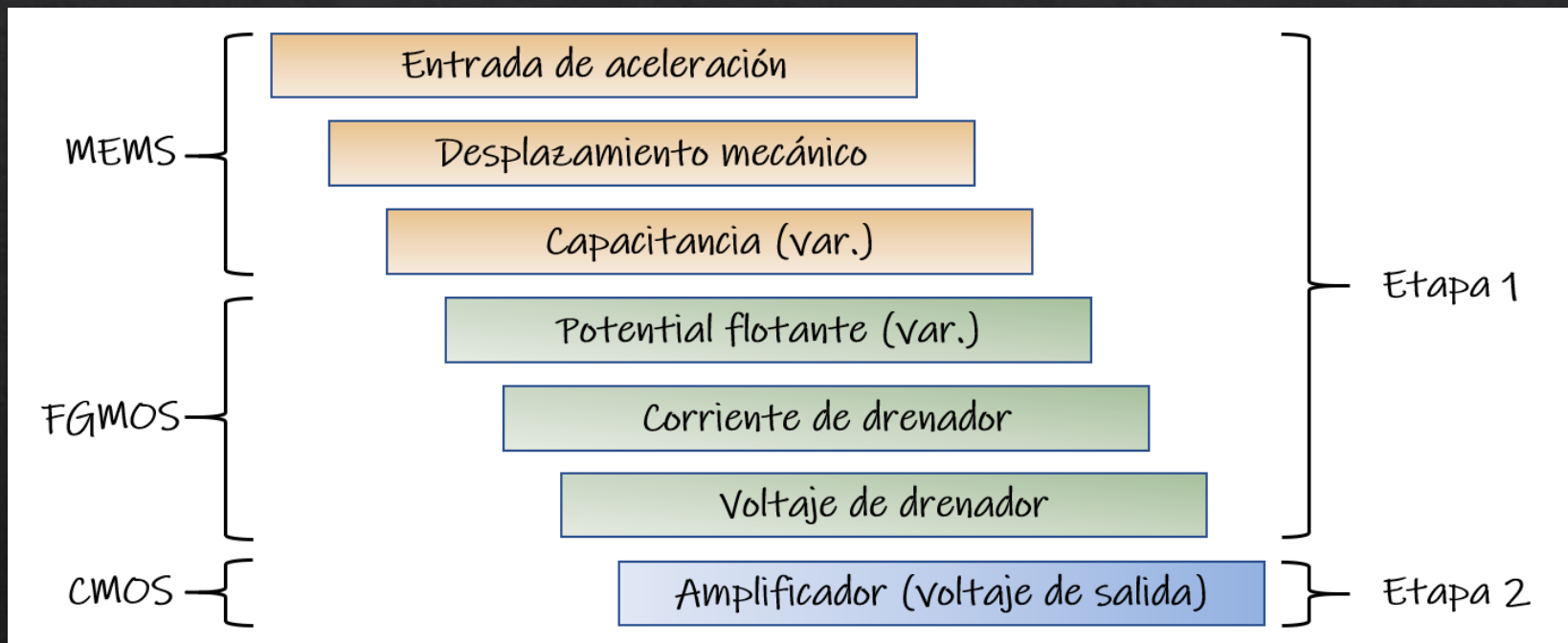
## Modelo Geométrico

$$V_{FG} = \frac{C_Y V_Y + \frac{\epsilon_0 W_{pp} L_{pp}}{t_{pp}} V_{CG}}{C_Y + \epsilon_0 \left[ \frac{W_{pp} L_{pp}}{t_{pp}} + \frac{W_{ox} L_{ox}}{t_{ox}} + \frac{W_{fox} L_{fox}}{t_{fox}} \right]}$$

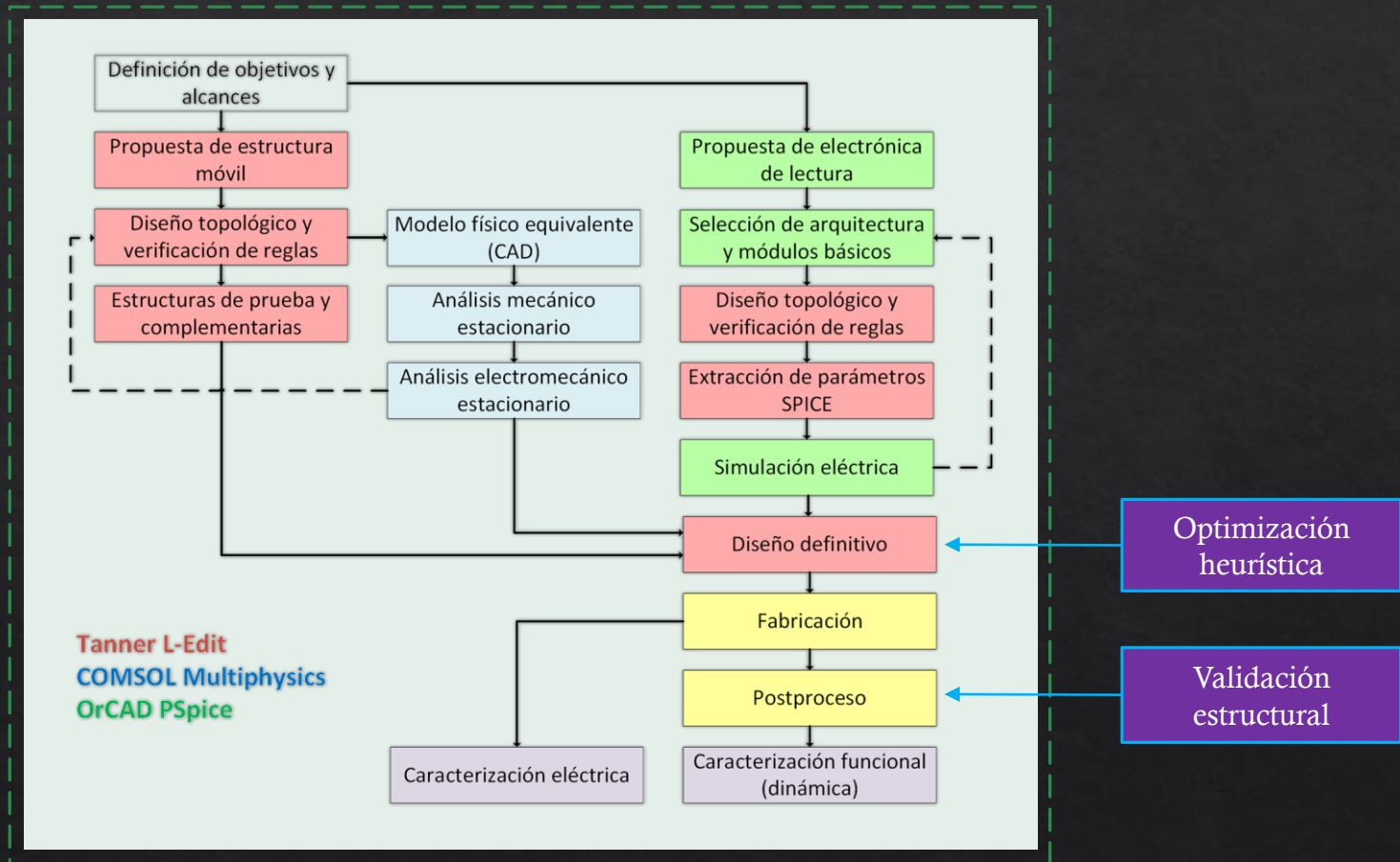
# Metodología de diseño CMOS-MEMS

El ingeniero de diseño de circuitos integrados VLSI suele apegarse a una serie de directivas y reglas establecidas por el proceso de fabricación, que junto con la selección de materiales y la manipulación de algunos parámetros geométricos, le permiten generar una variedad de dispositivos y estructuras

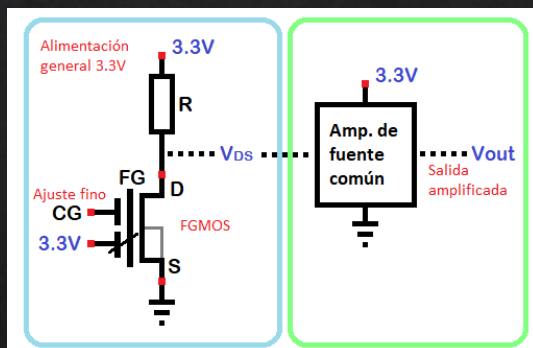
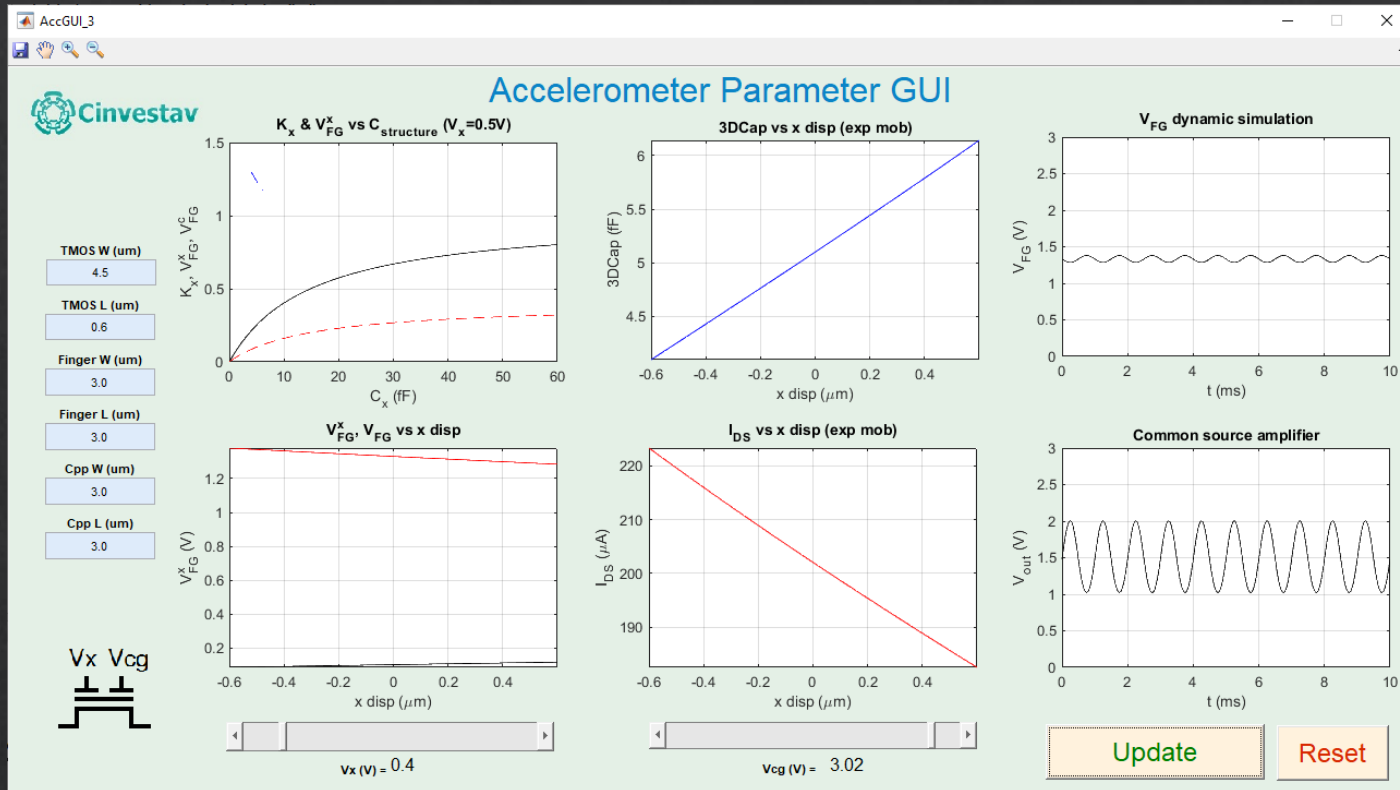
# Flujo de señales



# Metodología de diseño (extendida)





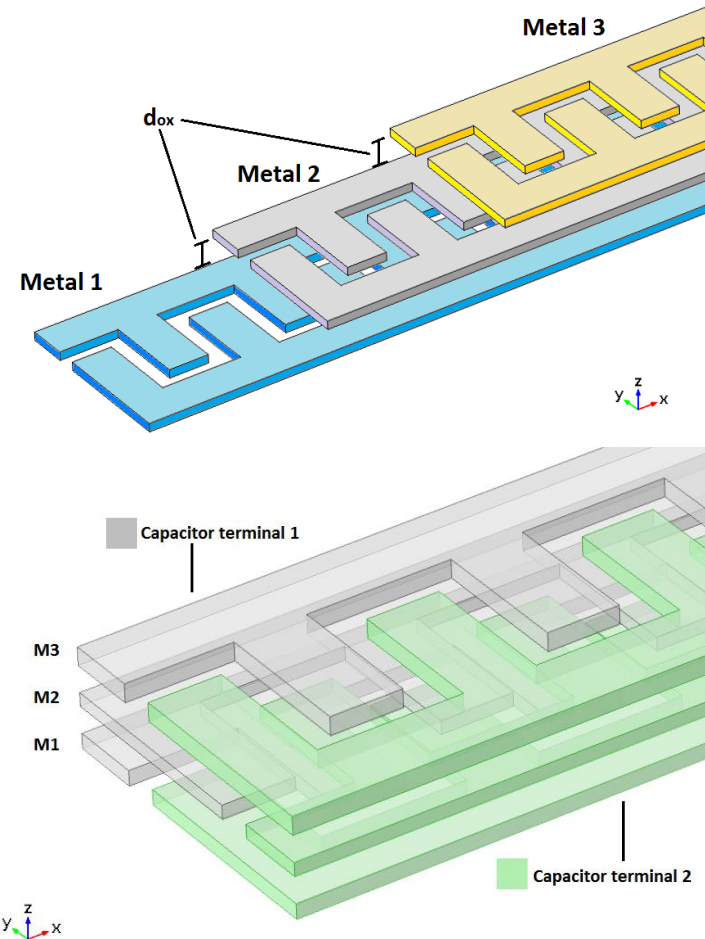


# Interfaz de usuario

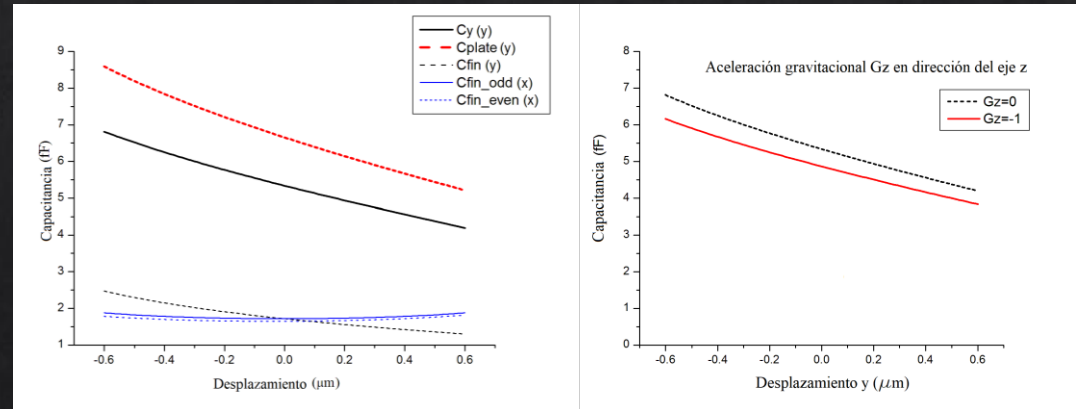
(cálculo automatizado / selección manual)

# Estructura capacitiva tridimensional

Se propone incrementar la capacitancia por unidad de área de diseño mediante una estructura inter-digitada tridimensional, la cual está pensada para la medición de variaciones capacitivas a lo largo de sus tres ejes.

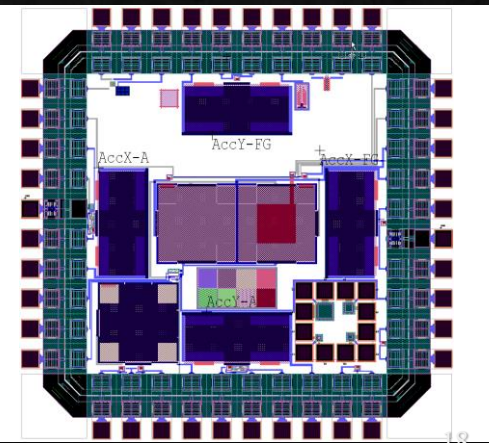
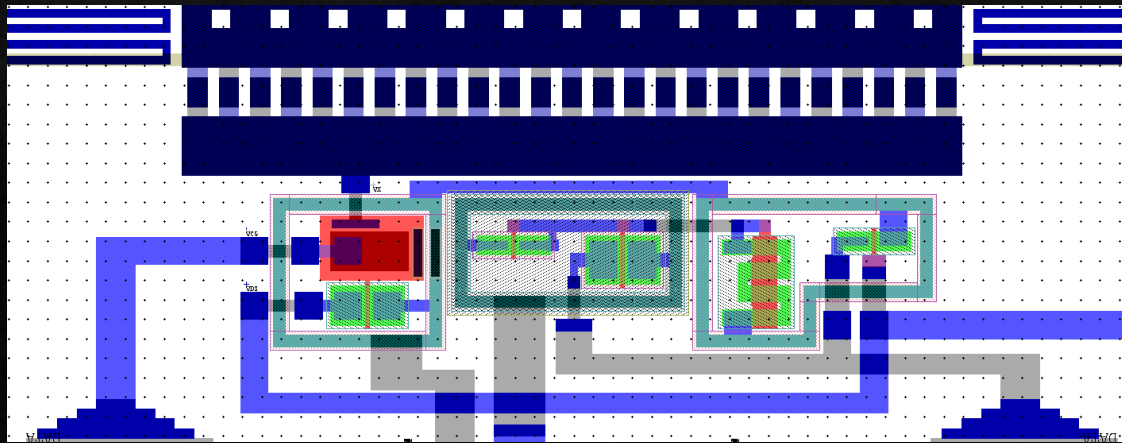
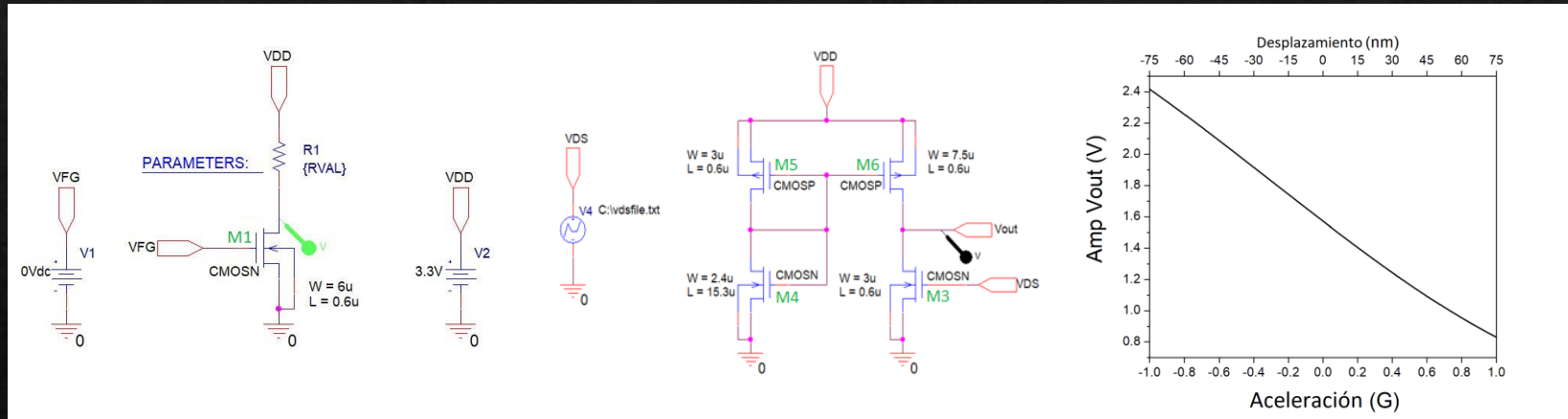


$$C_Y = \frac{n \cdot \epsilon_0 \cdot W_f \cdot (L_f - y)}{d_{ox} + z} + \frac{n \cdot \epsilon_0 \cdot W_f \cdot (L_f - y)}{d_{ox} - z} + \frac{(n-1) \cdot \epsilon_0 \cdot (t_{M1} + t_{M2} + t_{M3} - 3z) \cdot (L_f - y)}{d_{fin}} + \frac{n \cdot \epsilon_0 \cdot W_f \cdot (t_{M1} + t_{M2} + t_{M3} - 3z)}{d_{tip} + y}$$

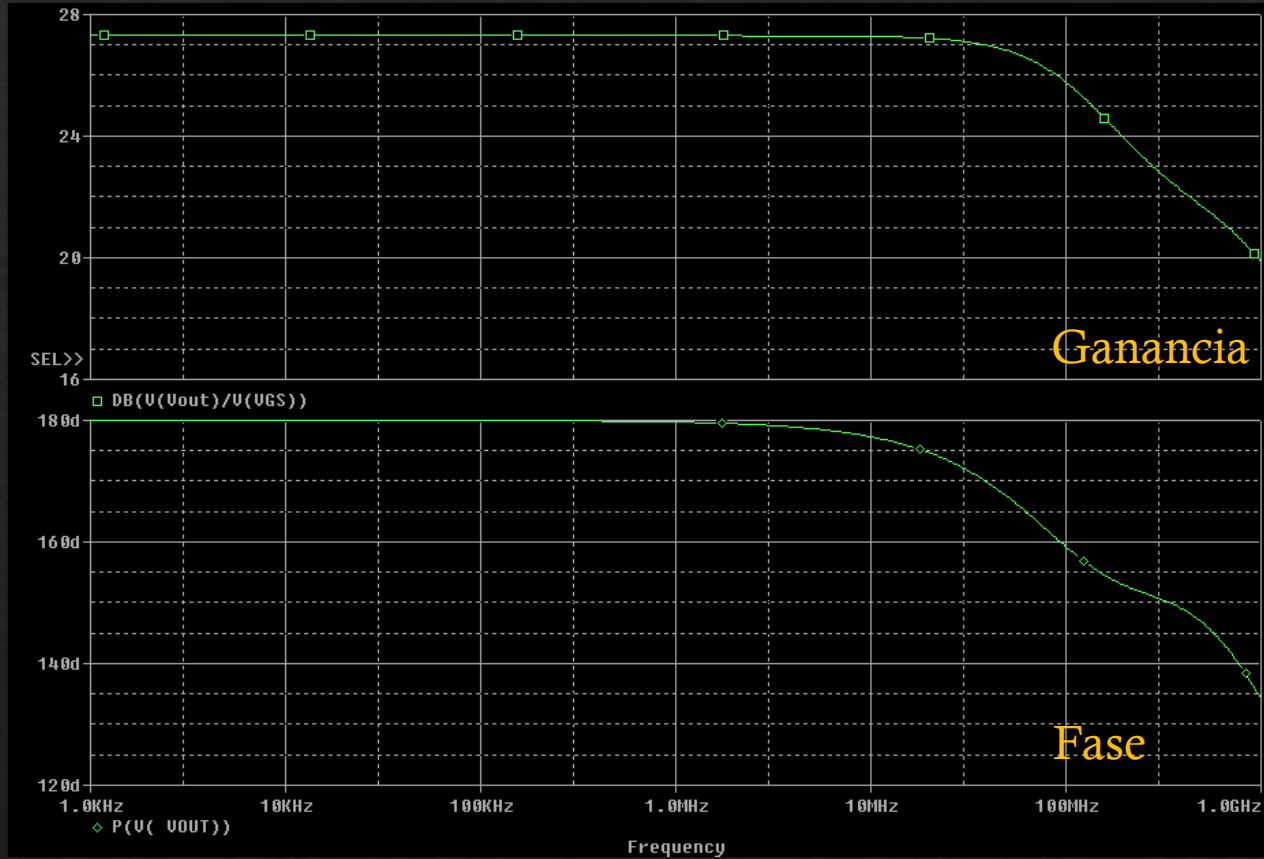


Simulación multi-física

# Simulación eléctrica y layout

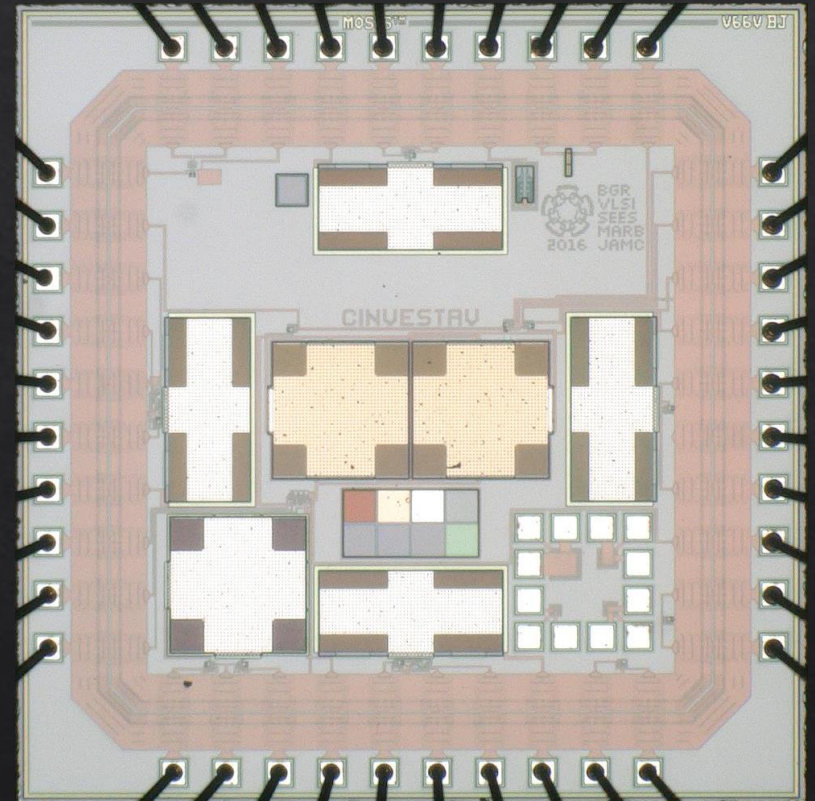
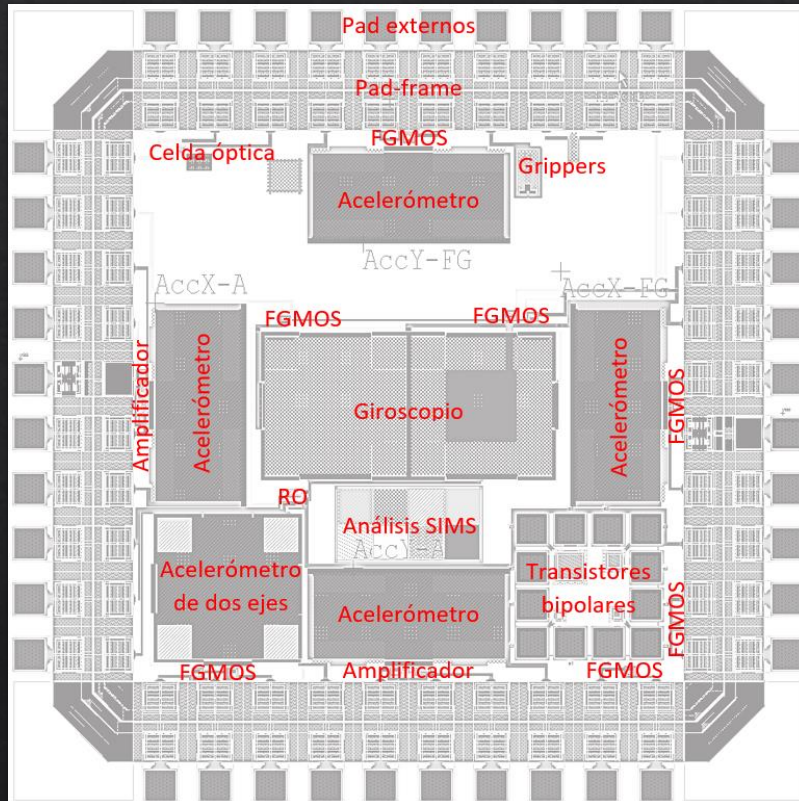


# Respuesta en frecuencia

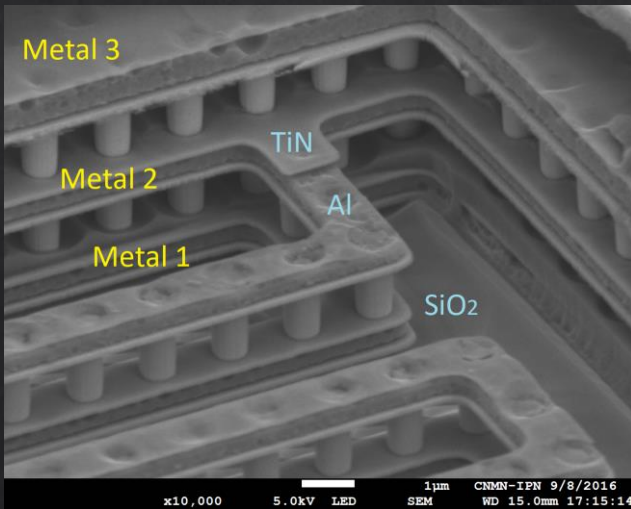
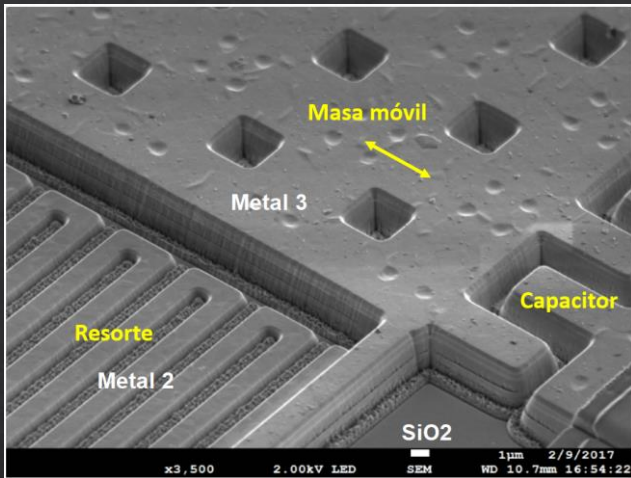




# Fabricación



# Micro-maquinado superficial

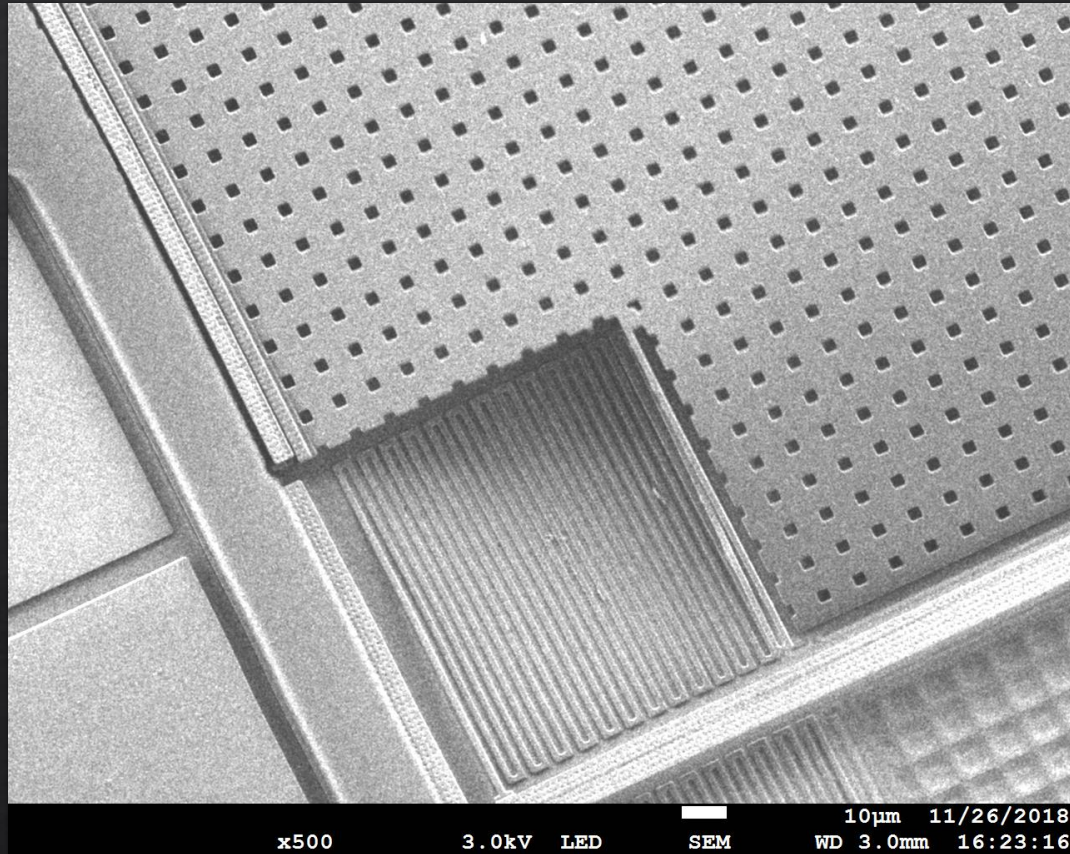


Abarca-Jiménez (2016)

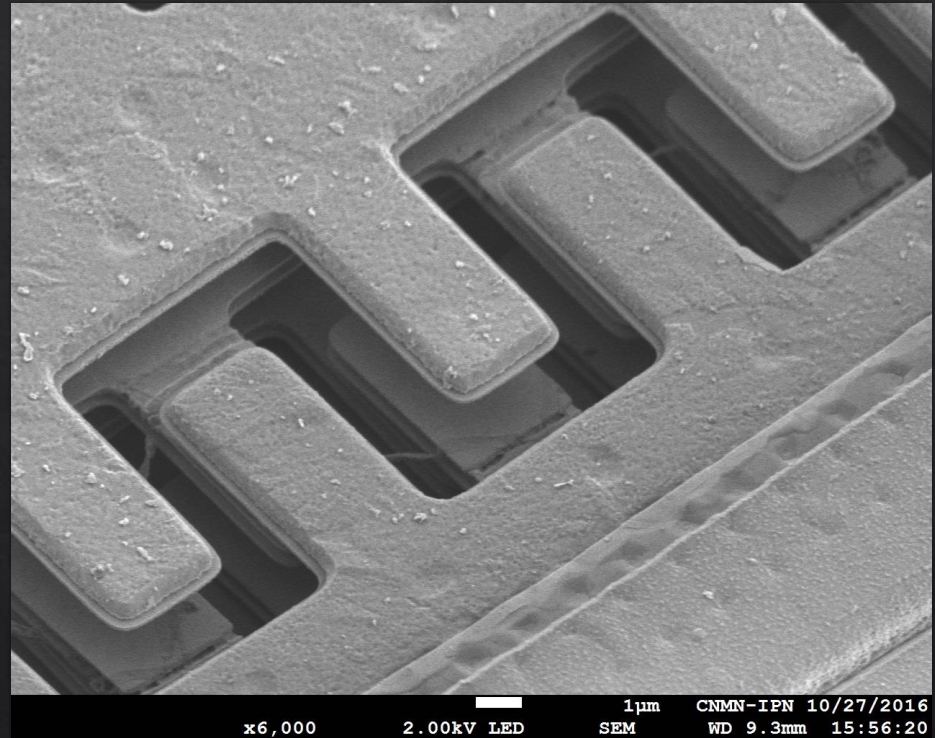
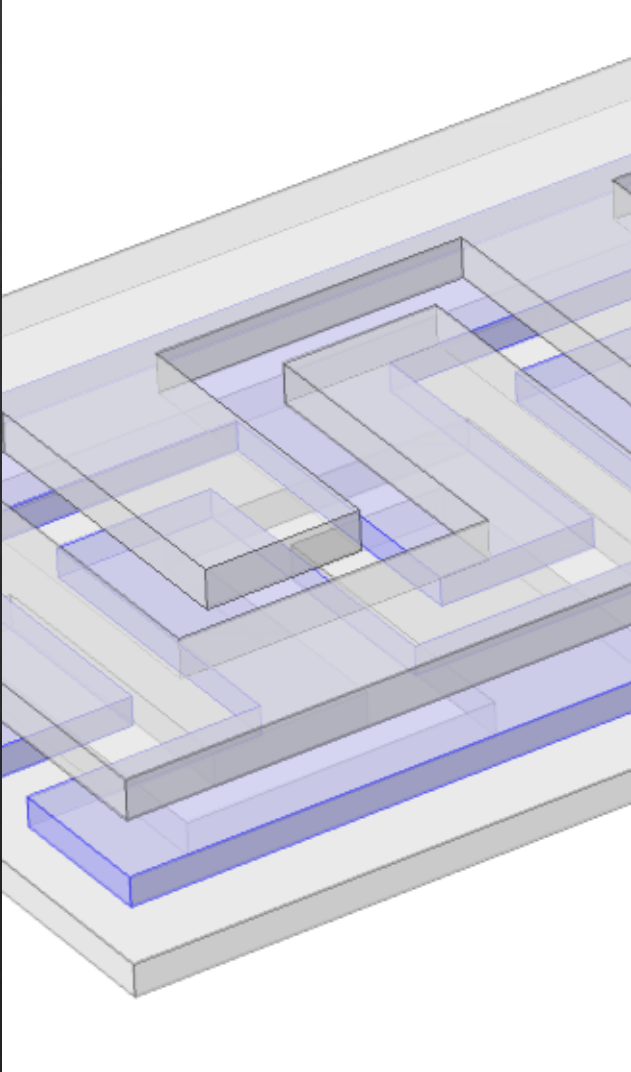
- ◇ Precalentar el horno a 120°C.
- ◇ Enjuagar cristalería con agua filtrada y secar con nitrógeno.
- ◇ Preparar las soluciones de enjuague:
  - ◇ 25% propanol 75% agua.
  - ◇ 50% propanol 50% agua.
  - ◇ 75% propanol 25% agua.
  - ◇ 100% propanol.
- ◇ Colocar chip en caja de Petri de plástico.
- ◇ Exponer el chip a Vapox Silox (1 gota es suficiente, dadas las dimensiones del chip) durante aproximadamente 15 minutos.
- ◇ Sumergir el chip en cada enjuague y agitar suavemente durante aproximadamente 1 minuto.
- ◇ Colocar el chip en una caja de Petri de Pyrex.
- ◇ 8. Secar el chip en el horno a 120°C durante aproximadamente 15 minutos.



# Resultados preliminares



# Liberación de estructuras

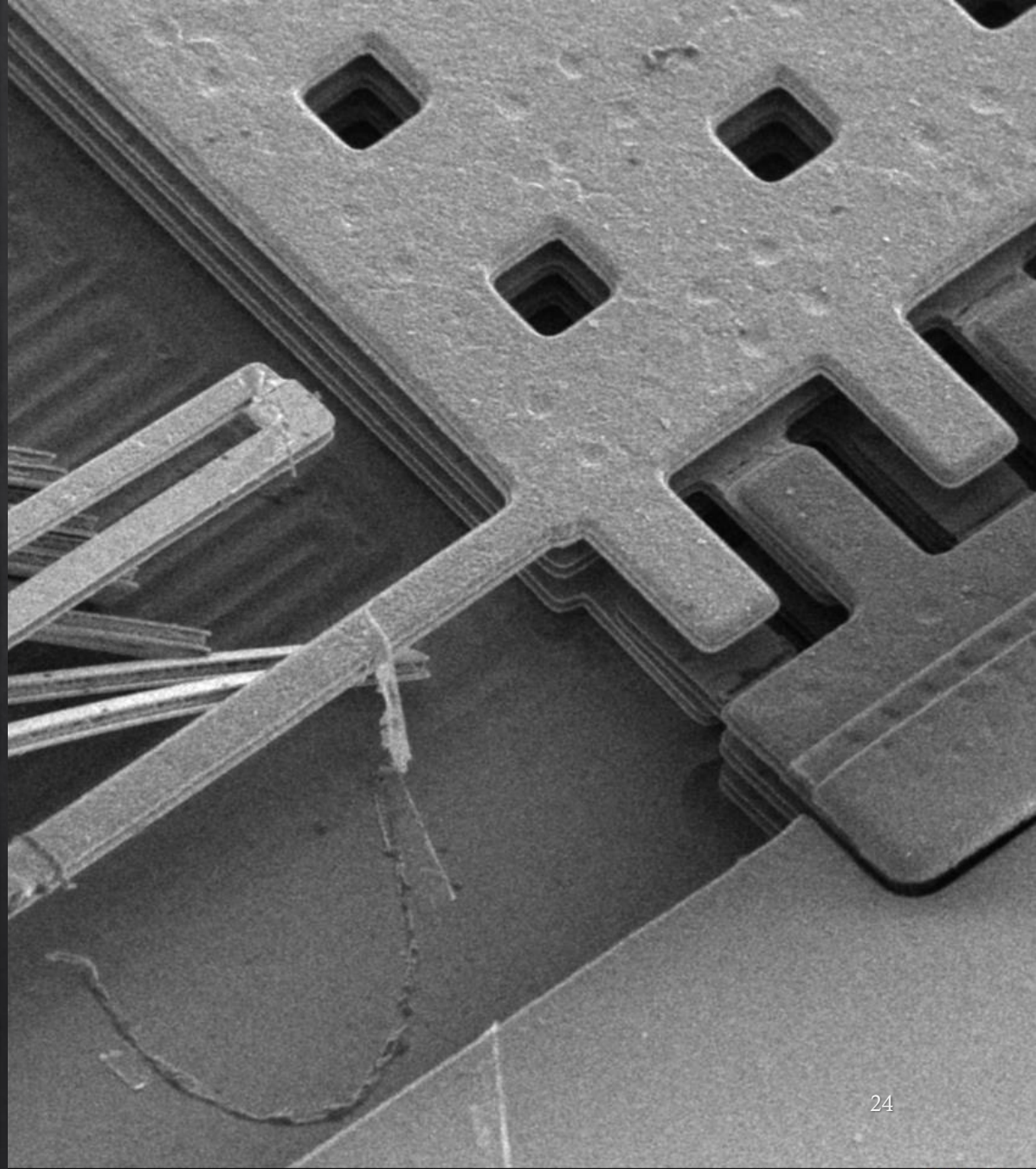


Micrografía SEM



# Daños estructurales

- ◊ Desprendimiento de materiales (¿pérdida de adherencia?)
- ◊ Tensiones residuales
- ◊ Inconsistencias en el micro-maquinado
- ◊ Degradación de reactivos



24

x2,500

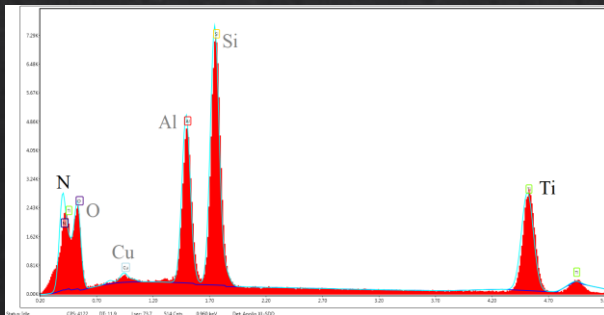
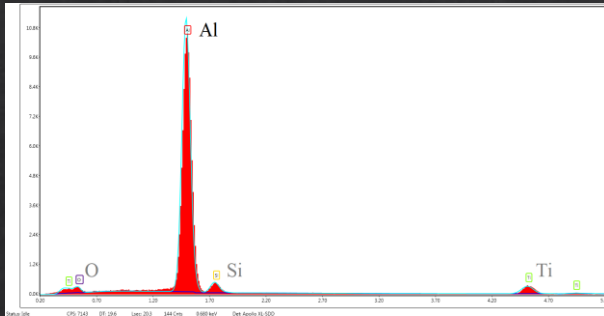
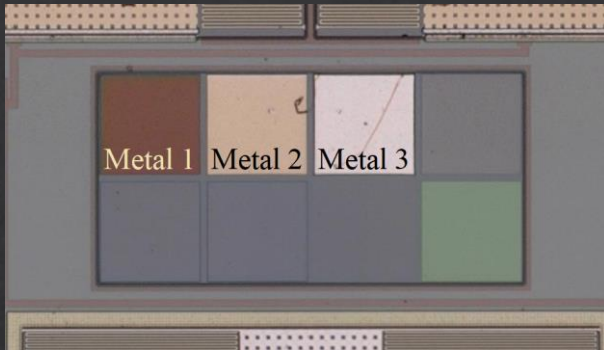
2.00kV LED

10µm  
SEM

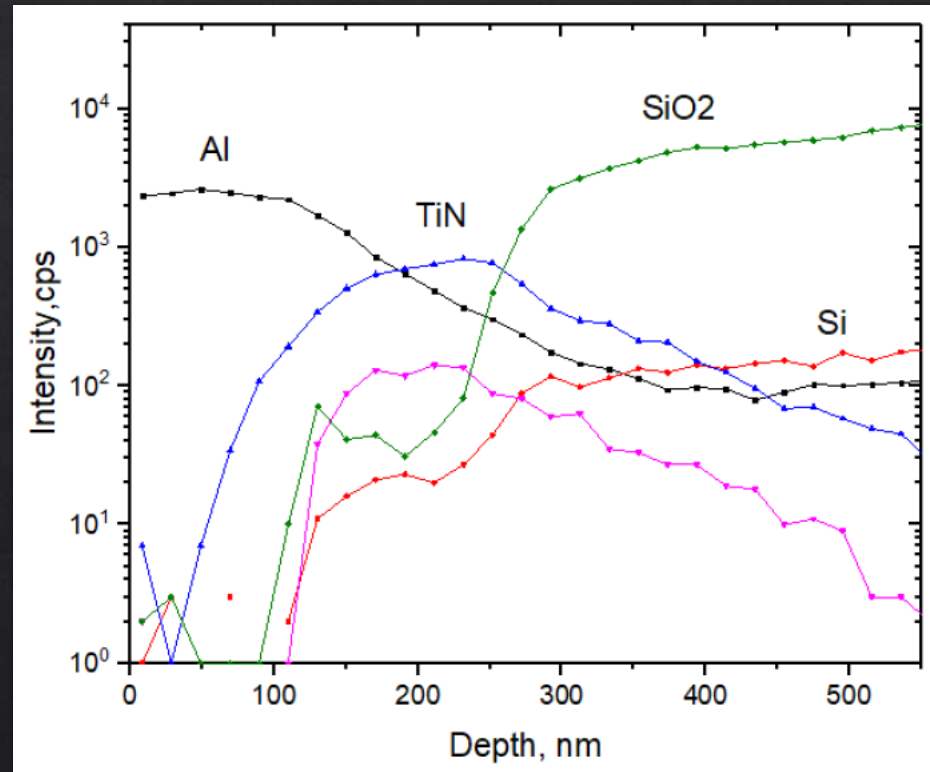
## Análisis de propiedades

Se encontró una serie de ~~dificultades~~ oportunidades para profundizar en el entendimiento de la influencia que tiene cada parámetro de diseño en el resultado final.

# Caracterización de las capas metálicas

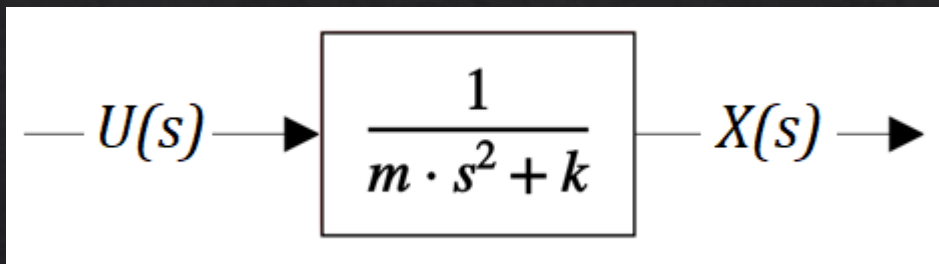
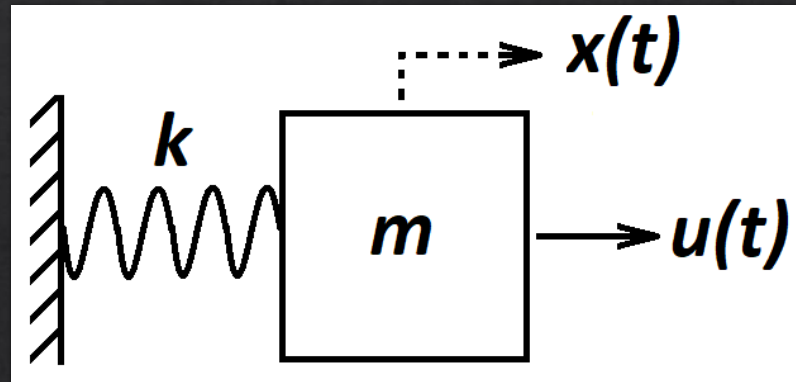


Análisis EDS



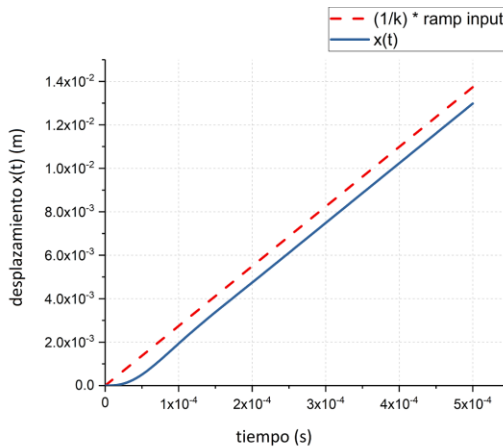
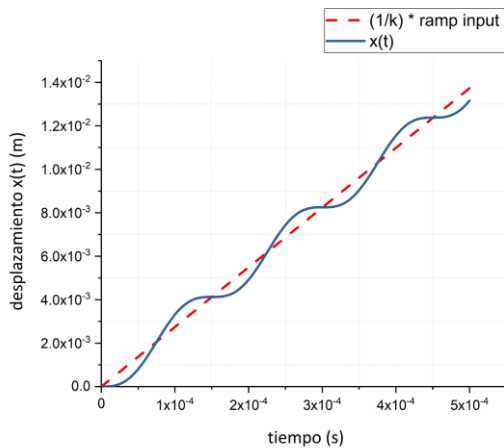
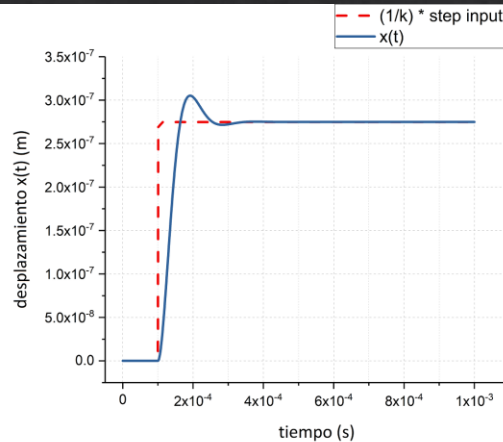
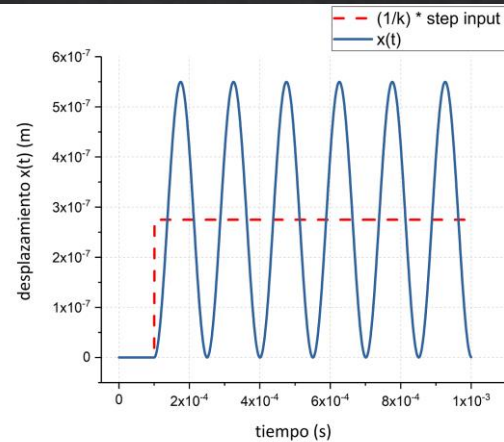
Análisis SIMS

# Modelado y simulación

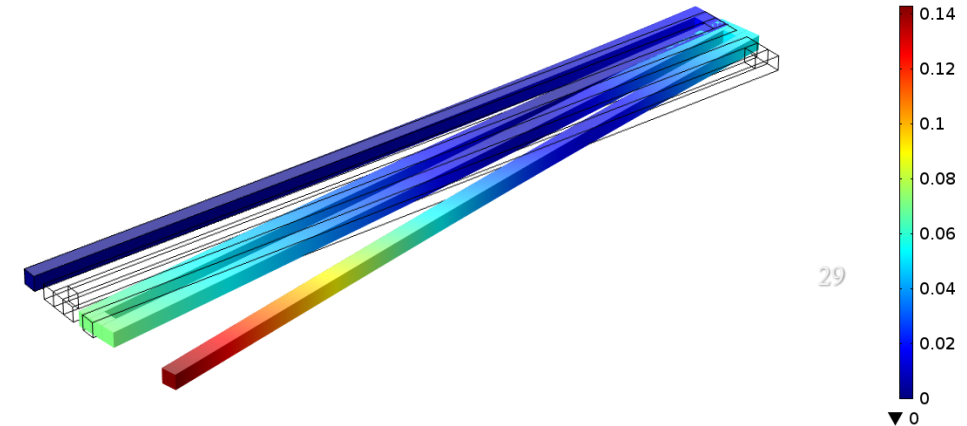
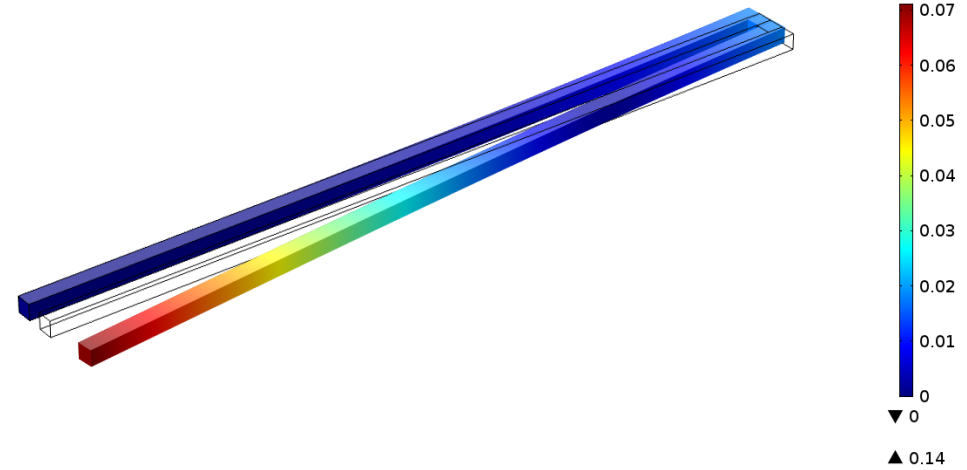
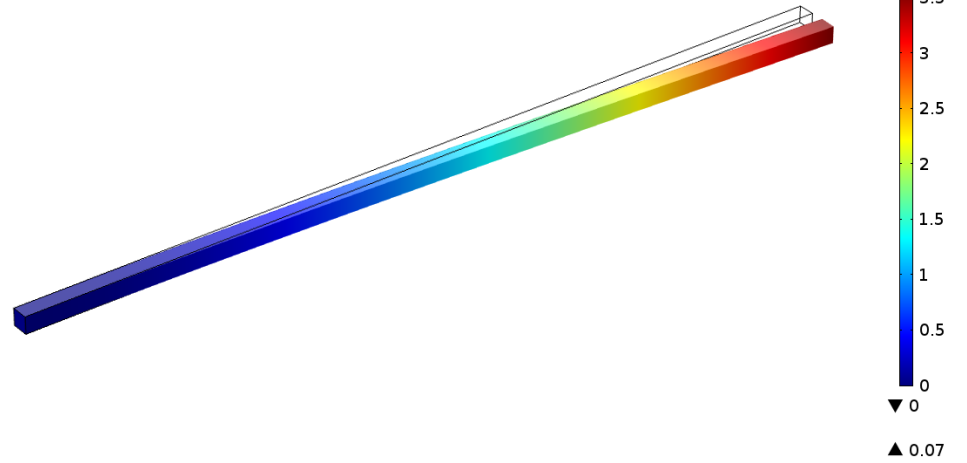
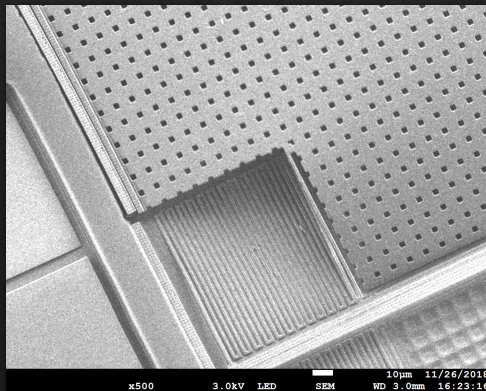
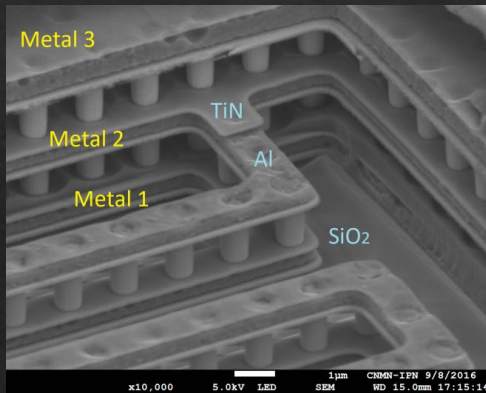




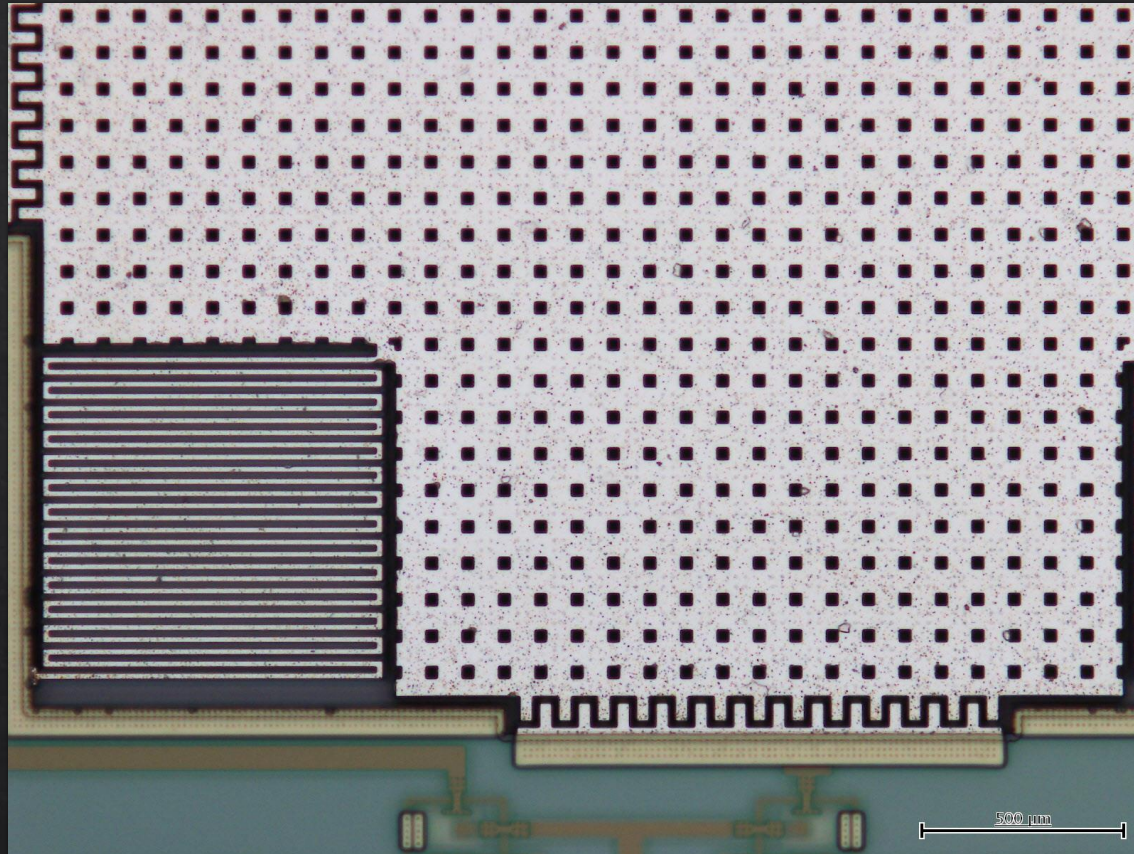
# Modelado y simulación



# Elección de resortes



# Ahorro de espacio (área de diseño)



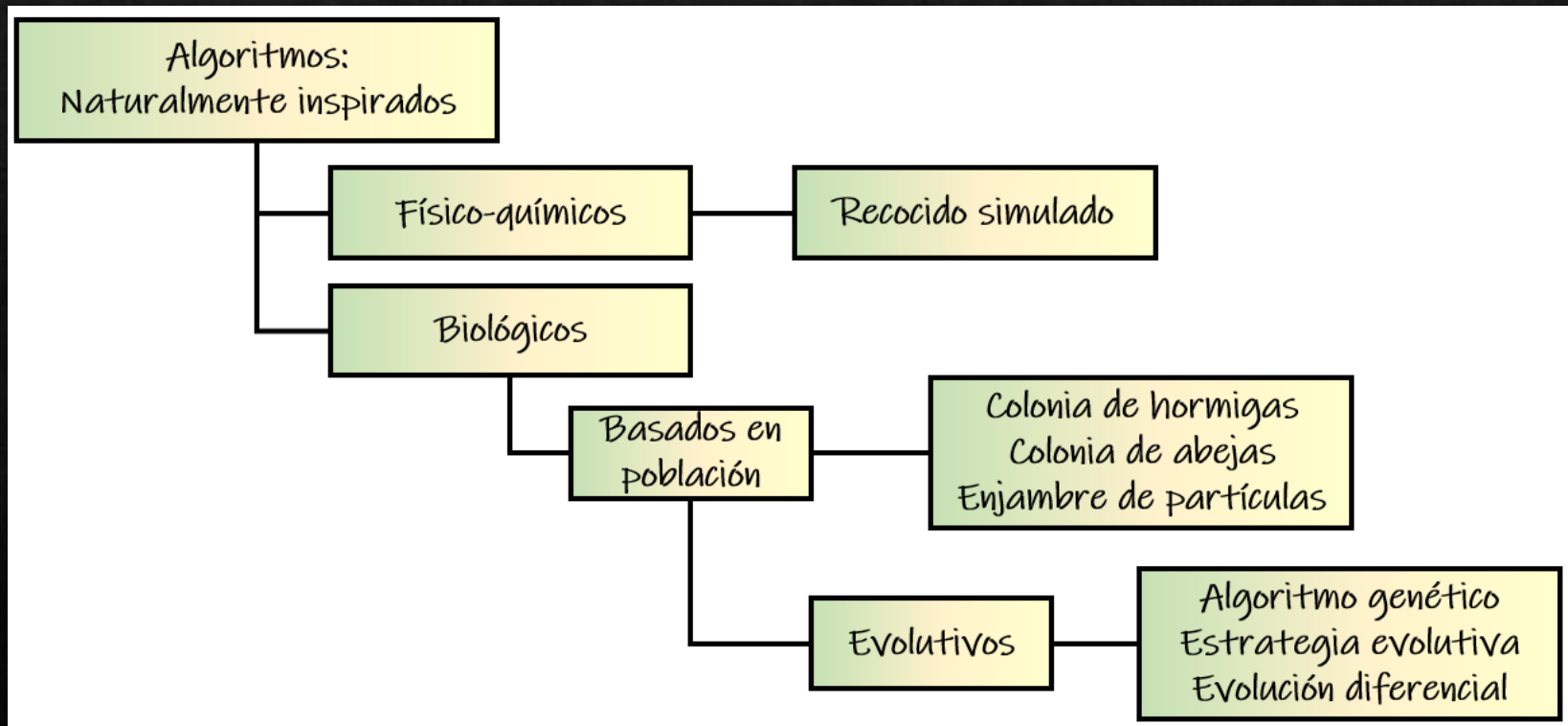


# Metaheurísticas

Herramientas versátiles y especialmente valiosas en problemas de diseño mecánico, donde las  $n$  variables de un problema de ingeniería con  $m$  objetivos a cumplir, son predominantemente geométricas y/o relacionadas a sus propiedades mecánicas.



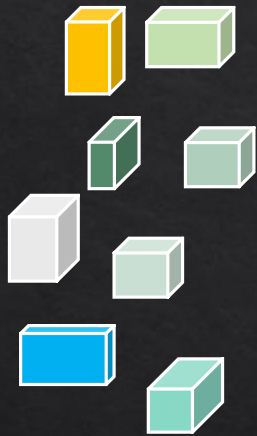
# Algoritmos (de optimización) naturalmente inspirados



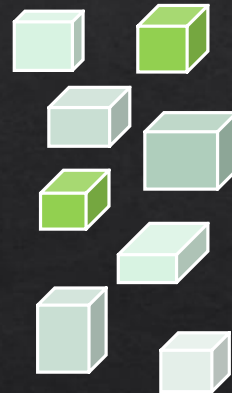
# Función objetivo en los algoritmos evolutivos

Ejemplo:  $C_{(x,y,z)} = 1 - |(x/y/z)|$

Población inicial (aleatoria)



- Selección
- Cruza
- Mutación
- Elitismo

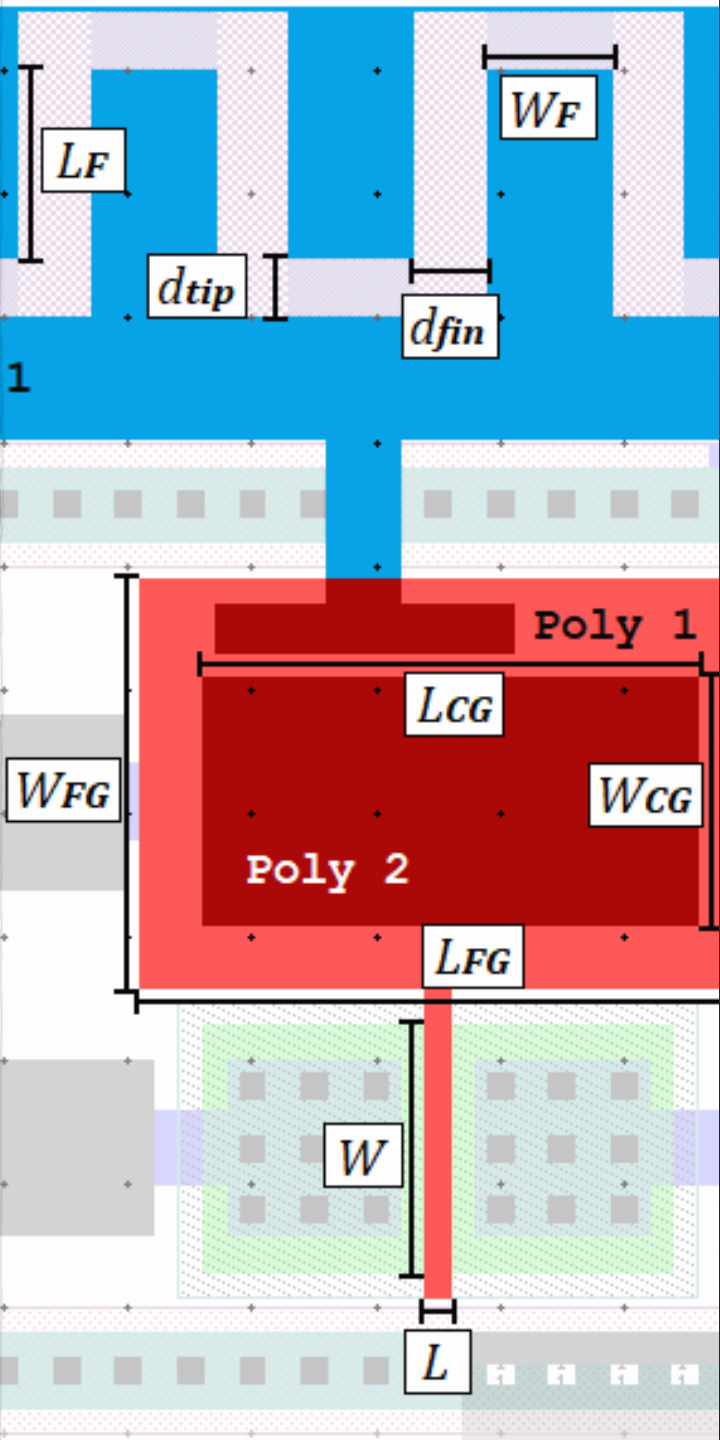


Óptimo



Generaciones





# Funciones objetivo

$$S_{acc} = \frac{\delta I_D}{\delta C_Y}$$

$$A_D = \sum A_i$$

$$S_{acc} = KP_n * \frac{W}{L} * \left( \frac{C_Y V_Y + C_{pp} V_{CG}}{C_Y + C_{pp} + C_{ox} + C_{fox}} - V_{TH} \right) * \left( \frac{C_{pp} V_Y + C_{ox} V_Y - C_{pp} V_{CG}}{(C_Y + C_{pp} + C_{ox} + C_{fox})^2} \right)$$

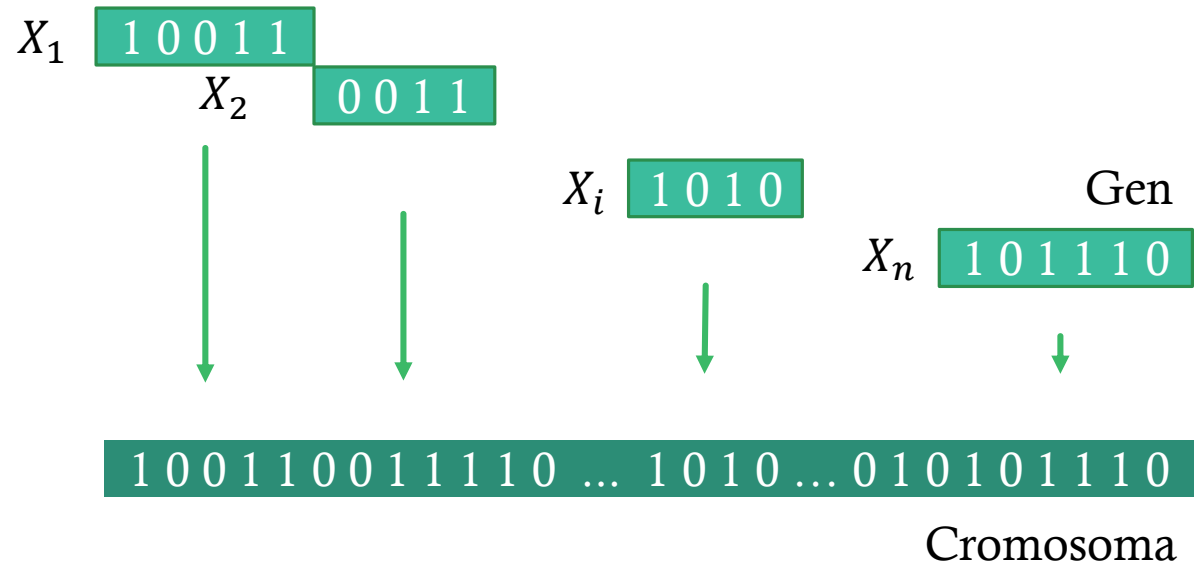
$$A_D = WL + W_{FG} L_{FG} + n(W_F L_F + 2d_{tip} W_F) + (n - 1)(d_{fin}(L_F + 2d_{tip}))$$

- ◊ Codificación
- ◊ Selección
- ◊ Cruza
- ◊ Mutación
- ◊ Elitismo

## Operadores genéticos



- ◊ Codificación
- ◊ Selección
- ◊ Cruza
- ◊ Mutación
- ◊ Elitismo



# Operadores genéticos

- ◊ Codificación
- ◊ Selección
- ◊ Cruza
- ◊ Mutación
- ◊ Elitismo

1 0 0 1 1 0 0 1 ... 1 1 0 1 1 0 1 0 ... 0 1 0 1 0 1 1 1 0

Individuo 1

1 1 1 1 0 1 0 1 ... 1 0 1 0 1 0 1 1 ... 1 1 0 0 0 0 1 1 0

Individuo 2

1 0 0 1 1 0 0 1 ... 1 1 0 1 1 0 1 0 ... 0 1 0 1 0 1 1 1 0

1 1 1 1 0 1 0 1 ... 1 0 1 0 1 0 1 1 ... 1 1 0 0 0 0 1 1 0

1 0 0 1 1 0 0 1 ... 1 1 0 1 1 0 1 1 ... 1 1 0 0 0 0 1 1 0

1 1 1 1 0 1 0 1 ... 1 0 1 0 1 0 1 0 ... 0 1 0 1 0 1 1 1 0

Nuevos individuos

# Operadores genéticos

- ◊ Codificación
- ◊ Selección
- ◊ Cruza
- ◊ Mutación
- ◊ Elitismo

1 0 0 1 1 0 0 1 ... 1 1 0 1 1 0 1 1 ... 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0

Mutación



Individuo 1: [10010110...00101101]

Individuo 2: [11101110...00111000]



Individuo i: [00001110...10101111]

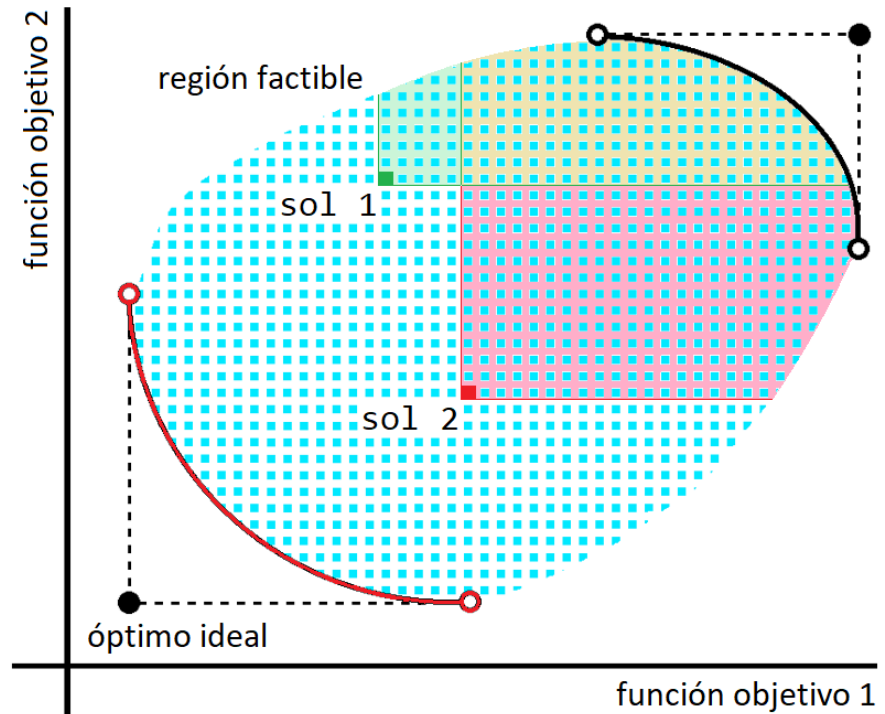
Individuo n: [10110100...11101101]

# Operadores genéticos

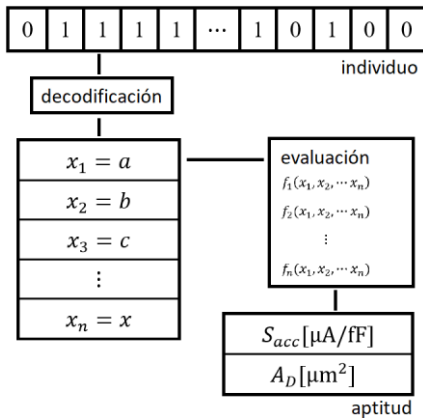
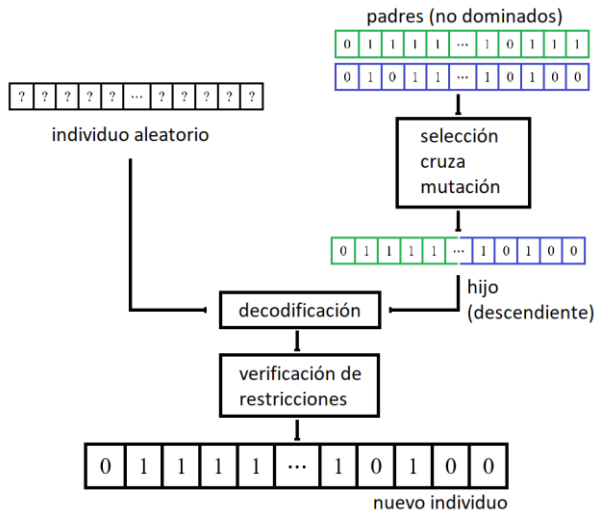
# Optimalidad de Pareto

Se establece en función a la cercanía a un óptimo ideal.

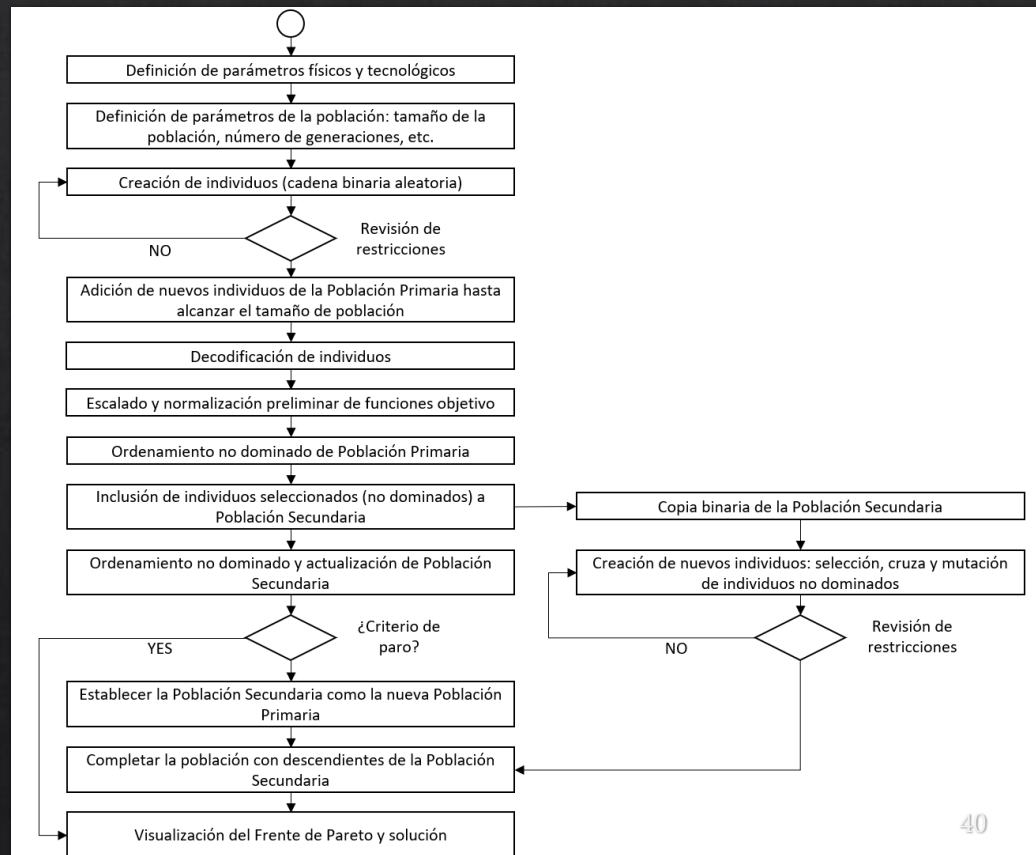
Cuando los objetivos de optimización están en mutuo conflicto, el **Frente de Pareto** se genera con el conjunto de soluciones no dominadas y delimita el espacio de búsqueda de la región factible.







# Algoritmo genético



Ind\_1 : [1001...1101]  $\rightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Ind\_2 : [1110...1000]  $\rightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Ind\_3 : [1110...1000]  $\rightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Ind\_4 : [1110...1000]  $\rightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Ind\_i : [0000...1111]  $\rightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Ind\_n-2: [1110...1000]  $\rightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Ind\_n-1: [1110...1000]  $\rightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Ind\_n : [1011...1101]  $\rightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n)$



Ind\_2 : [1110...1000]

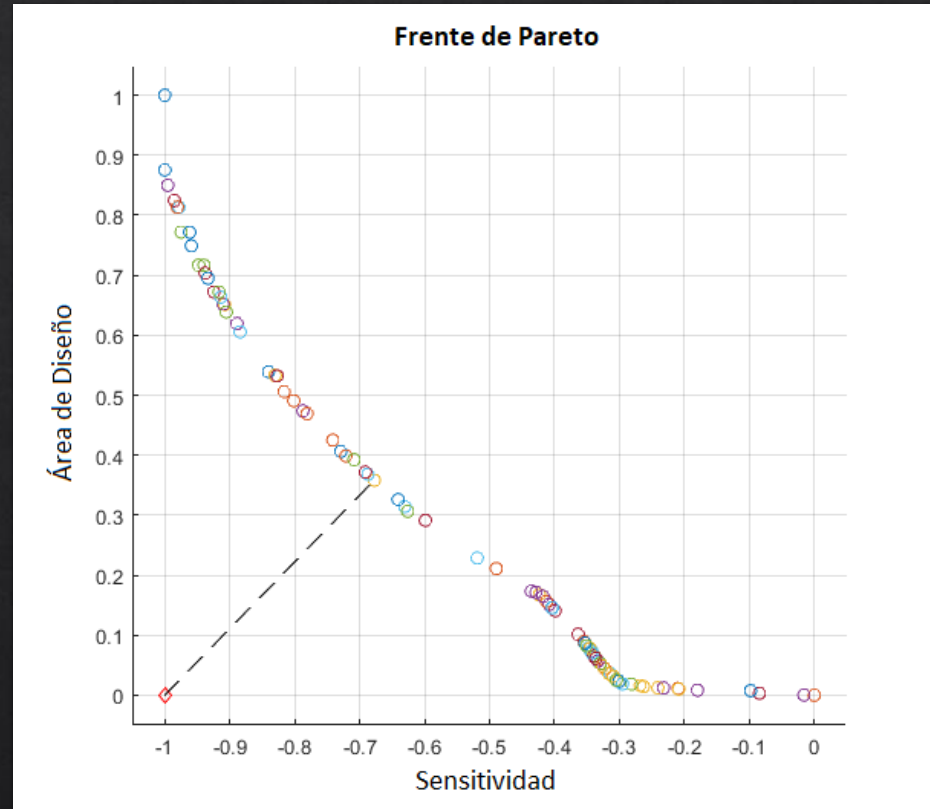
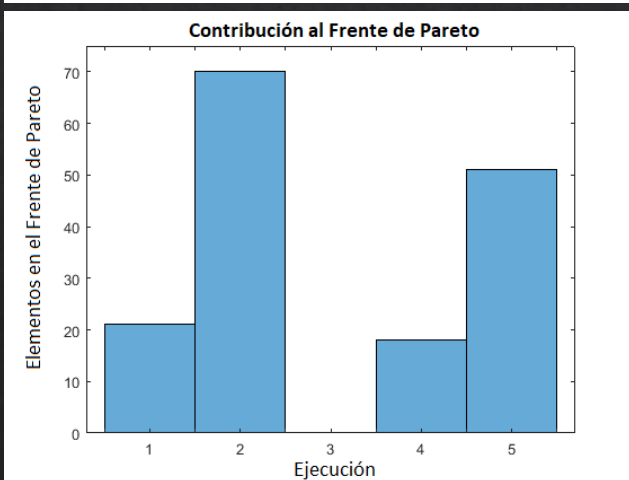
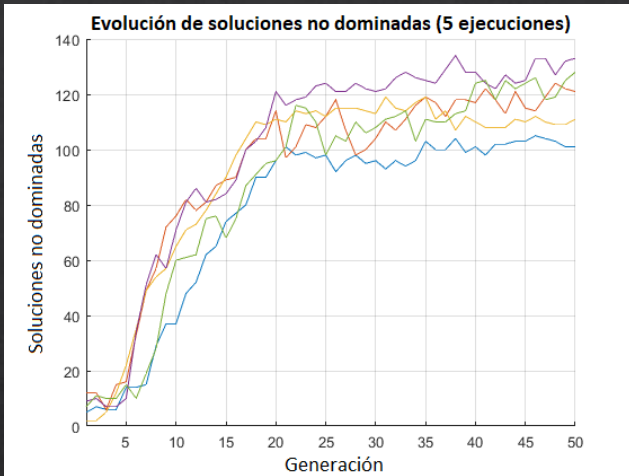
Ind\_3 : [1110...1000]

Ind\_m : [0000...1101]

Ind\_n : [1011...1101]

# Ordenamiento no dominado

# Frente de Pareto



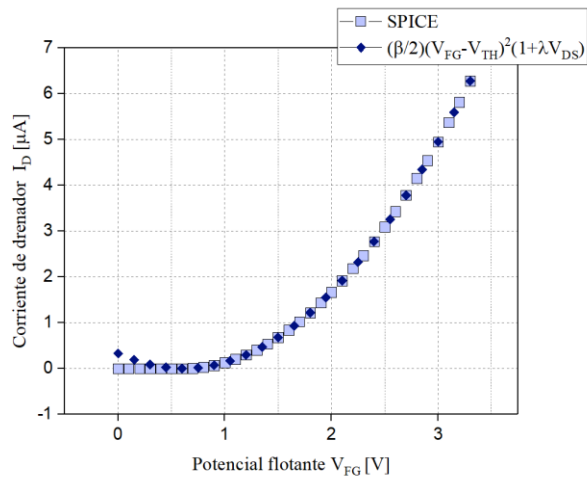
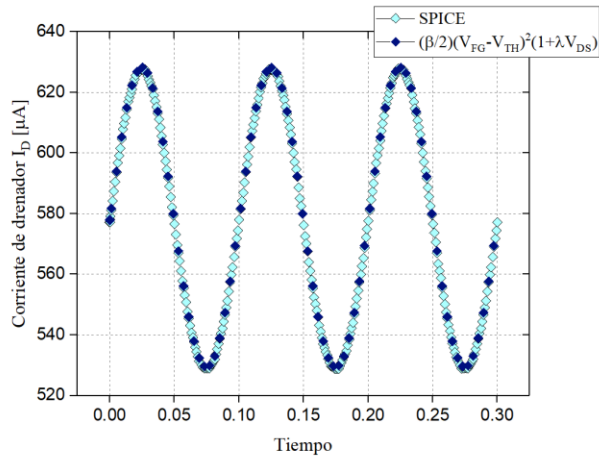
# Resultados

| Conj. | Total<br>ejec. | Tamaño<br>Pob | Total<br>Gens. | Sols.<br>ND | Aptitud<br>( $\mu A/fF, \mu m^2$ )      |
|-------|----------------|---------------|----------------|-------------|-----------------------------------------|
| A     | 10             | 1000          | 100            | 83          | $S_{acc} = -101.55$<br>$D_A = 328.32$   |
| B     | 10             | 2000          | 100            | 69          | $S_{acc} = -102.144$<br>$D_A = 380.16$  |
| C     | 10             | 1000          | 200            | 71          | $S_{acc} = -101.414$<br>$D_A = 313.740$ |
| D     | 20             | 1000          | 100            | 79          | $S_{acc} = -101.018$<br>$D_A = 328.640$ |
| E     | 10             | 3000          | 100            | 87          | $S_{acc} = -101.872$<br>$D_A = 355.230$ |

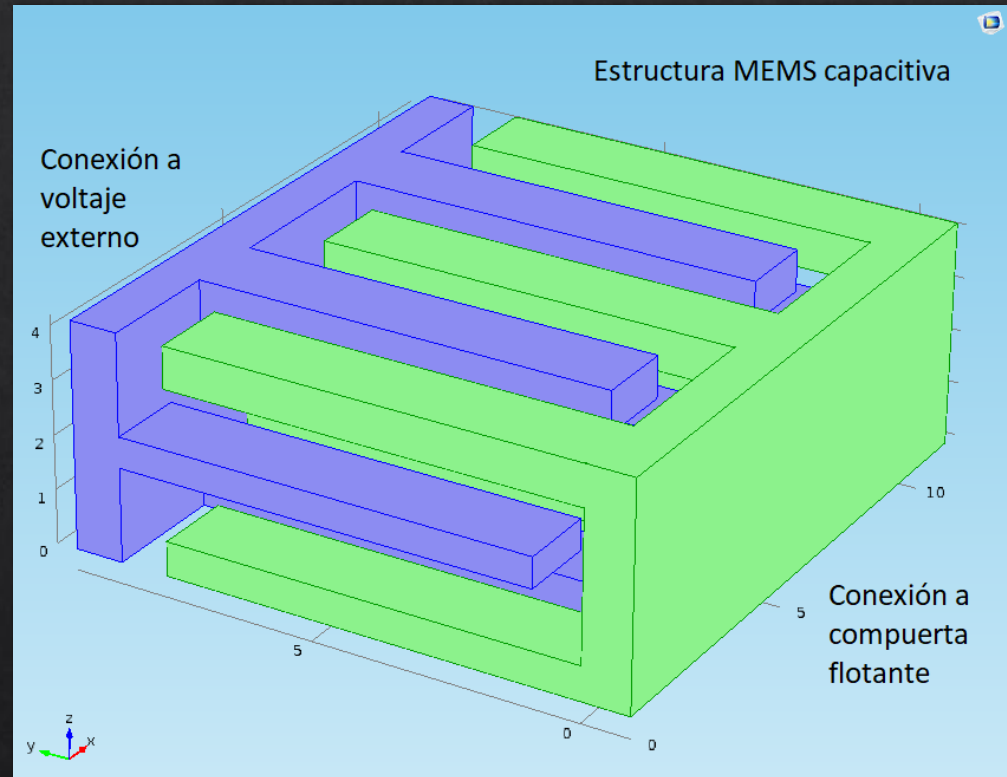
| Conj. | Total<br>ejec. | Tamaño<br>Pob | Total<br>Gens. | Sols.<br>ND | Aptitud<br>( $\mu A/fF, \mu m^2$ )     |
|-------|----------------|---------------|----------------|-------------|----------------------------------------|
| F     | 5              | 1000          | 50             | 160         | $S_{acc} = -98.164$<br>$D_A = 121.416$ |

| Parámetro                        | Valor | Unidades |
|----------------------------------|-------|----------|
| Ancho de canal                   | 9.0   | $\mu m$  |
| Longitud de canal                | 0.6   | $\mu m$  |
| Ancho de compuerta flotante      | 3.6   | $\mu m$  |
| Longitud de compuerta flotante   | 5.4   | $\mu m$  |
| Ancho de compuerta de control    | 2.7   | $\mu m$  |
| Longitud de compuerta de control | 4.5   | $\mu m$  |
| Número de dedos                  | 5     | $\mu m$  |
| Ancho de dedo                    | 1.5   | $\mu m$  |
| Longitud de dedo                 | 6.9   | $\mu m$  |
| Distancia a punta de dedo        | 0.9   | $\mu m$  |
| Distancia entre dedos            | 0.9   | $\mu m$  |

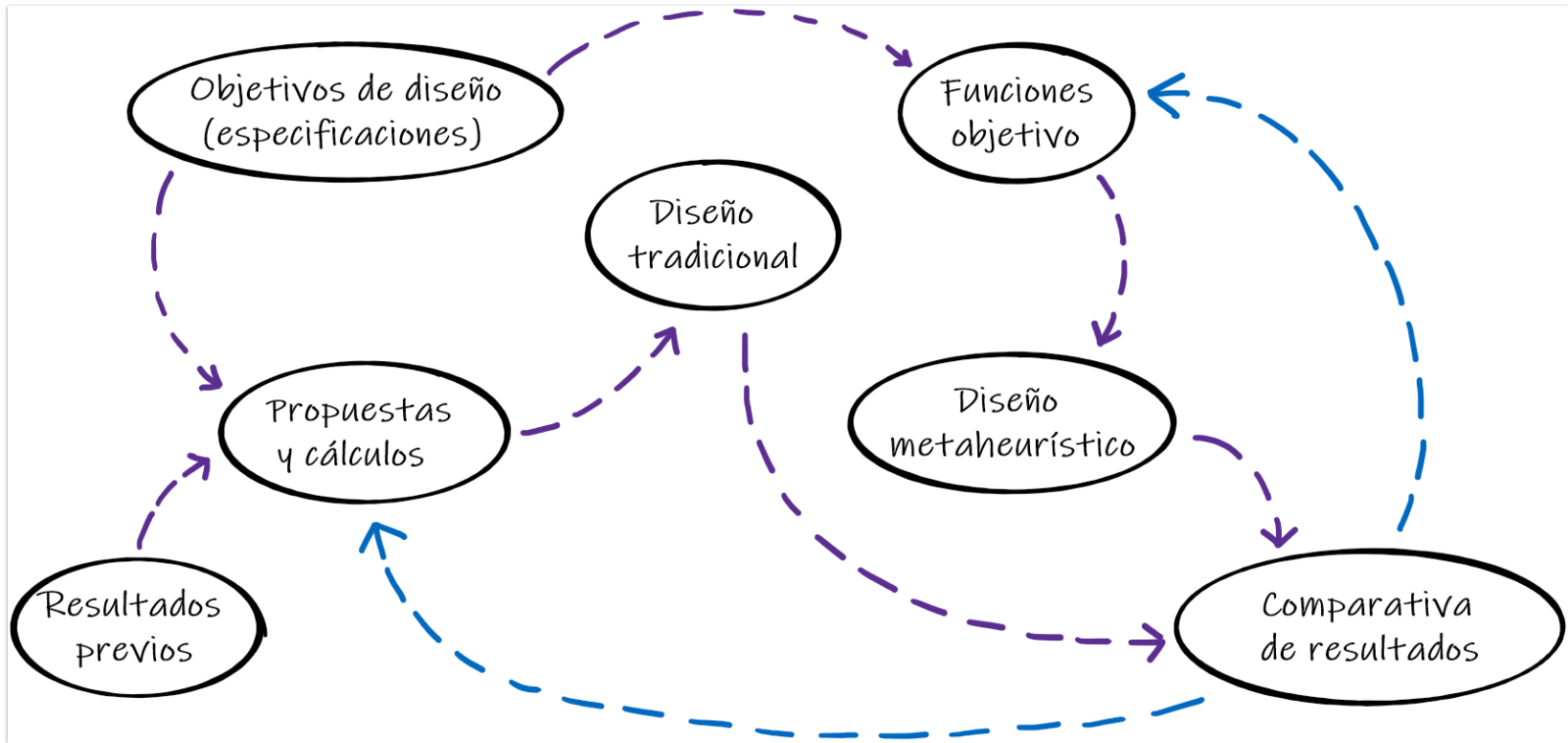




# Validación



# En resumen...

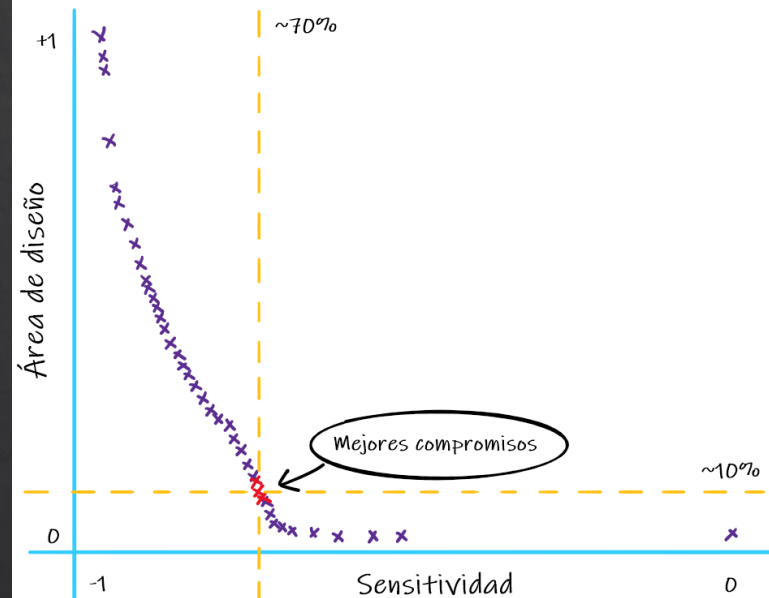


# Resultados y aportaciones

- ◆ Se establecen alternativas de metodología para el diseño de un acelerómetro capacitivo CMOS-MEMS, que garantiza de manera computacional solución con el mejor compromiso bajo los criterios de la optimalidad de Pareto.
- ◆ El chip fabricado permitió caracterizar la composición de las capas metálicas, resultando cada una de ellas diferente en estructura y propiedades, además de verse afectadas de diversas por los post-procesos de micro-maquinado.
- ◆ Se validó el funcionamiento de la etapa de acondicionamiento de señales, capaz de desarrollar una sensibilidad de aproximadamente  $0.8\text{V/G}$ .
- ◆ Se establecieron los parámetros básicos y de mayor relevancia en el modelado matemático de un problema de diseño con dos objetivos en conflicto, en un contexto de sistemas MEMS.

# Prueba de concepto

Se verifica la pertinencia del uso de metaheurísticas bio-inspiradas, como **herramienta**, en la automatización parcial o total del proceso de diseño de sensores inerciales capacitivos CMOS-MEMS.





# Conclusiones

- ◆ Los acelerómetros, en sus diferentes variantes, son una herramienta fundamental en la industria moderna, no solo por su versatilidad, sino también por su gran confiabilidad, lo que les permite ser protagonistas en seguridad vehicular y control automático de procesos.
- ◆ Durante el presente trabajo se abordaron diferentes aristas del diseño de un acelerómetro CMOS-MEMS contribuyendo a la ampliación y diversificación del catálogo de técnicas de las que dispone el grupo de Sistemas VLSI para su labor formativa y de investigación.
- ◆ La implementación de una estrategia meta-heurística de diseño de circuitos integrados habilita un acercamiento computacional más completo al espacio de soluciones de un problema de ingeniería, siendo el reto entonces, desarrollar habilidad en el modelado de funciones objetivo.

# Productos de investigación

- ◇ 2021 ISSN: 1432-1858 “Two-objective metaheuristic optimization for floating gate transistor-based CMOS-MEMS inertial sensors” B. Granados-Rojas, M. A. Reyes-Barranca et al. Microsystem Technologies, DOI: 10.1007/ s00542-020-05194-w
- ◇ 2020 Latin-American Electron Devices Conference, San José, Costa Rica.
- ◇ 2019 International Astronautical Congress, Washington DC, EEUU.
- ◇ 2016-2020 CCE Cinvestav, Ciudad de México, México.

# Trabajo futuro

- ◆ **Profundizar en el catálogo y manejo de técnicas** de optimización evolutiva multi-objetivo (**EMOO**) a fin de determinar cuáles de ellas resultan más apropiadas para cada uno de los retos de diseño **en el campo de los sensores inerciales MEMS**.
- ◆ Obtener una **mayor cantidad de detalle en el modelo matemático de funciones objetivo** y ampliar la búsqueda de aplicaciones compatibles con las técnicas propuestas.
- ◆ **Extender el modelado del dispositivo**, incluyendo expresiones para los resortes, etapas de acondicionamiento e interconexiones a fin de aprovechar las capacidades del algoritmo en la generación de una librería de celdas de medición inercial óptimas, bajo los criterios del cómputo evolutivo.
- ◆ Proponer **interfaces de usuario que permitan automatizar total o parcialmente el diseño de celdas MEMS** acordes a las necesidades de cada proyecto, ejecutando en un segundo plano las técnicas y algoritmos propuestos en este trabajo.





# Gracias por su atención

-Benito Granados Rojas-