

## Parámetros de diseño en conmutadores electrostáticos MEMS

Walter J. Aróztegui, Jorge R. Osio, José A. Rapallini, Antonio A. Quijano  
Centro de Técnicas Analógico Digitales (CeTAD)  
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata  
Calle 48 y 116, La Plata 1900, Argentina  
walter.aroztegui@gmail.com

*Palabras clave: Microsistemas, sistemas micro-electromecánicos, RF-MEMS, diseño, conmutadores*

### Resumen

Se presenta en este trabajo un análisis generalizado de parámetros de sistemas micro-electromecánicos así como la interdependencia entre ellos que se evidencia en el proceso de diseño, en particular se consideran las características de micro-conmutadores electrostáticos, siendo éste una de los dispositivos estructuralmente más simples que se pueden encontrar entre componentes RF-MEMS. Se muestra también a modo de ejemplo, el diseño de un conmutador serie del tipo “cantilever”.

### INTRODUCCIÓN

El diseño de cualquier sistema, dispositivo o componente microelectromecánico implica un compromiso entre gran cantidad de variables y parámetros de diferentes tipos cuya interrelación produce los efectos de funcionamiento final, donde se acentúan algunas características en detrimento de otras. En estos dispositivos, las características mecánicas están profundamente entrelazadas con las características eléctricas. Tomaremos como referencia para describir los parámetros de diseño un tipo de componente de los más simples entre la variedad de MEMS como lo son los conmutadores o switches en inglés de actuación electrostática y donde aún a partir de su simpleza se puede evidenciar la complejidad subyacente.

TABLA I. PROPIEDADES DE CONMUTADORES EN DISTINTAS TECNOLOGÍAS.

	Relay	MOSFET	Diodo PIN	MMIC	MEMS
T.de trans.(ns)	--	--	300	5	--
Veloc.de conmut.(s)	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-9}$ a $10^{-8}$	$650 \cdot 10^{-9}$	$25 \cdot 10^{-9}$	$10^{-6}$
Voltaje (V)	100-200	5-50	3-5	--	3-60
Corriente ( $\mu$ A)	1-2	< 10	10000	--	< 10
Resist. contact. ( $\Omega$ )	0.005-0.075	< 1	1	--	3-5
Figura de Mérito (Ghz)	--	300-400	1500-2000	--	>3000
Ciclos de Vida	$10^7$ - $10^8$	$>10^9$	--	--	$>10^{13}$
Pérdidas a 1Ghz (dB)	0.25	0.5-1.0	0.5-1.0	1.1	0.1
Tamaño ( $\text{mm}^2$ )	--	1-5	0.1	--	<0.1
Corriente total (mA)	60	--	30	0.15	--
Voltaje de Alim. (V)	+12	--	$\pm 5$	+5	--
A.deBanda (Mhz)	dc a 1200	--	20-2000	5-4000	dc-40000

El conmutador quizás sea el componente MEMS más desarrollado, son simples pero vitales en un sinnúmero de aplicaciones electrónicas. Es simplemente un dispositivo para cerrar o abrir un circuito eléctrico, con la importancia que esto involucra. Han podido conjugar las mejores características de aquellos desarrollados en estado sólido como así los puramente mecánicos y sobreponerse a algunas de sus desventajas, tal es el caso del manejo de potencia y las pérdidas resistivas en los primeros como la baja velocidad de conmutación y tamaño en los segundos. En la TABLA I podemos observar una comparación entre algunas propiedades de los conmutadores en las distintas tecnologías con los que se implementan según se reporta en [8][13] y [14].

Para lograr muchas de estas características en un conmutador electrostático serie, como dijimos que analizaremos por su sencillez, se necesita combinar adecuadamente variables de diseño del tipo de:

- |   |   |
|---|---|
| 1. Materiales de substrato, estructuras móviles y contactos | 11. Distancia entre electrodos (gap)                  |
| 2. Fuerza de adhesión                                       | 12. Constante elástica                                |
| 3. Resistencia de contacto                                  | 13. Deformación                                       |
| 4. Fuerza de contacto                                       | 14. Variación de temperatura                          |
| 5. Confiabilidad de contacto                                | 15. Pérdidas dependientes de la frecuencia            |
| 6. Fuerza electrostática                                    | 16. Aislamiento                                       |
| 7. Fuerza de restauración                                   | 17. Atenuación  |
| 8. Área de electrodos                                       | 18. Ancho de Banda                                    |
| 9. Voltaje de actuación                                     | 19. Viabilidad de acuerdo a los procesos tecnológicos |
| 10. Tiempo de conmutación                                   |   |

De acuerdo al caso particular que se trate, algunos de los puntos mencionados podrían ser superfluos y podrían faltar algunos más, pero tomaremos estos como una generalización. Una posible interrelación entre ellos puede verse en la Fig. 1.

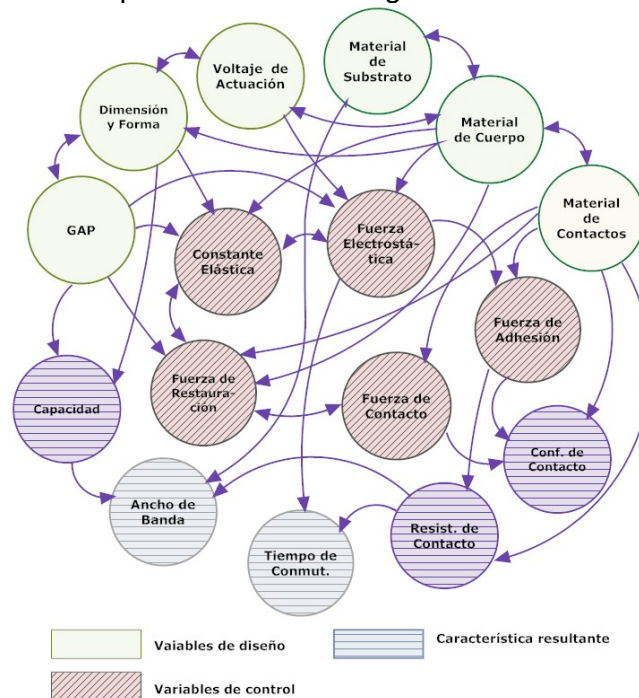


Figura 1. Interdependencia entre parámetros de diseño.

## ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA

Para dos barras o placas enfrentadas separadas por una distancia o gap de aire, del tipo de un capacitor plano, suele ser conveniente analizarlo desde el punto de vista de la energía involucrada, por lo que la conocida relación de la energía electrostática cuando se aplica un voltaje  $V$  a las placas es:

$$W_e = -\left(\frac{\epsilon_0 A V^2}{2z}\right) \quad (1)$$

En la que  $A$  es el área de las placas,  $z$  es la distancia entre placas y la dirección de movimiento perpendicular a las mismas, así con una separación  $z=g_0$  la energía elástica almacenada en la placa móvil será:

$$W_m = k_z \frac{(g_0 - z)^2}{2} \quad (2)$$

En la que aparece la constante  $k_z$  como medida de la rigidez mecánica o elasticidad de la parte móvil en el sentido de movimiento  $z$ . Con la posición inicial de máximo gap es  $z=g_0$  que se va reduciendo al aplicar diferencia de voltaje entre las placas, la energía total del sistema se expresa como:

$$W_T = W_e + W_m = k_z \frac{(g_0 - z)^2}{2} - \left(\frac{\epsilon_0 A V^2}{2z}\right) \quad (3)$$

De donde se pueden extraer las fuerzas involucradas derivando esta expresión

$$\frac{\partial W_T}{\partial z} = -k_z(g_0 - z) + \frac{\epsilon_0 A V^2}{2z^2} \quad (4)$$

Evidenciando así la relación entre las fuerzas de restauración (primer término) y la fuerza de atracción electrostática (segundo término). Mediante el análisis de las ecuaciones comienzan a aparecer condiciones y compromisos en el diseño, por ejemplo a partir de las soluciones estables de estas relaciones se ve que debería cumplirse

$$z \geq \frac{2}{3} g_0 \quad (5)$$

es decir que la distancia entre los electrodos puede controlarse hasta  $2/3$  de la distancia máxima inicial y a partir de ésta la atracción colapsa hasta que junta las dos placas. Esto determina un voltaje mínimo necesario para vencer totalmente la fuerza elástica de la placa o barra móvil, que se ha calculado como:

$$V_m = \sqrt{\frac{8}{27} \cdot \frac{k_z g_0^3}{\epsilon_0 A}} \quad (6)$$

Apenas analizando la energía y volviendo a las relaciones esbozadas en la figura 1 podemos notar el compromiso entre el voltaje aplicado, la separación entre la barra móvil y la fija, la forma de la barra que determina el área y el tipo de material expresado con su constante de permitividad para determinar la fuerza electrostática para el accionamiento. Por otro lado la fuerza de restauración, mecánicamente más dependiente, se determina una vez más con el material usado reflejado en la constante de elasticidad y la separación entre las placas [10].

La constante de elasticidad se calcula a través del análisis estructural de la barra, en el caso tomado de conmutadores tipo “cantilever” donde uno solo de los extremos se encuentra fijo o bien con más puntos de sujeción, se obtienen expresiones de relaciones dependientes de su geometría, ancho de la barra, espesor y longitud de la misma, del módulo de Young, del momento de inercia y los momentos generados por las distribuciones de fuerzas con respecto a los anclajes de la estructura[5][6][13].

Así nuevamente nos encontramos, como dijimos, con el diseño dependiente de la forma de la estructura a través de los momentos aplicados por la fuerza electrostática y las características

de elasticidad y deformación del material. Al tomar en cuenta un conmutador tipo “cantilever” podríamos no considerar una segunda componente de la constante elástica debida a los esfuerzos residuales generados durante el proceso de fabricación y que se evidencian con más importancia en aquellas estructuras con más anclajes, del tipo de una barra sostenida en ambos extremos o bien de un diafragma circular fijo en los bordes de su superficie.

Esta segunda componente de elasticidad se produce por los esfuerzos remanentes entre las diferentes superficies de una barra uniforme por diferencia entre las condiciones de los procesos de depósito. Si bien, en general se busca que esta componente sea lo más reducida posible, en algunos casos se utiliza para provocar curvaturas controladas en la barra de un conmutador de un solo anclaje. Producir incisiones, hoyos o rugosidades provoca la disminución de esta componente de la constante de elasticidad de la misma manera que aumentar la longitud de las barras como en diseños de barras serpenteantes que sostienen las placas de deflexión, por lo que volvemos a considerar las dimensiones y forma del dispositivo como variable de diseño en función de las características mencionadas, pues con estas consideraciones se consiguen menores tensiones de conmutación [13][14]. La máxima velocidad a la que el dispositivo puede funcionar (en cuanto a conmutación y no a transmisión de señal) queda limitada por la frecuencia a la que las energías potencial y cinética entran en resonancia y que se conoce como frecuencia de resonancia natural.

## TRANSMISIÓN DE SEÑAL

El conmutador empleado como seccionador de un circuito de alta frecuencia posee las características de una línea de transmisión, con lo que en el diseño de su estructura, además de las consideraciones electrostáticas y mecánicas que mencionamos antes, es de vital importancia tener en cuenta las resistencias, capacidades y pérdidas que introduce en el circuito. Se presenta nuevamente el compromiso en las dimensiones y los materiales pero ahora sumando dichos efectos; las pérdidas de inserción dependen de la diferencia entre la impedancia que presenta el conmutador y la impedancia del circuito al que pertenece causando un importante impacto en su desempeño en frecuencia, más el efecto de las resistencias en los contactos. La separación entre la barra móvil y la parte fija o el substrato determina la capacidad general del dispositivo, en virtud de ser en la práctica la estructura de un capacitor de placas paralelas afectando el aislamiento entre entrada y salida del circuito en el estado de corte. Así es como una mayor separación entre ellas es conveniente en función de la reducción de capacitancia parásita pero esto se enfrenta a las consideraciones hechas para un menor voltaje de actuación, una mayor velocidad de conmutación y la capacidad de deflexión sin deformación permanente que puede ejercer la parte móvil.

Las pérdidas generadas en función de la señal que se propaga por el dispositivo a frecuencias con longitudes de onda del orden de sus dimensiones, se presentan debido a la propagación de energía en los materiales, tanto en las partes conductoras, como en forma de disipación en los dieléctricos y substratos y como radiación o dispersión a partir de las superficies. Supondremos aquí distribuciones de corriente uniformes para mayor sencillez, pues para distribuciones no uniformes se debe recurrir a ecuaciones que brinden mayor exactitud como las ecuaciones de Pucel, que excederían el alcance de este trabajo y no aportarían elementos nuevos a los que estamos mencionando en cuanto a variables en el diseño. Planteada esta suposición, el factor de atenuación en las partes conductoras se expresa como:

$$\alpha_c = \frac{R_s}{wZ} \quad (7)$$

donde  $R_s$  es la resistencia del conductor dada por

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (8)$$

con  $\omega$  frecuencia angular de la señal,  $\sigma$  y  $\mu$  conductividad y permeabilidad del material respectivamente [2].

De la misma manera, la atenuación en los dieléctricos se describe mediante el factor:

$$\alpha_d = k \cdot \frac{E_{ef} - 1}{\epsilon_r - 1} \cdot \frac{\epsilon_r}{E_{ef}} \cdot \frac{tg \delta}{\lambda} \text{ (dB/unidad\_de\_longitud)} \quad (9)$$

aquí  $tg \delta$  es la tangente del ángulo de pérdidas del dieléctrico del sustrato,  $E_{ef}$  es la constante dieléctrica efectiva y  $\epsilon_r$  permitividad relativa [9].

Si el conmutador es una estructura abierta de la misma manera que una microtira puede perder potencia por radiación en las discontinuidades y en circuito abierto la relación entre las potencias radiada e incidente sería:

$$\frac{P_r}{P_i} = \left[ \frac{32\pi m_o}{3E_{ef}Z} + \frac{E_{ef}\sqrt{E_{ef}Z}}{45} \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^2 \right] \left(\frac{h}{\lambda_0}\right)^2 \quad (10)$$

Tales pérdidas que se deben tener en cuenta en el diseño de dispositivos tienen características que una vez más intervienen en la elección de los materiales y las formas del dispositivo.

En este apartado también deben analizarse los contactos, pues la fuerza con la que se unen al cerrar el circuito a través de la actuación así como la fuerza de adherencia entre ellos una vez unidos modifican el desempeño de conmutación. Dichas fuerzas pueden además modificar la integridad de los materiales y provocar alteraciones en las características eléctricas, como la resistencia de estos contactos desviando el funcionamiento conseguido y esperado. [2][3][9]

## CONMUTADOR ELECTROSTÁTICO

Siguiendo estos lineamientos y utilizando software especializado que permite calcular las variables mecánicas, posteriormente las eléctricas y actualizar así los parámetros en forma iterativa, se muestra un ejemplo de diseño de un conmutador serie (Figura 2).

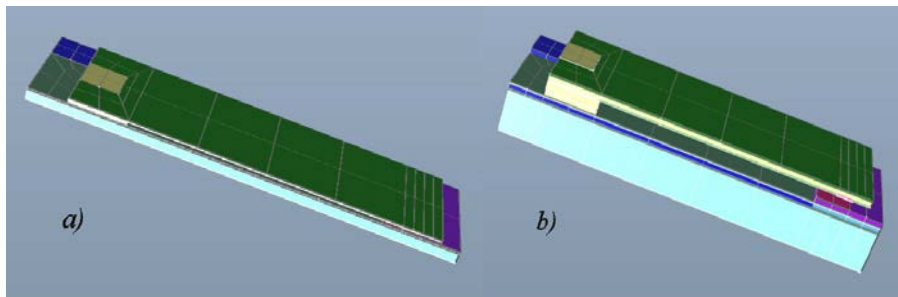


Figura 2. Conmutador serie: a) escala uniforme. b) escala con eje z ampliado 5 veces.

Sus dimensiones son de  $200\mu\text{m}$  de largo por  $60\mu\text{m}$  de ancho y  $10\mu\text{m}$  de espesor, formado por 11 capas, comenzando desde un sustrato de Si, electrodo de actuación de polisilicio de  $0,5\mu\text{m}$  de espesor aislado con una capa de  $\text{SiO}_2$  y una placa móvil compuesta en tres capas de Aluminio ( $0,5\mu\text{m}$ ) (oro en otro caso), y  $\text{SiO}_2$  con contactos de platino (Tabla II).

Se efectuaron los análisis electromecánicos sobre una modelización con malla de cálculo de elementos finitos de tamaño máximo  $(x, y, z) = 5, 5, 5\mu\text{m}$  con alrededor de 2000 nodos.

Con un área de actuación es de  $100 \times 50$  y analizando voltaje de actuación entre 0 y 8V, en las figuras 3 y 4 puede verse la variación del desplazamiento en el sentido perpendicular a las placas (eje z) en función de la tensión aplicada y la gráfica en colores del desplazamiento en la estructura.

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DE LA PLACA MÓVIL DEL CONMUTADOR.

Material de la placa móvil	Aluminio	Oro
Largo ( $\mu\text{m}$ )	140	140
Ancho ( $\mu\text{m}$ )	60	60
Espesor (entre 2 capas de 0.2 $\mu\text{m}$ de óxido) ( $\mu\text{m}$ )	0.5	0.5
GAP actuación ( $\mu\text{m}$ )	1.7	1.7
GAPconmutación ( $\mu\text{m}$ )	1	1
Fuerza de reacción a 6V ( $\mu\text{N}$ )	180	180

En la figura 4 puede verse además como varía el desplazamiento al cambiar el material en la parte central de la placa móvil del conmutador, en éste caso la película de aluminio entre dos capas de óxido se reemplaza por una película de oro.

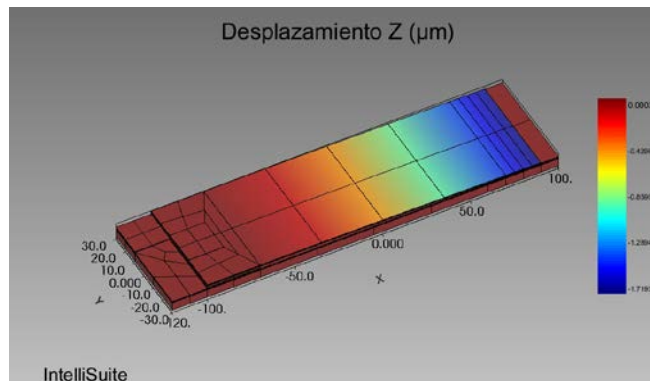


Figura 3. Desplazamiento en función de voltaje de actuación

Como las dimensiones permanecen constantes en uno y otro caso la diferencia de respuesta se produce en función de las características mecánicas diferentes de los materiales, como el módulo de Young según su relación en [5][6][13][14].

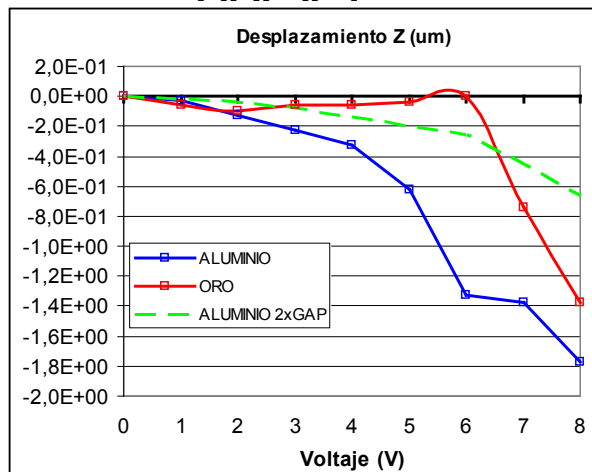


Figura 4. Desplazamiento en sentido perpendicular a las placas (eje z)

Si se redujera la separación inicial entre las placas o GAP, como es de esperarse, la fuerza de acción electrostática vería disminuido su efecto sobre la atracción de la placa móvil (ecuación 4) modificando su desplazamiento para un mismo voltaje aplicado y que también se muestra en el mismo gráfico.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado en este trabajo la complejidad en la interrelación que implica el diseño de sistemas micro-electromecánicos, tratando de conseguir una idea global de las características de algunos de los parámetros más comunes en este tipo de sistemas dejando de lado posiblemente muchos de ellos que corresponden a casos particulares y dependen en realidad del tipo de dispositivo o componente que se vaya a desarrollar. El hecho de considerar sólo los conmutadores MEMS electrostáticos y sus variables de diseño se basa en la intención de evidenciar las dependencias no tan triviales entre los mencionados parámetros, aún en estructuras sencillas.

En función de no extendernos no se han mencionado cuestiones bases como los procesos de fabricación, desde los cuales es necesario partir en el flujo de diseño de cualquier sistema electromecánico pues determinan las características de materiales y el grado de exactitud con que se pueden manejar las estructuras a diseñar. Sólo se muestra un tipo de análisis comparativo sencillo quedando por realizar un análisis más exhaustivo del ejemplo presentado en cuanto a sus características eléctricas tales como ancho de banda de transmisión, pérdidas, resistencias y capacidades asociadas etc.

## Bibliografía

- [1] Advanced Micro and Nanosystems. Vol. 2. CMOS – MEMS. Edited by H. Baltes, O. Brand, G. K. Fedder, C. Hierold, J. Korvink, O. Tabata - Copyright © WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim – 2005.
- [2] Bava, J. A., Sanz, A. J., "Microondas y Recepción Satelital", CEILP, 2007.
- [3] Bowick C., RF Circuit Design, Newness – 2008
- [4] Advanced Micro & Nanosystems Volume 6 Reliability of MEMS - Edited by Osamu Tabata and Toshiyuki Tsuchiya, Copyright © WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim – 2008.
- [5] De Los Santos, H. J., RF MEMS circuit design for wireless communications.p. cm..(Artech House microelectromechanical systems library) – 2002.
- [6] De Los Santos, H. J., Introduction to Microelectromechanical Microwave Systems Second Edition p. cm.(Artech House )- 2004.
- [7] Jha., A. R., MEMS and nanotechnology-based sensors and devices for communications, medical and aerospace applications - 2008.
- [8] Maluf, N., Williams, K. An Introduction to microelectromechanical systems engineering–2nd ed. (Artech House microelectromechanical library) – 2004.
- [9] MEMS/NEMS: Handbook Techniques and Applications, Edited by Cornelius T. Leondes –2005.
- [10] MEMS : a practical guide to design, analysis, and applications, edited by Jan G. Korvink and Oliver Paul.- 2006.
- [11] Pozar D. Microwaves engineering, John Wiley & Sons, Inc – 2005.
- [12] Pelesko, John A., Bernstein, David H., "Modeling MEMS and NEMS", Chapman & Hall, 2003.
- [13] Rebeiz, G. M. RF MEMS: Theory, Design, and Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [14] Varadan, V. K. Vinoy, K. J. and Jose, K. A., RF MEMS and their applications, John Wiley & Sons Ltd, 2003.