

Capítulo 9

Diseño de un acelerómetro micromaquinado en el proceso PolyMumps

9.1. Propuesta de los parámetros de diseño

Para el acelerómetro capacitivo micromaquinado se tienen como parámetros importantes de diseño a:

1. La frecuencia de resonancia ($\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - 2\zeta^2}$) y
2. El factor de calidad ($Q = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}$).

Dado que en ambos interviene la razón de amortiguamiento ζ (cuyo valor óptimo se ubica alrededor de 0,7 para un sistema críticamente amortiguado) y la frecuencia natural de oscilación ω_0 , se empezará por fijar algunas características dimensionales a partir de las definiciones de dichos parámetros.

$$\zeta = \frac{c_{gral}}{2m_{total}\omega_0} \quad \text{y} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k_{suspension}}{m_{total}}}$$

Lo que deriva en:

$$\zeta = \frac{c_{gral}}{2\sqrt{m_{total}k_{suspension}}} \approx 0,7$$

Por otra parte, se tienen algunas características dimensionales que son propias del proceso de fabricación y que en principio no son modificables:

1. Separación entre el sustrato y la masa móvil, d_{ms} , igual a $2 \mu m$.
2. Separación mínima entre electrodos, d_e , igual a $2 \mu m$.
3. Grosor mínimo de los electrodos, h_e o h , igual a $2 \mu m$.
4. Grosor máximo de los electrodos, h_e o h , igual a $3,5 \mu m$.
5. Anchura mínima de los electrodos, b_e o b , igual a $3,5 \mu m$.

También se conocen los valores de las constantes involucradas en el diseño del acelerómetro.

1. $\varepsilon_{aire} = 1,00059$ (permitividad relativa).
2. $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-6}$ [pF/ μm].
3. $\rho_{aire} = 1,204 \times 10^{-18}$ [kg/ μm^3], a 20 °C (temperatura ambiente) y 1 atm (presión al nivel del mar).
4. $\mu_{aire} = 1,81 \times 10^{-11}$ [$\mu\text{N}\cdot\text{s}/\mu\text{m}^2$], a 20 °C (temperatura ambiente).
5. $E_{Si} = 1,6 \times 10^5$ [$\mu\text{N}/\mu\text{m}^2$].
6. $\rho_{Si} = 2,33 \times 10^{-15}$ [kg/ μm^3].
7. $R = 8,31$ [J/mol·K] (constante universal de los gases ideales).
8. $M_m = 0,028965$ [kg/mol] (masa molar del aire).
9. $g = 9,81$ [m/s²] (aceleración gravitacional).

Otras consideraciones importantes son las señaladas en las subsecciones *Transductor mecánico-eléctrico* del capítulo 8 y *Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor configurado para el balanceo de fuerzas* del capítulo 6.

1. El coeficiente de realimentación del circuito β debe ser mayor a 5.
2. La proporcionalidad entre la amplitud de la componente de CD y la amplitud de la componente de CA de la señal eléctrica de polarización para los electrodos debe encontrarse en el rango de un décimo a un cuarto.
3. La relación $\frac{A\varepsilon\varepsilon_0V_0^2}{2kd}$ debe tener un valor en el rango de un décimo a un cuarto.
4. La frecuencia ω de la componente de CA de la señal eléctrica de polarización para los electrodos es mucho mayor que la frecuencia de la aceleración de entrada y que la frecuencia natural de oscilación de la estructura mecánica.

Se hará la propuesta de los parámetros dimensionales para el diseño del acelerómetro parte por parte, se iniciará con el diseño de la suspensión y se tomará el tipo de suspensión de caja con los bordes circulares como punto de partida y se analizarán como opciones alternativas los arreglos de suspensión de caja con bordes angulares a noventa grados, tipo langosta y tipo sagital. Así, de acuerdo con la ecuación 8.11, los parámetros dimensionales necesarios para la suspensión de caja con los bordes circulares serán: L , R , b y h . Algunas condiciones que deben tenerse en cuenta para simplificar la expresión de cálculo del coeficiente de rigidez en la dirección x son que la sección transversal de la viga que forma la suspensión debe ser cuadrada y que la relación entre el diámetro del borde circular y ancho de la viga debe mantenerse como $R > 10b$. Por otra parte, el grosor máximo de las vigas voladas que forman la suspensión será de 3,5 μm y dado que el proceso de fabricación obliga a mantener el ancho también en 3,5 μm si se forman las vigas empleando el método de apilamiento de las placas estructurales (subsección *Suspensión* del capítulo 8) y el diámetro del borde circular deberá mantenerse al menos en 35 μm . Así, la expresión para calcular la rigidez en la dirección x (para un lóbulo completo de la suspensión) será :

$$k = \frac{(2L + \pi R)Ehb^3}{(3\pi^2R^4 - 6\pi^2L^2R^2 + 18\pi^2L^2R + 6\pi LR^3 - 8\pi L^3R + 36\pi L^3 - 24R^4 + 24L^2R^2 + 2L^4)}$$

y para calcular la rigidez en la dirección z (para un lóbulo completo de la suspensión), será:

$$k_z = \frac{6EGI_yI_t}{3EI_yR[8LR + \pi(L^2 - 2LR + 3R^2)] + GI_t[4L^3 + 3\pi L^2R + 6\pi LR^2 + 3\pi R^3]}$$

Dado que $h = 3,5 \mu\text{m}$, $b = 3,5 \mu\text{m}$ y $R = 35 \mu\text{m}$, sólo queda por definir el largo de las vigas, para lo cual se construirá una tabla en dónde se pongan distintos valores dimensionales.

Con $h = 3,5 \mu\text{m}$, $b = 3,5 \mu\text{m}$ y $R = 35 \mu\text{m}$, el cálculo de la rigidez para la suspensión completa (considerando los dos lóbulos, frontal y trasero) será:

$L [\mu\text{m}]$	$k [\text{kg/s}^2]$	$k_z [\text{kg/s}^2]$
200	$2,12 \times 10^{-5}$	$3,15 \times 10^{-1}$
250	$1,36 \times 10^{-5}$	$1,87 \times 10^{-1}$
300	$9,44 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-1}$
350	$6,93 \times 10^{-6}$	$8,19 \times 10^{-2}$
400	$5,31 \times 10^{-6}$	$5,82 \times 10^{-2}$
450	$4,19 \times 10^{-6}$	$4,29 \times 10^{-2}$
500	$3,4 \times 10^{-6}$	$3,25 \times 10^{-2}$
750	$1,51 \times 10^{-6}$	$1,09 \times 10^{-2}$
1000	$8,49 \times 10^{-7}$	$4,89 \times 10^{-3}$
1500	$3,77 \times 10^{-7}$	$1,55 \times 10^{-3}$

Los parámetros dimensionales necesarios para el diseño de la suspensión de caja con bordes angulares a noventa grados serán: L_1 , L_2 , L_3 , b y h . Algunas condiciones que pueden tenerse en cuenta para simplificar la expresión de cálculo del coeficiente de rigidez en la dirección x son que L_1 sea igual a L_3 y que la sección transversal de las vigas con que se forma la suspensión debe ser cuadrada dado que el grosor máximo que pueden alcanzar las vigas de la suspensión será de $3,5 \mu\text{m}$, lo que obliga a mantener el ancho también en $3,5 \mu\text{m}$ dado que las vigas seguramente se formarán empleando el método de apilamiento de las placas estructurales (subsección *Suspensión* del capítulo 8). Así, la expresión para calcular la rigidez en la dirección x (para un lóbulo completo de la suspensión) será:

$$k = \frac{Ehb^3}{2L_1^3} \left(\frac{L_2 + 2L_1}{2L_2 + L_1} \right)$$

y para la rigidez en la dirección z (también para un lóbulo completo de la suspensión) será:

$$k_z = \frac{6EGI_y I_t}{3EI_y L_2 (L_1^2 + L_1 L_2) + GI_t (2L_1^3 + L_2^3)}$$

Dado que $h = 3,5 \mu\text{m}$ y $b = 3,5 \mu\text{m}$, sólo queda por definir el largo de las vigas, para lo cual se construirá una tabla en dónde se pongan distintos valores dimensionales para L_1 y L_2 .

Con $h = 3,5 \mu\text{m}$ y $b = 3,5 \mu\text{m}$, el cálculo de la rigidez para la suspensión completa (considerando los dos lóbulos, frontal y trasero) será:

L_2 [μm]	L_1 [μm]	k [kg/s^2]	k_z [kg/s^2]
10	200	5,5932	1,3269
10	250	2,9025	0,6961
10	300	1,6952	0,4095
10	350	1,0746	0,2609
10	400	0,7235	0,1763
10	450	0,5102	0,1247
10	500	0,3731	0,0914
10	750	0,1116	0,0275
10	1000	0,0473	0,0117
20	200	5,2522	1,1772
20	250	2,7554	0,6320
20	300	1,6216	0,3776
20	350	1,0338	0,2433
20	400	0,6992	0,1659
20	450	0,4947	0,1181
20	500	0,3628	0,087
20	750	0,1095	0,0266
20	1000	0,0466	0,0114

Continuación de la tabla con la rigidez de una suspensión tipo caja con bordes angulares a noventa grados, $h = 3,5 \mu\text{m}$ y $b = 3,5 \mu\text{m}$.

L_2 [μm]	L_1 [μm]	k [kg/s^2]	k_z [kg/s^2]
30	200	4,9636	1,0481
30	250	2,6272	0,5751
30	300	1,5562	0,3488
30	350	0,9971	0,2272
30	400	0,6769	0,1562
30	450	0,4805	0,1119
30	500	0,3533	0,0829
30	750	0,1075	0,0258
30	1000	0,046	0,0111
40	200	4,7163	0,9365
40	250	2,5145	0,5245
40	300	1,4977	0,3227
40	350	0,9637	0,2124
40	400	0,6565	0,1471
40	450	0,4673	0,1061
40	500	0,3444	0,079
40	750	0,1056	0,0250
40	1000	0,0454	0,0109
50	200	4,5019	0,8398
50	250	2,4147	0,4795
50	300	1,445	0,299
50	350	0,9333	0,1988
50	400	0,6378	0,1388
50	450	0,4551	0,1007
50	500	0,3361	0,0753
50	750	0,1038	0,0242
50	1000	0,0447	0,0106

Los parámetros dimensionales necesarios para el diseño de la suspensión tipo langosta serán: L_1 , L_2 , b y h . Sin embargo, algunas condiciones que pueden tenerse en cuenta para simplificar la expresión de cálculo del coeficiente de rigidez en la dirección x son que la sección transversal de las vigas con que se forma la suspensión debe ser cuadrada dado que el grosor máximo que pueden alcanzar las vigas de la suspensión será de $3,5 \mu\text{m}$, ello obliga a mantener el ancho también en $3,5 \mu\text{m}$ en virtud de que las vigas seguramente se formarán empleando el método de apilamiento de las placas estructurales (subsección *Suspensión* del capítulo 8). Así, la expresión para calcular la rigidez en la dirección x (para los cuatro lóbulos de la suspensión) será:

$$k = \frac{(20L_1^4 + 24L_1^3L_2 + 24L_1^2L_2^2 + 12L_1L_2^3 + 64L_1L_2^2 + 48L_2^3 - 3L_2^4)Ehb^3}{d_1 + d_2}$$

donde:

$$\begin{aligned} d_1 &= 48L_2^6 + 16L_1^7 - 15L_2^7 + 80L_1^4L_2^2 + 192L_1^3L_2^3 + 336L_1^2L_2^4 + 272L_1L_2^5 \\ d_2 &= 60L_1^6L_2 + 180L_1^5L_2^2 + 244L_1^4L_2^3 + 144L_1^3L_2^4 + 3L_1^2L_2^5 - 57L_1L_2^6 \end{aligned}$$

y para la rigidez en la dirección z (considerando los cuatro lóbulos que forman la suspensión) la expresión será:

$$k_z = \frac{12EGI_yI_t}{6EI_y(L_1 + L_2)(L_1^2 + L_1L_2 + L_2^2) + GI_t + (4L_1^3 + 6L_1L_2(L_1 + L_2) + 3L_2^3)}$$

Dado que $h = 3,5 \mu\text{m}$ y $b = 3,5 \mu\text{m}$, sólo queda por definir el largo de las vigas, para lo cual se construirá una tabla en donde se propongan distintos valores dimensionales para L_1 y L_2 .

Con $h = 3,5 \mu\text{m}$ y $b = 3,5 \mu\text{m}$, el cálculo de la rigidez para la suspensión completa (considerando los cuatro lóbulos) será:

L_2 [μm]	L_1 [μm]	k [kg/s^2]	k_z [kg/s^2]
10	100	16,0785	$4,9264 \times 10^{-12}$
10	200	2,2208	$8,0898 \times 10^{-13}$
10	300	0,6907	$2,5179 \times 10^{-13}$
10	400	0,3054	$1,0823 \times 10^{-13}$
10	500	0,1648	$5,5957 \times 10^{-14}$
20	100	13,1808	$4,3346 \times 10^{-12}$
20	200	2,0117	$7,5055 \times 10^{-13}$
20	300	0,6375	$2,3936 \times 10^{-13}$
20	400	0,2798	$1,0419 \times 10^{-13}$
20	500	0,148	$5,4284 \times 10^{-14}$

Continuación de la tabla con la rigidez de una suspensión tipo langosta, $h = 3,5 [\mu\text{m}]$ y $b = 3,5 [\mu\text{m}]$.

L_2 [μm]	L_1 [μm]	k [kg/s^2]	k_z [kg/s^2]
30	100	10,722	$3,7906 \times 10^{-12}$
30	200	1,8231	$6,9535 \times 10^{-13}$
30	300	0,5966	$2,2739 \times 10^{-13}$
30	400	0,2649	$1,0027 \times 10^{-13}$
30	500	0,1404	$5,2646 \times 10^{-14}$
40	100	8,7159	$3,3009 \times 10^{-12}$
40	200	1,6479	$6,4347 \times 10^{-13}$
40	300	0,5586	$2,1589 \times 10^{-13}$
40	400	0,2519	$9,6458 \times 10^{-14}$
40	500	0,1345	$5,1046 \times 10^{-14}$
50	100	7,1141	$2,8676 \times 10^{-12}$
50	200	1,4869	$5,9495 \times 10^{-13}$
50	300	0,5226	$2,0487 \times 10^{-13}$
50	400	0,2397	$9,276 \times 10^{-14}$
50	500	0,1291	$4,9483 \times 10^{-14}$

Finalmente, los parámetros dimensionales necesarios para el diseño de la suspensión tipo sagital serán: L , ϕ , b y h . Algunas condiciones que pueden tenerse en cuenta para simplificar la expresión de cálculo del coeficiente de rigidez en la dirección x son que la sección transversal de las vigas con que se forma la suspensión debe ser cuadrada dado que el grosor máximo que pueden alcanzar las vigas de la suspensión es de $3,5$ [μm], lo que obliga a mantener el ancho también en $3,5$ [μm] en virtud de que las vigas seguramente se formarán empleando el método de apilamiento de las placas estructurales (subsección *Suspensión* del capítulo 8), además $L_R = 20$ [μm] y $L_A = 50$ [μm]. Así, la expresión para calcular la rigidez en la dirección x (para los dos lóbulos que forman la suspensión completa) será:

$$k = \frac{2Ehb^3}{L^3 \cos^2 \phi}$$

y para la rigidez en la dirección z (considerando los dos lóbulos que forman la suspensión completa) la expresión será:

$$k_z = \frac{24}{L} \frac{EGI_y I_t}{d_1 + d_2 + d_3}$$

dónde

$$\begin{aligned} d_1 &= 6EI_y((L_A - 2u)^2 \sin^2 \phi + 2(L_R + 2L \sin \phi)(L_R \cos \phi + (2L \cos \phi + L_A - 2u) \sin \phi) \cos \phi) \\ d_2 &= GI_t(6L_R^2 + 14L^2 + 3(L_A - 2u)^2 + 3((L_A - 2u)^2 - 2(L_R^2 + 2L^2)) \cos(2\phi) - 6(2u - L_A)(L - 2L_R \sin \phi) \cos \phi) \\ d_3 &= 6GI_t L((L_A - 2u) \cos(3\phi) + L \cos(4\phi) + 4L_R \sin \phi - 2L_R \sin(3\phi)) \\ u &= \frac{GI_t(L_A \cos \phi + L \cos(2\phi)) \cos \phi + (EI_y - GI_t)L_R \sin \phi \cos \phi + EI_y(L_A + 2L \cos \phi) \sin^2 \phi}{2(GI_t \cos^2 \phi + EI_y \sin^2 \phi)} \end{aligned}$$

Dado que $L_R = 20$ [μm], $L_A = 50$ [μm], $h = 3,5$ [μm] y $b = 3,5$ [μm], sólo queda por definir el largo de las vigas y su ángulo de inclinación, para lo cual se construirá una tabla en dónde se propongan distintos valores dimensionales para ϕ y L .

ϕ [°]	L [μm]	k [kg/s^2]	k_z [kg/s^2]
15	100	51,4677	5,33
15	200	6,4335	0,8659
15	300	1,9062	0,2812
15	400	0,8042	0,1243
15	500	0,4117	0,0654
30	100	64,0267	2,511
30	200	8,0033	0,3764
30	300	2,3714	0,1188
30	400	1,0004	0,0518
30	500	0,5122	0,027
45	100	96,04	1,6573
45	200	12,005	0,2383
45	300	3,557	0,0741
45	400	1,5006	0,032
45	500	0,7683	0,0167

El siguiente parámetro de diseño a considerar será la masa suspendida formada por la placa de material estructural, para ello se ampliarán los datos contenidos en la tabla creada en la subsección *Masa móvil* del capítulo 8 con dimensiones y masas mayores.

Área [μm^2]	Poly1 [kg]	Poly1+Poly2 [kg]	Poly1+Poly2+Metal [kg]	Agujeros
240 × 120	$1,3264 \times 10^{-10}$	$2,286 \times 10^{-10}$	$4,5684 \times 10^{-10}$	21
240 × 180	$1,987 \times 10^{-10}$	$3,4186 \times 10^{-10}$	$6,8613 \times 10^{-10}$	35
240 × 240	$2,6476 \times 10^{-10}$	$4,5511 \times 10^{-10}$	$9,1542 \times 10^{-10}$	49
360 × 180	$2,9787 \times 10^{-10}$	$5,1204 \times 10^{-10}$	$1,03 \times 10^{-9}$	55
360 × 240	$3,9688 \times 10^{-10}$	$6,8163 \times 10^{-10}$	$1,374 \times 10^{-9}$	77
360 × 360	$5,9491 \times 10^{-10}$	$1,0208 \times 10^{-9}$	$2,062 \times 10^{-9}$	121
480 × 240	$5,29 \times 10^{-10}$	$9,0814 \times 10^{-10}$	$1,8326 \times 10^{-9}$	105
480 × 360	$7,9295 \times 10^{-10}$	$1,36 \times 10^{-9}$	$2,7499 \times 10^{-9}$	165
480 × 480	$1,0569 \times 10^{-9}$	$1,8118 \times 10^{-9}$	$3,6673 \times 10^{-9}$	225
600 × 360	$9,9098 \times 10^{-10}$	$1,6991 \times 10^{-9}$	$3,4379 \times 10^{-9}$	209
600 × 480	$1,3208 \times 10^{-9}$	$2,2636 \times 10^{-9}$	$4,5846 \times 10^{-9}$	285
600 × 600	$1,6507 \times 10^{-9}$	$2,8281 \times 10^{-9}$	$5,7314 \times 10^{-9}$	361
960x360	$1,5851 \times 10^{-9}$	$2,7167 \times 10^{-9}$	$5,5018 \times 10^{-9}$	341
960x480	$2,1127 \times 10^{-9}$	$3,6191 \times 10^{-9}$	$7,3367 \times 10^{-9}$	465
960x600	$2,6402 \times 10^{-9}$	$4,5216 \times 10^{-9}$	$9,1716 \times 10^{-9}$	589
960x960	$4,223 \times 10^{-9}$	$7,229 \times 10^{-9}$	$1,4676 \times 10^{-9}$	961
1200x360	$1,9811 \times 10^{-9}$	$3,395 \times 10^{-9}$	$6,8777 \times 10^{-9}$	429
1200x480	$2,6405 \times 10^{-9}$	$4,5228 \times 10^{-9}$	$9,1714 \times 10^{-9}$	585
1200x600	$3,3 \times 10^{-9}$	$5,6506 \times 10^{-9}$	$1,1465 \times 10^{-8}$	741
1200x960	$5,2782 \times 10^{-9}$	$9,034 \times 10^{-9}$	$1,8346 \times 10^{-8}$	1209
1200x1200	$6,597 \times 10^{-9}$	$1,129 \times 10^{-9}$	$2,2933 \times 10^{-8}$	1521

El parámetro de diseño que completa el sistema masa-resorte-amortiguador es precisamente el disipador de energía creado por los distintos efectos del aire circundante sobre la placa suspendida (masa móvil). Para estimar el valor general de amortiguamiento se tiene la ecuación 8.12, formada por cuatro componentes que involucran la viscosidad del aire (μ), las dimensiones de la placa suspendida o masa móvil (B_m y L_m), las dimensiones de los electrodos del actuador electrostático, su separación y cantidad (L_e , h_e , d_e y n), la separación entre el sustrato y la placa suspendida o masa móvil (d_{sm}) y la frecuencia de oscilación de la masa móvil (ω). Entre los parámetros antes descritos se puede considerar a la viscosidad del aire como una constante, el grosor mínimo de los electrodos será de 2 [μm] y el máximo de 3,5 [μm], la separación mínima entre electrodos será de 2 [μm] y la separación entre el sustrato y la placa suspendida será de 2 [μm].

Si se toman los grosores mínimo y máximo de los electrodos y la separación mínima como parámetros de diseño, sólo quedan por definir las dimensiones de la placa suspendida, el largo de los electrodos y su número y la frecuencia de oscilación de la masa móvil, para lo cual se construirán una serie de tablas con distintos valores para estos parámetros.

Con $h_e = 3,5$ [μm], $d_e = 2$ [μm], $d_{ms} = 2$ [μm] y considerando que $n = 56$ para una placa de 480 [μm] de largo o $n = 72$ para una placa de 600 [μm] de largo o $n = 120$ para una placa de 960 [μm] de largo o $n = 152$ para una placa de 1200 [μm] de largo.

B_{m1} [μm]	L_{m1} [μm]	L_{m2} [μm]	L_e [μm]	ω [hz]	c_{gral1}	c_{gral2}
360	480	600	150	50	$2,42 \times 10^{-6}$	$3,04 \times 10^{-6}$
360	480	600	150	100	$2,42 \times 10^{-6}$	$3,04 \times 10^{-6}$
360	480	600	150	200	$2,42 \times 10^{-6}$	$3,05 \times 10^{-6}$
360	480	600	150	500	$2,43 \times 10^{-6}$	$3,05 \times 10^{-6}$
360	480	600	150	1000	$2,43 \times 10^{-6}$	$3,06 \times 10^{-6}$
360	480	600	300	50	$3,23 \times 10^{-6}$	$4,09 \times 10^{-6}$
360	480	600	300	100	$3,23 \times 10^{-6}$	$4,09 \times 10^{-6}$
360	480	600	300	200	$3,24 \times 10^{-6}$	$4,09 \times 10^{-6}$
360	480	600	300	500	$3,24 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-6}$
360	480	600	300	1000	$3,25 \times 10^{-6}$	$4,11 \times 10^{-6}$
360	480	600	450	50	$4,05 \times 10^{-6}$	$5,14 \times 10^{-6}$
360	480	600	450	100	$4,05 \times 10^{-6}$	$5,14 \times 10^{-6}$
360	480	600	450	200	$4,05 \times 10^{-6}$	$5,14 \times 10^{-6}$
360	480	600	450	500	$4,06 \times 10^{-6}$	$5,15 \times 10^{-6}$
360	480	600	450	1000	$4,06 \times 10^{-6}$	$5,16 \times 10^{-6}$

B_{m1} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	ω [hz]	c_{gral3}	c_{gral4}
360	960	1200	150	50	$4,92 \times 10^{-6}$	$6,17 \times 10^{-6}$
360	960	1200	150	100	$4,92 \times 10^{-6}$	$6,17 \times 10^{-6}$
360	960	1200	150	200	$4,92 \times 10^{-6}$	$6,18 \times 10^{-6}$
360	960	1200	150	500	$4,93 \times 10^{-6}$	$6,19 \times 10^{-6}$
360	960	1200	150	1000	$4,94 \times 10^{-6}$	$6,2 \times 10^{-6}$
360	960	1200	300	50	$6,66 \times 10^{-6}$	$8,38 \times 10^{-6}$
360	960	1200	300	100	$6,67 \times 10^{-6}$	$8,38 \times 10^{-6}$
360	960	1200	300	200	$6,67 \times 10^{-6}$	$8,39 \times 10^{-6}$
360	960	1200	300	500	$6,68 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-6}$
360	960	1200	300	1000	$6,69 \times 10^{-6}$	$8,41 \times 10^{-6}$
360	960	1200	450	50	$8,41 \times 10^{-6}$	$1,06 \times 10^{-5}$
360	960	1200	450	100	$8,41 \times 10^{-6}$	$1,06 \times 10^{-5}$
360	960	1200	450	200	$8,42 \times 10^{-6}$	$1,06 \times 10^{-5}$
360	960	1200	450	500	$8,43 \times 10^{-6}$	$1,06 \times 10^{-5}$
360	960	1200	450	1000	$8,44 \times 10^{-6}$	$1,06 \times 10^{-5}$

B_{m2} [μm]	L_{m2} [μm]	L_{m3} [μm]	L_e [μm]	ω [hz]	c_{gral5}	c_{gral6}
480	600	960	150	50	$3,71 \times 10^{-6}$	$5,97 \times 10^{-6}$
480	600	960	150	100	$3,71 \times 10^{-6}$	$5,98 \times 10^{-6}$
480	600	960	150	200	$3,71 \times 10^{-6}$	$5,98 \times 10^{-6}$
480	600	960	150	500	$3,72 \times 10^{-6}$	6×10^{-6}
480	600	960	150	1000	$3,73 \times 10^{-6}$	$6,01 \times 10^{-6}$
480	600	960	300	50	$4,75 \times 10^{-6}$	$7,72 \times 10^{-6}$
480	600	960	300	100	$4,76 \times 10^{-6}$	$7,72 \times 10^{-6}$
480	600	960	300	200	$4,76 \times 10^{-6}$	$7,73 \times 10^{-6}$
480	600	960	300	500	$4,77 \times 10^{-6}$	$7,74 \times 10^{-6}$
480	600	960	300	1000	$4,78 \times 10^{-6}$	$7,76 \times 10^{-6}$
480	600	960	450	50	$5,8 \times 10^{-6}$	$9,47 \times 10^{-6}$
480	600	960	450	100	$5,81 \times 10^{-6}$	$9,47 \times 10^{-6}$
480	600	960	450	200	$5,81 \times 10^{-6}$	$9,48 \times 10^{-6}$
480	600	960	450	500	$5,82 \times 10^{-6}$	$9,49 \times 10^{-6}$
480	600	960	450	1000	$5,83 \times 10^{-6}$	$9,5 \times 10^{-6}$

B_{m2} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	ω [hz]	c_{gral7}
480	1200	150	50	$7,48 \times 10^{-6}$
480	1200	150	100	$7,49 \times 10^{-6}$
480	1200	150	200	$7,5 \times 10^{-6}$
480	1200	150	500	$7,51 \times 10^{-6}$
480	1200	150	1000	$7,53 \times 10^{-6}$
480	1200	300	50	$9,7 \times 10^{-6}$
480	1200	300	100	$9,7 \times 10^{-6}$
480	1200	300	200	$9,71 \times 10^{-6}$
480	1200	300	500	$9,73 \times 10^{-6}$
480	1200	300	1000	$9,74 \times 10^{-6}$
480	1200	450	50	$1,19 \times 10^{-5}$
480	1200	450	100	$1,19 \times 10^{-5}$
480	1200	450	200	$1,19 \times 10^{-5}$
480	1200	450	500	$1,19 \times 10^{-5}$
480	1200	450	1000	$1,2 \times 10^{-5}$

B_{m3} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	ω [hz]	c_{gral8}	c_{gral9}
600	960	1200	150	50	$7,03 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
600	960	1200	150	100	$7,04 \times 10^{-6}$	$8,81 \times 10^{-6}$
600	960	1200	150	200	$7,04 \times 10^{-6}$	$8,82 \times 10^{-6}$
600	960	1200	150	500	$7,06 \times 10^{-6}$	$8,84 \times 10^{-6}$
600	960	1200	150	1000	$7,08 \times 10^{-6}$	$8,86 \times 10^{-6}$
600	960	1200	300	50	$8,78 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$
600	960	1200	300	100	$8,78 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$
600	960	1200	300	200	$8,79 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$
600	960	1200	300	500	$8,81 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-5}$
600	960	1200	300	1000	$8,82 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-5}$
600	960	1200	450	50	$1,05 \times 10^{-5}$	$1,32 \times 10^{-5}$
600	960	1200	450	100	$1,05 \times 10^{-5}$	$1,32 \times 10^{-5}$
600	960	1200	450	200	$1,05 \times 10^{-5}$	$1,32 \times 10^{-5}$
600	960	1200	450	500	$1,06 \times 10^{-5}$	$1,33 \times 10^{-5}$
600	960	1200	450	1000	$1,06 \times 10^{-5}$	$1,33 \times 10^{-5}$

B_{m4} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	ω [hz]	c_{gral10}
960	1200	150	50	$1,28 \times 10^{-5}$
960	1200	150	100	$1,28 \times 10^{-5}$
960	1200	150	200	$1,28 \times 10^{-5}$
960	1200	150	500	$1,28 \times 10^{-5}$
960	1200	150	1000	$1,29 \times 10^{-5}$
960	1200	300	50	$1,5 \times 10^{-5}$
960	1200	300	100	$1,5 \times 10^{-5}$
960	1200	300	200	$1,5 \times 10^{-5}$
960	1200	300	500	$1,5 \times 10^{-5}$
960	1200	300	1000	$1,51 \times 10^{-5}$
960	1200	450	50	$1,72 \times 10^{-5}$
960	1200	450	100	$1,72 \times 10^{-5}$
960	1200	450	200	$1,72 \times 10^{-5}$
960	1200	450	500	$1,72 \times 10^{-5}$
960	1200	450	1000	$1,73 \times 10^{-5}$

Para el caso en que el acelerómetro se encuentre inmerso en aire enrarecido, es decir, se encapsule a una presión en el rango de 10 [kPa] a 100 [Pa], el coeficiente general de amortiguamiento se calculará mediante la ecuación 8.13, formada por dos componentes que involucran la temperatura (T), la presión (P), la masa molar del aire (M_m), la constante universal molar de los gases (R) y algunas dimensiones características de la placa móvil y de la geometría del acelerómetro (B_m , L_e , d_e y h_e). Fijando los valores de d_e en 2 [μm], h_e (grosor de los electrodos) en 3,5 [μm] y h_p (grosor de la placa) en 4 [μm] (para una placa formada con las capas estructurales de polisilicio y el recubrimiento metálico de oro) de acuerdo con las reglas de diseño del proceso Polymumps y considerando la temperatura T en 293 [K], la presión P en el rango de 10 [kPa] a 100 [Pa], la masa molar del aire M_m en 0,02897 [kg/mol] y la constante universal molar de los gases R en 8,31 [$\frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^2\cdot\text{K}}$], en la siguiente tabla se consignan los valores calculados para el coeficiente general de amortiguamiento en placas móviles de distintas dimensiones con cantidades y dimensiones variables de sus electrodos y una presión inicial de 10 [kPa].

Considerando que $n = 56$ para una placa de 480 [μm] de largo o $n = 72$ para una placa de 600 [μm] de largo o $n = 120$ para una placa de 960 [μm] de largo o $n = 152$ para una placa de 1200 [μm] de largo, los coeficientes de amortiguamiento quedan como a continuación se muestra.

B_{m1} [μm]	L_{m1} [μm]	L_{m2} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral1}	c_{ae_gral2}
360	480	600	150	$4,99 \times 10^{-6}$	$6,37 \times 10^{-6}$
360	480	600	300	$1,95 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$
360	480	600	450	$4,36 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{-5}$
B_{m1} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral3}	c_{ae_gral4}
360	960	1200	150	$1,05 \times 10^{-5}$	$1,33 \times 10^{-5}$
360	960	1200	300	$4,16 \times 10^{-5}$	$5,26 \times 10^{-5}$
360	960	1200	450	$9,33 \times 10^{-5}$	$1,18 \times 10^{-4}$
B_{m2} [μm]	L_{m1} [μm]	L_{m2} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral5}	c_{ae_gral6}
480	480	600	150	$5,04 \times 10^{-6}$	$6,42 \times 10^{-6}$
480	480	600	300	$1,95 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$
480	480	600	450	$4,37 \times 10^{-5}$	$5,61 \times 10^{-5}$
B_{m2} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral7}	c_{ae_gral8}
480	960	1200	150	$1,06 \times 10^{-5}$	$1,33 \times 10^{-5}$
480	960	1200	300	$4,16 \times 10^{-5}$	$5,26 \times 10^{-5}$
480	960	1200	450	$9,33 \times 10^{-5}$	$1,18 \times 10^{-4}$

B_{m3} [μm]	L_{m1} [μm]	L_{m2} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral9}	c_{ae_gral10}
600	480	600	150	$5,09 \times 10^{-6}$	$6,47 \times 10^{-6}$
600	480	600	300	$1,96 \times 10^{-5}$	$2,51 \times 10^{-5}$
600	480	600	450	$4,37 \times 10^{-5}$	$5,61 \times 10^{-5}$
B_{m3} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral11}	c_{ae_gral12}
600	960	1200	150	$1,06 \times 10^{-5}$	$1,34 \times 10^{-5}$
600	960	1200	300	$4,16 \times 10^{-5}$	$5,27 \times 10^{-5}$
600	960	1200	450	$9,34 \times 10^{-5}$	$1,18 \times 10^{-4}$
B_{m4} [μm]	L_{m1} [μm]	L_{m2} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral13}	c_{ae_gral14}
960	480	600	150	$5,25 \times 10^{-6}$	$6,63 \times 10^{-6}$
960	480	600	300	$1,97 \times 10^{-5}$	$2,53 \times 10^{-5}$
960	480	600	450	$4,39 \times 10^{-5}$	$5,63 \times 10^{-5}$
B_{m4} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral15}	c_{ae_gral16}
960	960	1200	150	$1,08 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-5}$
960	960	1200	300	$4,18 \times 10^{-5}$	$5,29 \times 10^{-5}$
960	960	1200	450	$9,35 \times 10^{-5}$	$1,18 \times 10^{-4}$

Ahora, con una presión de 100 [Pa] y el resto de los valores idénticos, se tiene:

B_{m1} [μm]	L_{m1} [μm]	L_{m2} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral1}	c_{ae_gral2}
360	480	600	150	$4,99 \times 10^{-8}$	$6,37 \times 10^{-8}$
360	480	600	300	$1,95 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-7}$
360	480	600	450	$4,36 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^{-7}$
B_{m1} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral3}	c_{ae_gral4}
360	960	1200	150	$1,05 \times 10^{-7}$	$1,33 \times 10^{-7}$
360	960	1200	300	$4,16 \times 10^{-7}$	$5,26 \times 10^{-7}$
360	960	1200	450	$9,33 \times 10^{-7}$	$1,18 \times 10^{-6}$
B_{m2} [μm]	L_{m1} [μm]	L_{m2} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral5}	c_{ae_gral6}
480	480	600	150	$5,04 \times 10^{-8}$	$6,42 \times 10^{-8}$
480	480	600	300	$1,95 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-7}$
480	480	600	450	$4,37 \times 10^{-7}$	$5,61 \times 10^{-7}$
B_{m2} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral7}	c_{ae_gral8}
480	960	1200	150	$1,06 \times 10^{-7}$	$1,33 \times 10^{-7}$
480	960	1200	300	$4,16 \times 10^{-7}$	$5,26 \times 10^{-7}$
480	960	1200	450	$9,33 \times 10^{-7}$	$1,18 \times 10^{-6}$
B_{m3} [μm]	L_{m1} [μm]	L_{m2} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral9}	c_{ae_gral10}
600	480	600	150	$5,09 \times 10^{-8}$	$6,47 \times 10^{-8}$
600	480	600	300	$1,96 \times 10^{-7}$	$2,51 \times 10^{-7}$
600	480	600	450	$4,37 \times 10^{-7}$	$5,61 \times 10^{-7}$
B_{m3} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral11}	c_{ae_gral12}
600	960	1200	150	$1,06 \times 10^{-7}$	$1,34 \times 10^{-7}$
600	960	1200	300	$4,16 \times 10^{-7}$	$5,27 \times 10^{-7}$
600	960	1200	450	$9,34 \times 10^{-7}$	$1,18 \times 10^{-6}$
B_{m4} [μm]	L_{m1} [μm]	L_{m2} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral13}	c_{ae_gral14}
960	480	600	150	$5,25 \times 10^{-8}$	$6,63 \times 10^{-8}$
960	480	600	300	$1,97 \times 10^{-7}$	$2,53 \times 10^{-7}$
960	480	600	450	$4,39 \times 10^{-7}$	$5,63 \times 10^{-7}$

B_{m4} [μm]	L_{m3} [μm]	L_{m4} [μm]	L_e [μm]	c_{ae_gral15}	c_{ae_gral16}
960	960	1200	150	$1,08 \times 10^{-7}$	$1,35 \times 10^{-7}$
960	960	1200	300	$4,18 \times 10^{-7}$	$5,29 \times 10^{-7}$
960	960	1200	450	$9,36 \times 10^{-7}$	$1,18 \times 10^{-6}$

Toca el turno al transductor mecánico-eléctrico con el cual se harán los registros de variación en la capacitancia que son proporcionales al desplazamiento y que a su vez son proporcionales a la aceleración experimentada por el dispositivo. De acuerdo con la ecuación 8.14, los parámetros que deben tenerse en cuenta para la determinación de dimensiones en el transductor son d_e que es la distancia de separación entre electrodos fijos y móviles, m_{total} que es la masa de la placa y de los electrodos móviles, n que es el número de pares de electrodos, L_e que es el traslape a lo largo entre los electrodos móviles y los electrodos fijos y h_e que es el grosor de los electrodos, además de parámetros eléctricos como A_2 , la ganancia de lazo abierto del amplificador operacional de salida en la etapa de acondicionamiento de la señal y V_0 , la amplitud de la componente de CD del voltaje con que se polarizan los electrodos (con valores de 6, 12 y 60 [V]) y el valor de la aceleración de entrada a ubicada en el rango de 100 a 10 [μg]. En las tablas siguientes se muestran algunos valores para el voltaje de salida que están en función de las características dimensionales y los parámetros eléctricos. Fijando algunos valores tales como: la separación entre electrodos $d_e = 2$ [μm] y el grosor de los electrodos $h_e = 3,5$ [μm] se puede construir una tabla con los posibles valores del voltaje de salida.

El valor correspondiente a m_{total1} se obtuvo de una placa de 1200 [μm] por 1200 [μm] formada con las dos capas estructurales de polisilicio y la capa adicional de metal con 152 electrodos de 150, 300 y 450 [μm], en cuanto a m_{total2} se obtuvo de una placa de 1200 [μm] por 960 [μm] formada con las dos capas estructurales de polisilicio y la capa adicional de metal con 120 electrodos de 150, 300 y 450 [μm] y m_{total3} se obtuvo a partir de una placa de 1200 [μm] por 600 [μm] formada con las dos capas estructurales de polisilicio y la capa adicional de metal con 72 electrodos de 150, 300 y 450 [μm].

m_{total1} [kg]	m_{total2} [kg]	L_e [μm]	V_0 [V]	a [m/s^2]	V_{out1} [mV]	V_{out2} [mV]
$2,36 \times 10^{-8}$	$1,88 \times 10^{-8}$	150	6	0,981	54,5	55,2
$2,36 \times 10^{-8}$	$1,88 \times 10^{-8}$	150	6	0,0981	5,45	5,52
$2,36 \times 10^{-8}$	$1,88 \times 10^{-8}$	150	12	0,981	27,25	27,6
$2,36 \times 10^{-8}$	$1,88 \times 10^{-8}$	150	12	0,0981	2,72	2,76
$2,36 \times 10^{-8}$	$1,88 \times 10^{-8}$	150	60	0,981	5,45	5,52
$2,36 \times 10^{-8}$	$1,88 \times 10^{-8}$	150	60	0,0981	,54	0,55
$2,41 \times 10^{-8}$	$1,93 \times 10^{-8}$	300	6	0,981	27,89	28,25
$2,41 \times 10^{-8}$	$1,93 \times 10^{-8}$	300	6	0,0981	2,79	2,82
$2,41 \times 10^{-8}$	$1,93 \times 10^{-8}$	300	12	0,981	13,95	14,12
$2,41 \times 10^{-8}$	$1,93 \times 10^{-8}$	300	12	0,0981	1,4	1,41
$2,41 \times 10^{-8}$	$1,93 \times 10^{-8}$	300	60	0,981	2,79	2,82
$2,41 \times 10^{-8}$	$1,93 \times 10^{-8}$	300	60	0,0981	,28	,28
$2,47 \times 10^{-8}$	$1,97 \times 10^{-8}$	450	6	0,981	19,03	19,26
$2,47 \times 10^{-8}$	$1,97 \times 10^{-8}$	450	6	0,0981	1,9	1,93
$2,47 \times 10^{-8}$	$1,97 \times 10^{-8}$	450	12	0,981	9,51	9,63
$2,47 \times 10^{-8}$	$1,97 \times 10^{-8}$	450	12	0,0981	,95	,96
$2,47 \times 10^{-8}$	$1,97 \times 10^{-8}$	450	60	0,981	1,9	1,92
$2,47 \times 10^{-8}$	$1,97 \times 10^{-8}$	450	60	0,0981	,19	,19

m_{total3} [kg]	L_e [μm]	V_0 [V]	a [m/s^2]	V_{out3} [mV]
$1,18 \times 10^{-8}$	150	6	0,981	57,44
$1,18 \times 10^{-8}$	150	6	0,0981	5,74
$1,18 \times 10^{-8}$	150	12	0,981	28,72
$1,18 \times 10^{-8}$	150	12	0,0981	2,87
$1,18 \times 10^{-8}$	150	60	0,981	5,74
$1,18 \times 10^{-8}$	150	60	0,0981	,57
$1,2 \times 10^{-8}$	300	6	0,981	29,36
$1,2 \times 10^{-8}$	300	6	0,0981	2,94
$1,2 \times 10^{-8}$	300	12	0,981	14,68
$1,2 \times 10^{-8}$	300	12	0,0981	1,47
$1,2 \times 10^{-8}$	300	60	0,981	2,93
$1,2 \times 10^{-8}$	300	60	0,0981	,29
$1,23 \times 10^{-8}$	450	6	0,981	20
$1,23 \times 10^{-8}$	450	6	0,0981	2
$1,23 \times 10^{-8}$	450	12	0,981	10
$1,23 \times 10^{-8}$	450	12	0,0981	1
$1,23 \times 10^{-8}$	450	60	0,981	2
$1,23 \times 10^{-8}$	450	60	0,0981	,2

Con la fuerza electrostática generada por el transductor mecánico eléctrico realimentado, las ecuaciones 6.12 y 6.13 muestran que el sistema tiene una constante elástica efectiva k_{eff} , la cual se calcula a partir de la constante k de la suspensión más el término $\frac{2nL_e h_e \varepsilon \varepsilon_0 V_0^2 \alpha A_{op}}{d_e^3}$, correspondiente a la actuación electrostática. En la tabla siguiente se enlistan valores para el término debido a la actuación electrostática en función de la cantidad y dimensiones de los electrodos.

Con $h_e = 3,5$ [μm], $d_e = 2$ [μm], $\alpha = \frac{1}{20}$, $A_{op} = 20$, $\varepsilon_0 = 8,8544 \times 10^{-12}$ y $\varepsilon = 1,00059$, se tienen como valores posibles para la constante elástica electrostática los enlistados en la tabla siguiente. El valor de $n = 40$ corresponde a una placa de 360 [μm] de largo, $n = 56$ corresponde a una placa de 480 [μm] de largo, $n = 72$ representa una placa de 600 [μm] de largo, $n = 120$ una placa de 960 [μm] de largo y $n = 152$ es el número de electrodos para una placa de 1200 [μm] de largo.

L_e [μm]	n	V_0 [V]	$k_{electrostática}$ [kg/s^2]
150	40	6	1,6745
150	40	12	2,3443
150	40	60	3,014
150	56	6	5,0234
150	56	12	6,363
150	56	60	3,3489
150	72	6	4,6885
150	72	12	6,028
150	72	60	10,0468
150	120	6	12,726
150	120	12	5,0234
150	120	60	7,0328
150	152	6	9,0421
150	152	12	15,0702
150	152	60	19,0889

L_e [μm]	n	V_0 [V]	$k_{electrostática}$ [kg/s^2]
300	40	6	6,6979
300	40	12	9,377
300	40	60	12,0562
300	56	6	20,0936
300	56	12	25,4519
300	56	60	13,3958
300	72	6	18,7541
300	72	12	24,1124
300	72	60	40,1873
300	120	6	50,9039
300	120	12	20,0936
300	120	60	28,1311
300	152	6	36,1685
300	152	12	60,2809
300	152	60	76,3558
450	40	6	167,4469
450	40	12	234,4257
450	40	60	301,4044
450	56	6	502,3407
450	56	12	636,2982
450	56	60	334,8938
450	72	6	468,8513
450	72	12	602,8088
450	72	60	1004,6814
450	120	6	1272,5964
450	120	12	502,3407
450	120	60	703,277
450	152	6	904,2132
450	152	12	1507,022
450	152	60	1908,8946

Es necesario escoger ahora las características dimensionales para el diseño del acelerómetro en función del factor de calidad y la frecuencia de resonancia. A partir de los valores consignados en todas las tablas previas en este capítulo y de las definiciones de frecuencia de resonancia y factor de calidad, las propuestas dimensionales para la masa móvil será de 600 por 1200, 960 por 1200, 1200 por 360 y 1200 por 480 micrometros cuadrados empleando una capa estructural de polisilicio, dos capas estructurales de polisilicio y dos capas estructurales de polisilicio más el recubrimiento de metal. En cuanto a la suspensión se probaron las de tipo caja con bordes redondeados, la de tipo caja con bordes angulares a 90 grados y la de tipo sagital; resultaron ser mucho mejores las suspensiones tipo caja con bordes angulares a 90 grados y la de tipo sagital; las dimensiones de la suspensión con bordes angulares serán de 30 por 200 y en la de tipo sagital se emplearán ángulos de 15, 30 y 45 grados y longitudes de 200, 300 y 400 [μm]. Los electrodos tendrán 300 [μm] de largo y 3,5 [μm] de grosor. La alimentación eléctrica de entrada tendrá la forma $V_0 + V_1 \sin(\omega t)$, V_0 tomará valores de entre 6 y 12 [V], V_1 será $\frac{1}{20}V_0$ y ω será un orden mayor que la frecuencia de resonancia del dispositivo. La presión a la que se simulará el encapsulado del sensor inercial sera de entre 10 [kPa] y 100 [Pa] y la aceleración de entrada se ubicará entre 100 y 10 mG's.

Primera propuesta de diseño para el acelerómetro.

- Dimensiones de la placa móvil (ancho por largo en [μm] cada una): 600×1200
- Grosor de la placa móvil: primera y segunda capas estructurales de polisilicio más capa metálica de recubrimiento (4 [μm]).
- Masa de la placa móvil más masa de los electrodos (expresada en [kg]): $12,66 \times 10^{-9}$

- Suspensión tipo caja con bordes angulares a 90 grados (ancho, grosor, largo de la vigas mayor y menor en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3,5, 3,5, 200 y 30
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección x (k_x , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 4,9636
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección z (k_z , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 1,0481
- Desplazamiento de la placa móvil bajo el efecto de su peso en la dirección z (expresado en $[\mu\text{m}]$): 0,12
- Dimensiones de los electrodos en el sensor capacitivo y actuador electrostático (ancho, grosor y largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3, 3,5 y 300
- Cantidad de pares de electrodos colocados a lo largo de la placa móvil: 152
- Componente de corriente directa en el voltaje de alimentación para el sensor capacitivo y actuador electrostático (expresada en $[\text{V}]$): 6
- Constante de elasticidad generada por la fuerza electrostática en el actuador (k_e , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 12,726
- Constante de elasticidad efectiva ($k_{ef} = k_x + k_e$, expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 17,6896
- Presión del encapsulado del dispositivo (expresada en $[\text{Pa}]$): 100
- Coeficiente general de amortiguamiento en aire enrarecido (expresado en $[\text{kg}/\text{s}]$): $0,527 \times 10^{-6}$
- Frecuencia natural de oscilación (expresada en $[\text{kHz}]$): 37,387
- Razón de amortiguamiento (adimensional): $556,882 \times 10^{-6}$
- Frecuencia de resonancia (expresada en $[\text{kHz}]$): 37,387
- Factor de calidad (adimensional): 897,8566
- Rango de aceleraciones que puede detectar (expresado en miligravedades): de 10 a 100
- Rango de voltajes de salida (expresado en $[\text{mV}]$): de 1,4633 a 14,633

Segunda propuesta de diseño para el acelerómetro.

- Dimensiones de la placa móvil (ancho por largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 600×1200
- Grosor de la placa móvil: primera y segunda capas estructurales de polisilicio más capa metálica de recubrimiento ($4 [\mu\text{m}]$).
- Masa de la placa móvil más masa de los electrodos (expresada en $[\text{kg}]$): $12,66 \times 10^{-9}$
- Suspensión tipo sagital con ángulo de 45 grados (ancho, grosor y largo de la viga en $[\mu\text{m}]$ cada uno): 3,5, 3,5 y 200
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección x (k_x , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 12,005
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección z (k_z , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 0,2383
- Desplazamiento de la placa móvil bajo el efecto de su peso en la dirección z (expresado en $[\mu\text{m}]$): 0,52
- Dimensiones de los electrodos en el sensor capacitivo y actuador electrostático (ancho, grosor y largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3, 3,5 y 300
- Cantidad de pares de electrodos colocados a lo largo de la placa móvil: 152
- Componente de corriente directa en el voltaje de alimentación para el sensor capacitivo y actuador electrostático (expresada en $[\text{V}]$): 6

- Constante de elasticidad generada por la fuerza electrostática en el actuador (k_e , expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 12,726
- Constante de elasticidad efectiva ($k_{ef} = k_x + k_e$, expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 24,731
- Presión del encapsulado del dispositivo (expresada en $[\text{Pa}]$): 100
- Coeficiente general de amortiguamiento en aire enrarecido (expresado en $[\text{kg/s}]$): $0,527 \times 10^{-6}$
- Frecuencia natural de oscilación (expresada en $[\text{kHz}]$): 44,206
- Razón de amortiguamiento (adimensional): $470,979 \times 10^{-6}$
- Frecuencia de resonancia (expresada en $[\text{kHz}]$): 44,206
- Factor de calidad (adimensional): 1061,6194
- Rango de aceleraciones que puede detectar (expresado en miligravedades): de 10 a 100
- Rango de voltajes de salida (expresado en $[\text{mV}]$): de 1,4633 a 14,633

Tercera propuesta de diseño para el acelerómetro.

- Dimensiones de la placa móvil (ancho por largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 960×1200
- Grosor de la placa móvil: primera y segunda capas estructurales de polisilicio más capa metálica de recubrimiento (4 $[\mu\text{m}]$).
- Masa de la placa móvil más masa de los electrodos (expresada en $[\text{kg}]$): $19,53 \times 10^{-9}$
- Suspensión tipo caja con bordes angulares a 90 grados (ancho, grosor y largos mayor y menor de las vigas expresadas en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3,5, 3,5, 200 y 30
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección x (k_x , expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 4,9636
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección z (k_z , expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 1,0481
- Desplazamiento de la placa móvil bajo el efecto de su peso en la dirección z (expresado en $[\mu\text{m}]$): 0,183
- Dimensiones de los electrodos en el sensor capacitivo y actuador electrostático (ancho, grosor y largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3, 3,5 y 300
- Cantidad de pares de electrodos colocados a lo largo de la placa móvil: 152
- Componente de corriente directa en el voltaje de alimentación para el sensor capacitivo y actuador electrostático (expresada en $[\text{V}]$): 6
- Constante de elasticidad generada por la fuerza electrostática en el actuador (k_e , expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 12,726
- Constante de elasticidad efectiva ($k_{ef} = k_x + k_e$, expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 17,6896
- Presión del encapsulado del dispositivo (expresada en $[\text{Pa}]$): 100
- Coeficiente general de amortiguamiento en aire enrarecido (expresado en $[\text{kg/s}]$): $0,5286 \times 10^{-6}$
- Frecuencia natural de oscilación (expresada en $[\text{kHz}]$): 30,091
- Razón de amortiguamiento (adimensional): $449,553 \times 10^{-6}$
- Frecuencia de resonancia (expresada en $[\text{kHz}]$): 30,091
- Factor de calidad (adimensional): 1112,2163

- Rango de aceleraciones que puede detectar (expresado en miligravedades): de 10 a 100
- Rango de voltajes de salida (expresado en [mV]): de 2,2589 a 22,5895

Cuarta propuesta de diseño para el acelerómetro.

- Dimensiones de la placa móvil (ancho por largo en [μm] cada una): 960×1200
- Grosor de la placa móvil: primera y segunda capas estructurales de polisilicio más capa metálica de recubrimiento (4 [μm]).
- Masa de la placa móvil más masa de los electrodos (expresada en [kg]): $19,53 \times 10^{-9}$
- Suspensión tipo sagital con ángulo de 45 grados (ancho, grosor y largo de la viga en [μm] cada uno): 3,5, 3,5 y 200
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección x (k_x , expresada en [kg/s^2]): 12,005
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección z (k_z , expresada en [kg/s^2]): 0,2383
- Desplazamiento de la placa móvil bajo el efecto de su peso en la dirección z (expresado en [μm]): 0,804
- Dimensiones de los electrodos en el sensor capacitivo y actuador electrostático (ancho, grosor y largo en [μm] cada una): 3, 3,5 y 300
- Cantidad de pares de electrodos colocados a lo largo de la placa móvil: 152
- Componente de corriente directa en el voltaje de alimentación para el sensor capacitivo y actuador electrostático (expresada en [V]): 6
- Constante de elasticidad generada por la fuerza electrostática en el actuador (k_e , expresada en [kg/s^2]): 12,726
- Constante de elasticidad efectiva ($k_{ef} = k_x + k_e$, expresada en [kg/s^2]): 24,731
- Presión del encapsulado del dispositivo (expresada en [Pa]): 100
- Coeficiente general de amortiguamiento en aire enrarecido (expresado en [kg/s]): $0,5286 \times 10^{-6}$
- Frecuencia natural de oscilación (expresada en [kHz]): 35,579
- Razón de amortiguamiento (adimensional): $380,206 \times 10^{-6}$
- Frecuencia de resonancia (expresada en [kHz]): 35,579
- Factor de calidad (adimensional): 1315,0769
- Rango de aceleraciones que puede detectar (expresado en miligravedades): de 10 a 100
- Rango de voltajes de salida (expresado en [mV]): de 2,2589 a 22,5895

Quinta propuesta de diseño para el acelerómetro.

- Dimensiones de la placa móvil (ancho por largo en [μm] cada una): 1200×360
- Grosor de la placa móvil: primera y segunda capas estructurales de polisilicio más capa metálica de recubrimiento (4 [μm]).
- Masa de la placa móvil más masa de los electrodos (expresada en [kg]): $7,1909 \times 10^{-9}$

- Suspensión tipo caja con bordes angulares a 90 grados (ancho, grosor y largos mayor y menor de las vigas expresadas en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3,5, 3,5, 200 y 30
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección x (k_x , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 4,9636
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección z (k_z , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 1,0481
- Desplazamiento de la placa móvil bajo el efecto de su peso en la dirección z (expresado en $[\mu\text{m}]$): 0,07
- Dimensiones de los electrodos en el sensor capacitivo y actuador electrostático (ancho, grosor y largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3, 3,5 y 300
- Cantidad de pares de electrodos colocados a lo largo de la placa móvil: 40
- Componente de corriente directa en el voltaje de alimentación para el sensor capacitivo y actuador electrostático (expresada en $[\text{V}]$): 6
- Constante de elasticidad generada por la fuerza electrostática en el actuador (k_e , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 3,3489
- Constante de elasticidad efectiva ($k_{ef} = k_x + k_e$, expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 8,3125
- Presión del encapsulado del dispositivo (expresada en $[\text{Pa}]$): 100
- Coeficiente general de amortiguamiento en aire enrarecido (expresado en $[\text{kg}/\text{s}]$): $0,1433 \times 10^{-6}$
- Frecuencia natural de oscilación (expresada en $[\text{kHz}]$): 33,99
- Razón de amortiguamiento (adimensional): $292,988 \times 10^{-6}$
- Frecuencia de resonancia (expresada en $[\text{kHz}]$): 33,97
- Factor de calidad (adimensional): 1706,5549
- Rango de aceleraciones que puede detectar (expresado en miligravedades): de 10 a 100
- Rango de voltajes de salida (expresado en $[\text{mV}]$): de 3,1596 a 31,5961

Sexta propuesta de diseño para el acelerómetro.

- Dimensiones de la placa móvil (ancho por largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 1200×360
- Grosor de la placa móvil: primera y segunda capas estructurales de polisilicio más capa metálica de recubrimiento ($4 [\mu\text{m}]$).
- Masa de la placa móvil más masa de los electrodos (expresada en $[\text{kg}]$): $7,1909 \times 10^{-9}$
- Suspensión tipo sagital con ángulo de 45 grados (ancho, grosor y largo de la viga en $[\mu\text{m}]$ cada uno): 3,5, 3,5 y 200
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección x (k_x , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 12,005
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección z (k_z , expresada en $[\text{kg}/\text{s}^2]$): 0,2383
- Desplazamiento de la placa móvil bajo el efecto de su peso en la dirección z (expresado en $[\mu\text{m}]$): 0,296
- Dimensiones de los electrodos en el sensor capacitivo y actuador electrostático (ancho, grosor y largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3, 3,5 y 300
- Cantidad de pares de electrodos colocados a lo largo de la placa móvil: 40
- Componente de corriente directa en el voltaje de alimentación para el sensor capacitivo y actuador electrostático (expresada en $[\text{V}]$): 6

- Constante de elasticidad generada por la fuerza electrostática en el actuador (k_e , expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 3,3489
- Constante de elasticidad efectiva ($k_{ef} = k_x + k_e$, expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 15,3539
- Presión del encapsulado del dispositivo (expresada en $[\text{Pa}]$): 100
- Coeficiente general de amortiguamiento en aire enrarecido (expresado en $[\text{kg/s}]$): $0,1433 \times 10^{-6}$
- Frecuencia natural de oscilación (expresada en $[\text{kHz}]$): 46,208
- Razón de amortiguamiento (adimensional): $215,579 \times 10^{-6}$
- Frecuencia de resonancia (expresada en $[\text{kHz}]$): 46,208
- Factor de calidad (adimensional): 2319,3333
- Rango de aceleraciones que puede detectar (expresado en miligravedades): de 10 a 100
- Rango de voltajes de salida (expresado en $[\text{mV}]$): de 3,1596 a 31,5961

Séptima propuesta de diseño para el acelerómetro.

- Dimensiones de la placa móvil (ancho por largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 1200×480
- Grosor de la placa móvil: primera y segunda capas estructurales de polisilicio más capa metálica de recubrimiento (4 $[\mu\text{m}]$).
- Masa de la placa móvil más masa de los electrodos (expresada en $[\text{kg}]$): $9,6098 \times 10^{-9}$
- Suspensión tipo caja con bordes angulares a 90 grados (ancho, grosor y largos mayor y menor de las vigas en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3,5, 3,5, 200 y 30
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección x (k_x , expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 4,9636
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección z (k_z , expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 1,0481
- Desplazamiento de la placa móvil bajo el efecto de su peso en la dirección z (expresado en $[\mu\text{m}]$): 0,09
- Dimensiones de los electrodos en el sensor capacitivo y actuador electrostático (ancho, grosor y largo en $[\mu\text{m}]$ cada una): 3, 3,5 y 300
- Cantidad de pares de electrodos colocados a lo largo de la placa móvil: 56
- Componente de corriente directa en el voltaje de alimentación para el sensor capacitivo y actuador electrostático (expresada en $[\text{V}]$): 6
- Constante de elasticidad generada por la fuerza electrostática en el actuador (k_e , expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 4,6885
- Constante de elasticidad efectiva ($k_{ef} = k_x + k_e$, expresada en $[\text{kg/s}^2]$): 9,6521
- Presión del encapsulado del dispositivo (expresada en $[\text{Pa}]$): 100
- Coeficiente general de amortiguamiento en aire enrarecido (expresado en $[\text{kg/s}]$): $0,1985 \times 10^{-6}$
- Frecuencia natural de oscilación (expresada en $[\text{kHz}]$): 31,692
- Razón de amortiguamiento (adimensional): $325,811 \times 10^{-6}$
- Frecuencia de resonancia (expresada en $[\text{kHz}]$): 31,692
- Factor de calidad (adimensional): 1534,6306

- Rango de aceleraciones que puede detectar (expresado en miligravedades): de 10 a 100
- Rango de voltajes de salida (expresado en [mV]): de 3,016 a 30,1605

Octava propuesta de diseño para el acelerómetro.

- Dimensiones de la placa móvil (ancho por largo en [μm] cada una): 1200×480
- Grosor de la placa móvil: primera y segunda capas estructurales de polisilicio más capa metálica de recubrimiento (4 [μm]).
- Masa de la placa móvil más masa de los electrodos (expresada en [kg]): $9,6098 \times 10^{-9}$
- Suspensión tipo sagital con ángulo de 45 grados (ancho, grosor y largo de la viga en [μm] cada uno): 3,5, 3,5 y 200
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección x (k_x , expresada en [kg/s^2]): 12,005
- Constante de elasticidad de la suspensión en la dirección z (k_z , expresada en [kg/s^2]): 0,2383
- Desplazamiento de la placa móvil bajo el efecto de su peso en la dirección z (expresado en [μm]): 0,396
- Dimensiones de los electrodos en el sensor capacitivo y actuador electrostático (ancho, grosor y largo en [μm] cada una): 3, 3,5 y 300
- Cantidad de pares de electrodos colocados a lo largo de la placa móvil: 56
- Componente de corriente directa en el voltaje de alimentación para el sensor capacitivo y actuador electrostático (expresada en [V]): 6
- Constante de elasticidad generada por la fuerza electrostática en el actuador (k_e , expresada en [kg/s^2]): 4,6885
- Constante de elasticidad efectiva ($k_{ef} = k_x + k_e$, expresada en [kg/s^2]): 16,6935
- Presión del encapsulado del dispositivo (expresada en [Pa]): 100
- Coeficiente general de amortiguamiento en aire enrarecido (expresado en [kg/s]): $0,1985 \times 10^{-6}$
- Frecuencia natural de oscilación (expresada en [kHz]): 41,678
- Razón de amortiguamiento (adimensional): $247,744 \times 10^{-6}$
- Frecuencia de resonancia (expresada en [kHz]): 41,678
- Factor de calidad (adimensional): 2018,2101
- Rango de aceleraciones que puede detectar (expresado en miligravedades): de 10 a 100
- Rango de voltajes de salida (expresado en [mV]): de 3,016 a 30,1605

9.2. Simulación mediante ecuaciones diferenciales de parámetros concentrados

Es necesario prever el comportamiento de los acelerómetros propuestos bajo distintos tipos de entrada (aceleraciones) y condiciones iniciales, para ello será necesario realizar simulaciones numéricas de las ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento del dispositivo. El software más adecuado para realizar las simulaciones numéricas es Matlab. debido a la disposición de distintos métodos numéricos para la solución de las ecuaciones diferenciales de parámetros distribuidos y a su capacidad para despliegue y manipulación de gráficas.

El primer paso será retomar la ecuación diferencial del sistema masa-resorte-amortiguador que gobierna el comportamiento del acelerómetro. De acuerdo con las ecuaciones 3.108, 3.111, 3.112, 3.115 y 6.12 y lo señalado en la sección anterior, se puede reescribir la ecuación diferencial que gobierna al acelerómetro de la siguiente forma:

$$m_{total}\ddot{x} + c_{gral}\dot{x} + k_{eff}x = F_{ent}$$

dónde m_{total} es la masa de la placa móvil suspendida más la masa de los electrodos del sensor capacitivo y actuador electrostático, c_{gral} es el coeficiente general de amortiguamiento (a 293 [K] de temperatura y 10000 [Pa] de presión) resultante de la suma de los efectos provocados por el arrastre de la placa en aire enrarecido y la compresión de las delgadas películas de aire enrarecido atrapadas entre los electrodos móviles y fijos del sensor capacitivo y actuador electrostático, k_{eff} es la constante elástica efectiva del sistema que resulta de la adición de la constante elástica mecánica de la suspensión que mantiene elevada sobre el sustrato a la placa móvil y la constante elástica electrostática generada al alimentar el sensor capacitivo diferencial que se comporta entonces como actuador y crea fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión entre los electrodos fijos y móviles. del dispositivo y F_{ent} es la fuerza de entrada formada por una aceleración que es función del tiempo, $a_{ent}(t)$, multiplicada por una constante M , se tiene:

$$m_{total}\ddot{x} + c_{gral}\dot{x} + k_{eff}x = Ma_{ent}(t)$$

Para obtener la representación de la ecuación diferencial mediante una ecuación de estados, se parte de:

$$m_{total}\frac{d^2}{dt^2}x(t) + c_{gral}\frac{d}{dt}x(t) + k_{eff}x(t) = Ma_{ent}(t) \quad (9.1)$$

Si ahora se definen:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x(t) \\ x_2(t) &= \frac{d}{dt}x(t) \end{aligned}$$

Se tiene que:

$$\frac{d}{dt}x_2(t) = \frac{d^2}{dt^2}x(t)$$

Por lo que, la ecuación diferencial 9.1 puede expresarse mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales lineales de primer orden:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}x_1(t) &= x_2(t) \\ \frac{d}{dt}x_2(t) &= -\frac{k_{eff}}{m_{total}}x_1(t) - \frac{c_{gral}}{m_{total}}x_2(t) + \frac{M}{m_{total}}a_{ent}(t)\end{aligned}$$

Lo que en forma matricial queda expresado como:

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt}x_1(t) \\ \frac{d}{dt}x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_{eff}}{m_{total}} & -\frac{c_{gral}}{m_{total}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M}{m_{total}} \end{bmatrix} a_{ent}(t)$$

Dado que la ecuación de salida tiene la forma: $y = Cx + Du$, se tiene que:

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} a_{ent}$$

Por lo tanto, para el acelerómetro las matrices de representación en espacio de estados serán:

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_{eff}}{m_{total}} & -\frac{c_{gral}}{m_{total}} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M}{m_{total}} \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ D &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Por conveniencia se definirá las condiciones iniciales como:

$$\begin{aligned}x_1(0) &= 0 \\ x_2(0) &= 0\end{aligned}$$

Y se hará unitario el cociente $\frac{M}{m_{total}}$, de modo que las matrices de representación en espacio de estados para el acelerómetro quedarán como:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_{eff}}{m_{total}} & -\frac{c_{gral}}{m_{total}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Con el uso del siguiente script en Matlab, se obtiene una muy buena aproximación del comportamiento del acelerómetro bajo condiciones de operación reales, la simulación incluye gráficas con la respuesta en el tiempo (desplazamiento, velocidad y aceleración), la salida de voltaje (asociada con la aceleración), la respuesta en frecuencia y las curvas de relación entre aceleración y desplazamiento relativo que son muy importantes para el análisis de la estabilidad del dispositivo bajo la polarización en el sensor-actuador capacitivo-electrostático que puede provocar el nocivo efecto de llegada.

```
%Simulacion de un acelerometro capacitivo disennado con el proceso Polymumps
clear all;          %Borrar la memoria de trabajo de Matlab
close all;         %Cerrar todos los archivos y ventanas
clc;              %Borrar la pantalla de trabajo de Matlab

a=.981;           %Aceleracion de entrada

%Constantes fisicas y matematicas
rho_Si=2.33e3;    %Densidad del Si
rho_Au=1.93e4;   %Densidad del Oro
E=1.6e11;        %Modulo de Young para el Si
v=0.23;         %Constante o razon de Poisson para el Si
G=(E/(2*(1+v))); %Modulo volumetrico para el Silicio
mu=1.81e-11;    %Viscosidad del aire a 293 K
rho_aire=1.204e-18; %Densidad del aire
R=8.31;         %Constante universal molar de los gases
Mm=0.028965;    %Masa molar del aire
T=293;         %Temperatura ambiente en grados K
Patm=101325;    %Presion atmosferica en Pa
Pvacioabajo=10000; %Presion en vacio bajo
Pvaciomedio=100; %Presion en vacio medio
P=Pvaciomedio;
epsilon0=8.8544e-12; %Permeabilidad electrica del vacio
epsilon=1.00059; %Permeabilidad relativa del aire
pi=3.1416;     %Valor de Pi
gravedad=9.81; %Valor de la gravedad [m/s^2]

%Calculo de la masa de la placa movil mas la masa de los electrodos
LmC1=0.0012;   %Largo de la primera capa de la masa movil
bmC1=0.0006;  %Ancho de la primera capa de la masa movil
hmC1=0.000002; %Grosor de la primera capa de la masa movil
LmC2=0.0012;  %Largo de la segunda capa de la masa movil
```

```

bmC2=0.0006;           %Ancho de la segunda capa de la masa movil
hmC2=0.0000015;       %Grosor de la segunda capa de la masa movil
LmC3=0.0012;          %Largo de la tercera capa de la masa movil
bmC3=0.0006;           %Ancho de la tercera capa de la masa movil
hmC3=0.0000005;       %Grosor de la tercera capa de la masa movil
LeC1C2=0.0003;        %Largo de los electrodos
beC1C2=0.000003;      %Ancho de los electrodos
heC1C2=0.0000035;     %Grosor de los electrodos

%Numero de agujeros en la placa movil
n_agujeros=(((LmC1/0.00003)-1)*((bmC1/0.00003)-1));
%Numero de pares de electrodos que caben a lo largo de la placa
n_electrodos=floor(2*(LmC1-0.00005)/0.000015)-1;

%Masa de los agujeros en la capa Poly1
masaAgujerosC1=n_agujeros*(0.000004*0.000004*0.000002)*rho_Si;
%Masa de los agujeros en la capa Poly2
masaAgujerosC2=n_agujeros*(0.000008*0.000008*0.0000015)*rho_Si;
%Masa de los agujeros en la capa Metal
masaAgujerosC3=n_agujeros*(0.000012*0.000012*0.0000005)*rho_Au;

%Masa de la capa Poly1
masaCapa1=((LmC1*bmC1*hmC1)*rho_Si)-masaAgujerosC1;
%Masa de la capa Poly2
masaCapa2=((LmC2*bmC2*hmC2)*rho_Si)-masaAgujerosC2;
%Masa de la capa Metal
masaCapa3=(((LmC3-0.000006)*(bmC3-0.000006)*hmC3)*rho_Au)-masaAgujerosC3;

%Masa de la placa movil creada con las dos capas estructurales de
%polisilicio mas la capa de metal
masaPlacaMovil=(masaCapa1+masaCapa2+masaCapa3);
%Masa de los electrodos pegados a lo largo de la placa movil
masaElectrodos=n_electrodos*((LeC1C2+0.00002)*beC1C2*heC1C2)*rho_Si;

%Masa de la placa mas la masa de los electrodos,
%lo que forma la masa total del acelerometro
m=masaPlacaMovil+masaElectrodos;

%Calculo de la constante de elasticidad mecanica
%en las direcciones x y z para suspension tipo
%caja con los bordes angulares a 90 grados
%Largo de la viga principal de la suspension sujeta a la masa
L1s=0.0002;
%Largo de la viga lateral de la suspension
L2s=0.00003;
%Largo de la viga de la suspension sujeta al ancla
L3s=0.0002;
%Ancho de la viga que forma la suspension
bs=0.0000035;
%Grosor de la viga que forma la suspension
hs=0.0000035;
%Momento de inercia para las flexiones en la direccion z
Iy=(bs*hs^3)/12;
%Momento de inercia torsional de la viga que forma la suspension

```


9.2. SIMULACIÓN MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES DE PARÁMETROS CONCENTRADOS 313

```

It=(bs*hs^3*((16/3)-(3.36*hs/bs)))/16;
%Constante elastica de la suspension en la direccion x
kmecx=2*((6*(4*L1s*L2s+L2s^2+4*L2s*L3s+12*L1s*L3s)*E*Iy)/(L2s*L3s^4+\
3*L1s*L3s^4+L1s^3*L2s^2+4*L1s^3*L2s*L3s+3*L1s^2*L2s*L3s^2+4*L1s*L2s*L3s^3+\
L1s^4*L2s+3*L1s^4*L3s+L2s^2*L3s^3));
%Constante elastica de la suspension en la direccion z
kmecz=2*(6*E*Iy*It/(3*E*Iy*L2s*(L1s^2+L1s*L2s)+G*It*(2*L1s^3+L2s^3)));

%Calculo de la constante electrostatica de elasticidad
%Voltaje de polarizacion en el sensor capacitivo y actuador electrostatico
V0=6;
%Cte de proporcionalidad entre la amplitud de la componente de CD y AC del
%voltaje de alimentacion
alfa=0.05;
%Valor de amplificacion del OpAmp Aop de realimentacion
beta=20;
%Separacion entre los electrodos sujetos a la masa movil y
%los electrodos fijos
de=0.000002;
%Valor de la constante de elasticidad electrostatica debida
a la polarizacion del sensor capacitivo y actuador electrostatico
kelecx=(2*n_electrodos*LeC1C2*heC1C2*epsilon*epsilon0*(V0^2)*alfa*beta)/(de^3);

%Calculo de la constante efectiva de elasticidad
k=kmecx+kelecx; %Valor de la constante efectiva de elasticidad

%Calculo del coeficiente general de amortiguamiento en aire enrarecido
%Coeficiente de amortiguamiento provocado por el movimiento de
%la placa en aire enrarecido
c_ae_placa=4*sqrt(2/pi)*sqrt(Mm/(R*T))*P*bmC1*(hmC1+hmC2+hmC3);
%Coeficiente de amortiguamiento provocado por la compresion de
%las peliculas de aire enrarecido atrapadas entre los electrodos en movimiento
c_ae_electrodos=0.0635*n_electrodos*(LeC1C2/de)*sqrt(Mm/(R*T))*P*LeC1C2*heC1C2;
c=c_ae_placa+c_ae_electrodos;

%Desplazamiento en z
z=(m*gravedad)/kmecz;

%Calculo de la estabilidad, analisis aceleracion ponderada frente
a desplazamiento relativo
%Coeficiente que involucra a la componente DC del volt. de alimentacion
p0=(n_electrodos*LeC1C2*heC1C2*epsilon*epsilon0*(V0^2))/(2*kmecx*(de^3));
%Relacion entre la fuerza de la masa sujeta a una determinada aceleracion
de entrada y la fuerza del resorte formado por la suspension
q=(m*a)/(k*de);
%Desplazamiento relativo definido como desplazamiento/separacion_electrodos
%Vector con valores de 0 a 1 en incrementos de centesimas
x=0:0.01:1;
sizexd=size(x); %Obtencion del tamaño del vector de desp. rel.
beta1=0;
beta2=1;
beta3=5;
beta4=10;
beta5=15;

```

```

beta6=30;
beta7=50;
beta8=100;
%Calculo de la relacion aceleracion ponderada y desplazamiento relativo
for i=1:size(xd,2)
    fpal(i)=(x(i)-((4*p0)/((1-x(i)^2)^2))*((1+0.5*alfa^2)*x(i))-
(alfa*beta*x(i))+((alfa*beta*x(i))^2)*x(i)-((alfa*beta*x(i))*(x(i)^2)))));
    f1(i)=(x(i)-((4*p0)/((1-x(i)^2)^2))*((1+0.5*alfa^2)*x(i))-
(alfa*beta1*x(i))+((alfa*beta1*x(i))^2)*x(i)-((alfa*beta1*x(i))*(x(i)^2)))));
    f2(i)=(x(i)-((4*p0)/((1-x(i)^2)^2))*((1+0.5*alfa^2)*x(i))-
(alfa*beta2*x(i))+((alfa*beta2*x(i))^2)*x(i)-((alfa*beta2*x(i))*(x(i)^2)))));
    f3(i)=(x(i)-((4*p0)/((1-x(i)^2)^2))*((1+0.5*alfa^2)*x(i))-
(alfa*beta3*x(i))+((alfa*beta3*x(i))^2)*x(i)-((alfa*beta3*x(i))*(x(i)^2)))));
    f4(i)=(x(i)-((4*p0)/((1-x(i)^2)^2))*((1+0.5*alfa^2)*x(i))-
(alfa*beta4*x(i))+((alfa*beta4*x(i))^2)*x(i)-((alfa*beta4*x(i))*(x(i)^2)))));
    f5(i)=(x(i)-((4*p0)/((1-x(i)^2)^2))*((1+0.5*alfa^2)*x(i))-
(alfa*beta5*x(i))+((alfa*beta5*x(i))^2)*x(i)-((alfa*beta5*x(i))*(x(i)^2)))));
    f6(i)=(x(i)-((4*p0)/((1-x(i)^2)^2))*((1+0.5*alfa^2)*x(i))-
(alfa*beta6*x(i))+((alfa*beta6*x(i))^2)*x(i)-((alfa*beta6*x(i))*(x(i)^2)))));
    f7(i)=(x(i)-((4*p0)/((1-x(i)^2)^2))*((1+0.5*alfa^2)*x(i))-
(alfa*beta7*x(i))+((alfa*beta7*x(i))^2)*x(i)-((alfa*beta7*x(i))*(x(i)^2)))));
    f8(i)=(x(i)-((4*p0)/((1-x(i)^2)^2))*((1+0.5*alfa^2)*x(i))-
(alfa*beta8*x(i))+((alfa*beta8*x(i))^2)*x(i)-((alfa*beta8*x(i))*(x(i)^2)))));
end

%Calculo de la capacitancia inicial
C0=(n_electrodos*LeC1C2*heC1C2*epsilon*epsilon0)/de;

%Frecuencia natural de oscilacion, razon de amortiguamiento
%frecuencia de resonancia y factor de calidad
omega0=sqrt(k/m); %Frec. natural de oscilacion
dseta=(c/(2*m*omega0)); %Razon de amortiguamiento
omegar=(omega0*sqrt(1-2*(dseta^2))); %Frecuencia de resonancia
Q=(1/(2*dseta*sqrt(1-(dseta^2)))); %Factor de calidad

%Construccion de las matrices de la ecuacion de estados
A=[0 1;
-(k/m) -(c/m)];
B=[0 a]';
C=[1 0;
0 1];
D=[0];

%Definicion del sistema a partir de su descripcion mediante las
%matrices de la ecuacion de estado
sys=ss(A,B,C,D);

%Construccion del vector de barrido de frecuencias
freq=0:1:50000;

%Tiempo de duracion para la simulacion
tiemposim=0.5;
resptiempo=step(sys,tiemposim); %Calculo de la respuesta en el tiempo

```

9.2. SIMULACIÓN MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES DE PARÁMETROS CONCENTRADOS 315

```

%Numero de muestras en el vector de respuestas en el dominio del tiempo
sizextiempo=size(resptiempo);
%Calculo del paso de simulacion para que el vector de tiempo base tenga
%el mismo numero de elementos que el vector de respuestas
pasosim=tiemposim/(sizextiempo(1)-1);
%Construccion del vector tiempo de simulacion
tiempo=0:pasosim:tiemposim;
posicion=resptiempo(:,1);
velocidad=resptiempo(:,2);
aceleracion=-(k/m)*posicion-(c/m)*velocidad+a;

%Calculo del voltaje de salida
%Ganancia en lazo abierto del OpAmp de salida
Asal=5;
Vout=Asal*((de^2*m*aceleracion)/\
(2*n_electrodos*LeC1C2*heC1C2*epsilon*epsilon0*V0));

%Calculo de la respuesta en frecuencia
respfreq=freqresp(sys,freq);
%Obtencion de la magnitud de la respuesta en frecuencia
magresp=abs(respfreq);
%Obtencion de la fase de la respuesta en frecuencia
pharesp=angle(respfreq);

%Extraccion del vector con la respuesta en frecuencia
sizex=size(respfreq);
for i=1:sizex(3)
%Magnitud de la respuesta en frec. del estado 1, desplazamiento
magx1(i)=magresp(1,:,i)*1e6;
%Fase de la respuesta en frec. del estado 1, desplazamiento
phax1(i)=pharesp(1,:,i);
%Magnitud de la respuesta en frec. del estado 2, velocidad
magx2(i)=magresp(2,:,i)*1e6;
%Fase de la respuesta en frec. del estado 1, velocidad
phax2(i)=pharesp(2,:,i);
%Magnitud de la parte real de la resp. en frec. del estado 1
magx1real(i)=respfreq(1,:,i)*1e6;
%Magnitud de la parte real de la resp. en frec. del estado 2
magx2real(i)=respfreq(2,:,i)*1e6;
end

%Graficas de respuesta en el tiempo (arriba izquierda), curva de relacion
%(estabilidad) aceleracion ponderada-desplazamiento relativo en el actuador
%electrostatico (abajo izquierda) y amplitud y fase de la respuesta en
%frecuencia (derecha)

figure;
subplot(2,2,1);
hold on; grid on; box on;
xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Amplitud de la respuesta [m]', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold')
title('\it{Respuesta en la direccion de registro}', 'FontSize', 14)
axis auto;
plot(tiempo, posicion, 'b--', 'LineWidth', 2);

```

```

subplot(2,2,3);
hold on; grid on; box on;
xlabel('x/d', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('f(x/d,beta,p0,alfa)', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
title('\it{Análisis de estabilidad}', 'FontSize',14)
axis([0 1 -1.5 1.5]);
plot(x, [f1;f2;f3;fpal;f4;f5;f6;f7;f8], 'LineWidth',2);

subplot(2,2,2);
hold on; grid on; box on;
xlabel('Frecuencia [Hz]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Amplitud de la respuesta [um]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
title('\it{Respuesta en la direccion de registro}', 'FontSize',14)
axis auto;
plot(freq,magx1, 'r--', 'LineWidth',2);
plot(freq,-real(magx1real), 'b--', 'LineWidth',2);

subplot(2,2,4);
hold on; grid on; box on;
xlabel('Frecuencia [Hz]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Fase [grados]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
title('\it{Respuesta en la direccion de registro}', 'FontSize',14)
axis auto;
plot(freq,unwrap(phax1)*180/pi, 'r--', 'LineWidth',2);

%Graficas de la aceleracion (arriba izquierda), velocidad
%(abajo izquierda) Voltaje de salida (arriba derecha) y
%desplazamiento (abajo derecha)

figure;
subplot(2,2,1);
hold on; grid on; box on;
xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Aceleracion [m/s^2]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
title('\it{Aceleracion}', 'FontSize',14)
axis auto;
plot(tiempo,aceleracion, 'b--', 'LineWidth',2);

subplot(2,2,2);
hold on; grid on; box on;
xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Voltaje de salida [V]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
title('\it{Voltaje}', 'FontSize',14)
axis auto;
plot(tiempo,Vout, 'b--', 'LineWidth',2);

subplot(2,2,3);
hold on; grid on; box on;
xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Velocidad [m/s]', 'FontSize',11, 'FontWeight', 'bold')
title('\it{Velocidad}', 'FontSize',14)
axis auto;
plot(tiempo,velocidad, 'b--', 'LineWidth',2);

```

```

subplot(2,2,4);
hold on; grid on; box on;
xlabel('Tiempo [s]', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Desplazamiento [m]', 'FontSize', 11, 'FontWeight', 'bold')
title('\it{Desplazamiento}', 'FontSize', 14)
axis auto;
plot(tiempo, posicion, 'b--', 'LineWidth', 2);

```

Modificando en el script los valores dimensionales de la placa móvil, los electrodos, la suspensión y los parámetros de presión, voltaje de alimentación y aceleración de entrada se pueden simular cualquiera de los ocho acelerómetros propuestos en la sección anterior. Todos los valores usados en el script están en sistema MKS y las constantes físicas y características de materiales corresponden a valores promedio aceptados regularmente. El cambio mayor corresponde al cálculo de la constante de elasticidad de la suspensión en las direcciones x y z , por ello, a continuación se muestra el código que debe insertarse en lugar de las líneas empleadas para calcular la elasticidad de la suspensión tipo caja con bordes angulares a 90 grados que se utilizó en el script anterior.

```

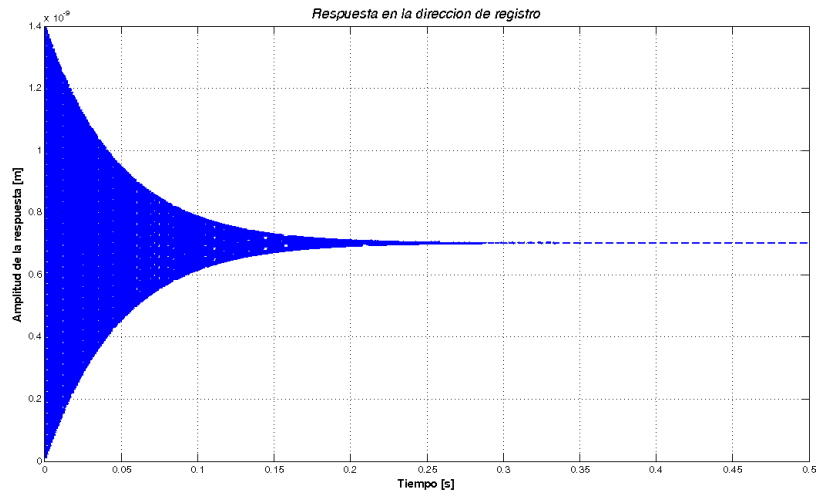
%Calculo de la constante de elasticidad mecanica en
%las direcciones x y z para suspension tipo sagital
%Largo de la viga principal de la suspension sujeta a la masa
L1s=0.0002;
%Angulo de inclinacion en grados de la viga que forma la suspension
phi=toRadians(45);
%Ancho de la viga que forma la suspension
bs=0.0000035;
%Grosor de la viga que forma la suspension
hs=0.0000035;
%Longitud del refuerzo lateral de la suspension
LR=20e-6;
%Longitud del ancla de la suspension
LA=50e-6;
%Momento de inercia para las flexiones en la direccion z
Iy=(bs*hs^3)/12;
%Momento de inercia torsional de la viga que forma la suspension
It=(bs*hs^3*((16/3)-(3.36*hs/bs)))/16;
%Variables intermedias auxiliares
u=((G*It*(LA*cos(phi)+L1s*cos(2*phi))*cos(phi))+((E*Iy-G*It)*\
LR*sin(phi)*cos(phi))+E*Iy*(LA+2*L1s*cos(phi))*(sin(phi))^2)/\
(2*(G*It*(cos(phi))^2+E*Iy*(sin(phi))^2));
d1=6*E*Iy*(((LA-2*u)^2)*(sin(phi))^2+2*(LR+2*L1s*sin(phi))*\
(LR*cos(phi)+(2*L1s*cos(phi)+LA-2*u)*sin(phi))*cos(phi));
d2=G*It*(6*LR^2+14*L1s^2+3*(LA-2*u)^2+3*((LA-2*u)^2-2*(LR^2+2*L1s^2))*\
cos(2*phi)-6*(2*u-LA)*(L1s-2*LR*sin(phi))*cos(phi));
d3=6*G*It*L1s((LA-2*u)*cos(3*phi)+L1s*cos(4*phi)+4*LR*sin(phi)-\
2*LR*sin(3*phi));
%Constante elastica de la suspension en la direccion x
kmecx=(2*E*hs*bs^3)/(L1s^3*(cos(phi))^2);
%Constante elastica de la suspension en la direccion z
kme cz=(24/L1s)*((E*G*Iy*It)/(d1+d2+d3));

```

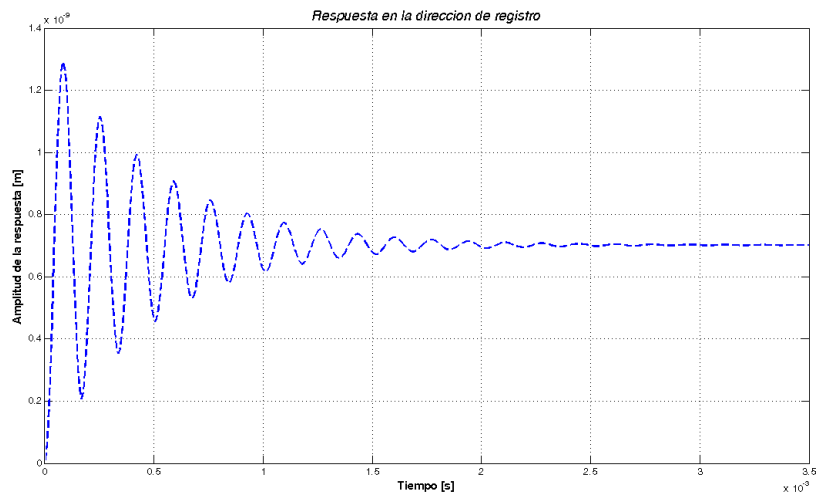
En las siguientes subsecciones se consignarán las gráficas con los resultados de las simulaciones para cada uno de los ocho acelerómetros propuestos.

9.2.1. Acelerómetro de $600 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja

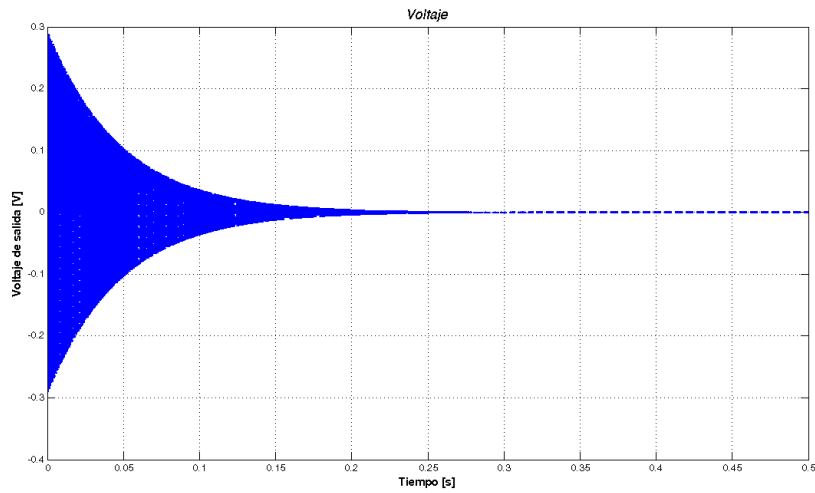
A continuación se consignan las gráficas del comportamiento simulado para el primer acelerómetro propuesto en la sección anterior.



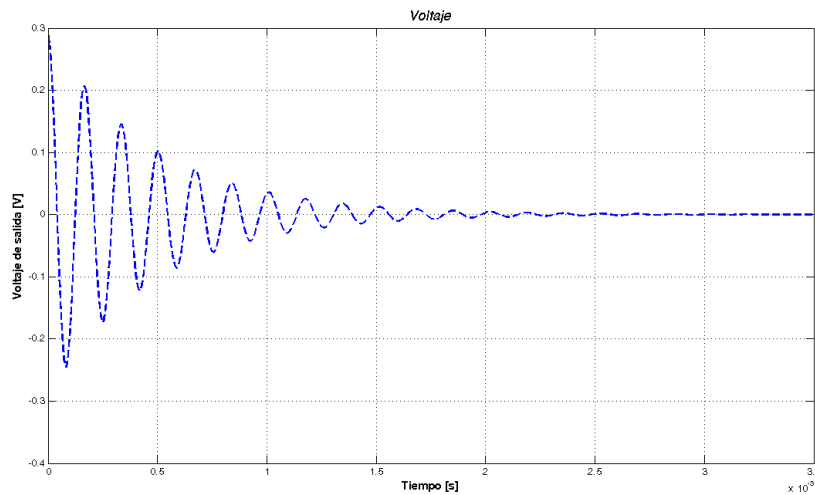
Resposta en el tiempo del acelerómetro de $600 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja de bordes angulares; la señal se estabiliza 0,35 [s] después de registrada la aceleración de entrada. Para esta simulación, la presión se colocó en 100 [Pa].



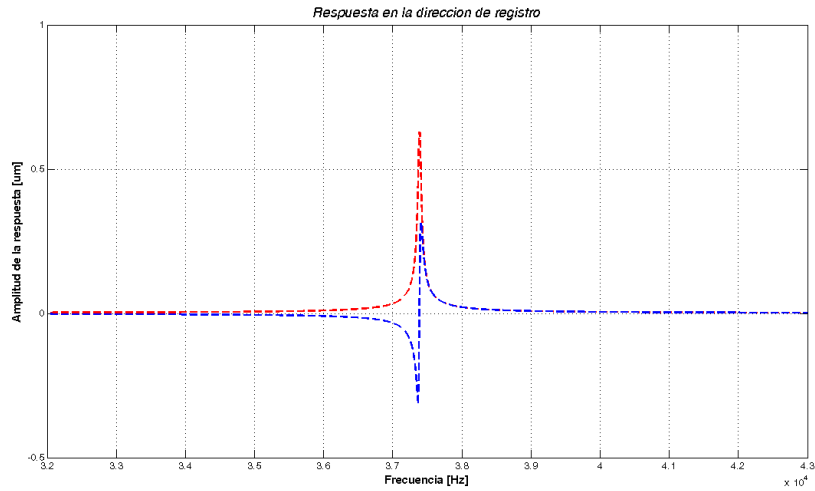
Simulación del comportamiento del primer acelerómetro propuesto, con una presión de encapsulado igual a 10 [kPa] (vacío bajo). Como es de esperarse, al aumentar la constante general de amortiguamiento (mecanismo de disipación de energía), el dispositivo oscila por un tiempo menor, en este caso, el sistema deja de oscilar alrededor de 3,5 [ms] después de registrada la aceleración de entrada.



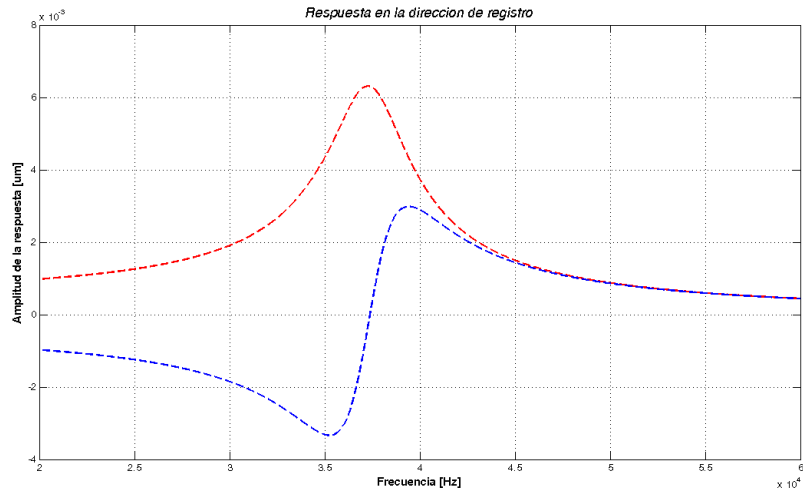
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático colocado en el primer acelerómetro, al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 100 [Pa] y aprovechar un factor de amplificación eléctrica de 100.



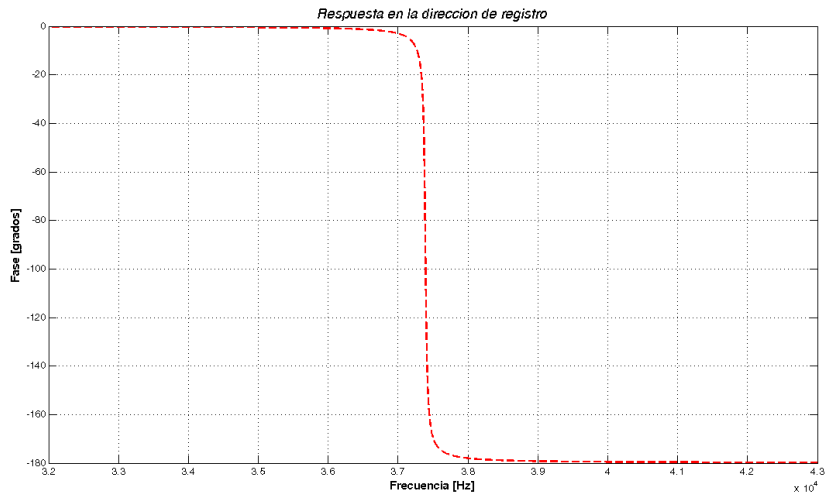
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 10 [kPa] y mantener un factor de amplificación eléctrica de 100.



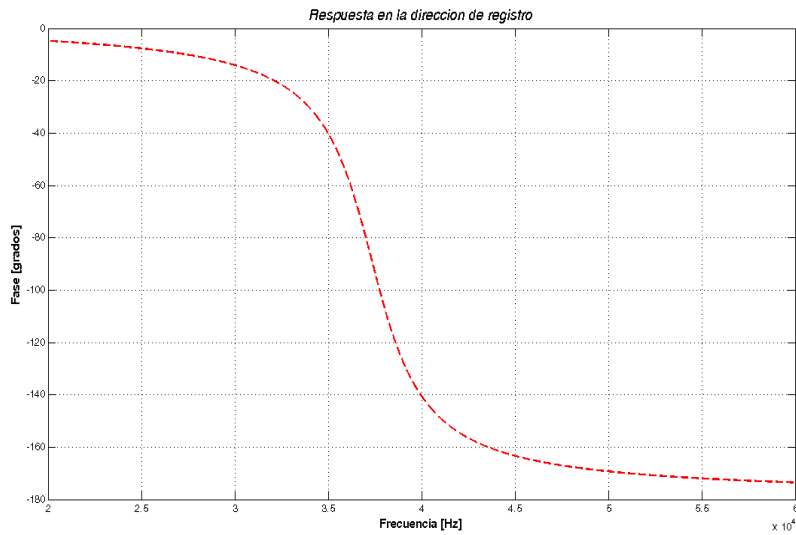
Resposta en frecuencia del acelerómetro de 600×1200 [μm^2]. La frecuencia de resonancia se encuentra alrededor de 37 [kHz]. Para esta simulación, la presión del encapsulado del dispositivo se colocó en 100 [Pa].



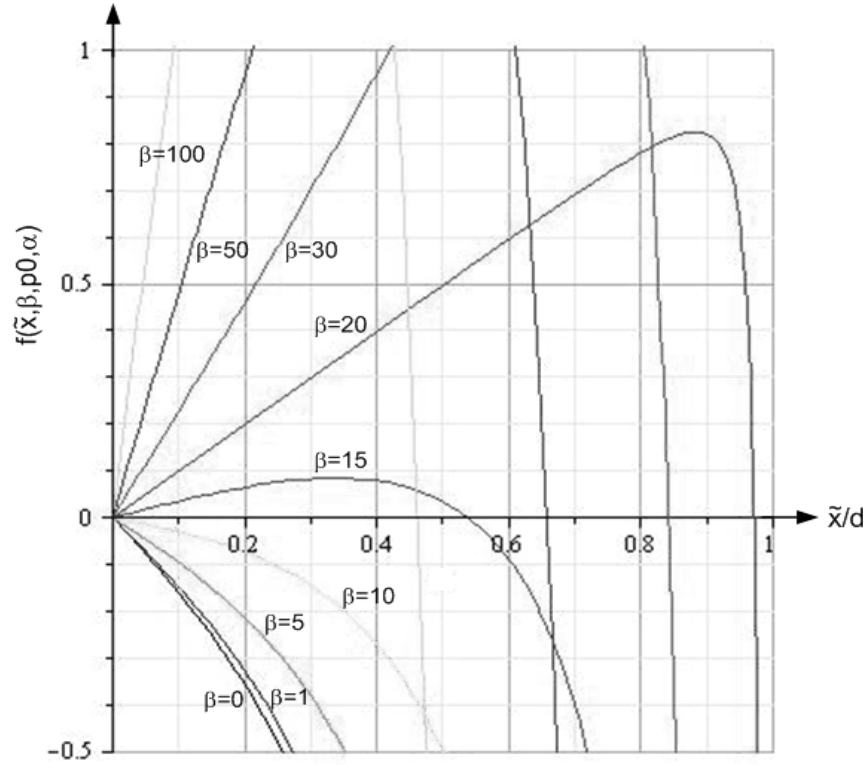
Al aumentar a 10 [kPa] la presión en el encapsulado del primer acelerómetro propuesto, la amplitud de la respuesta alrededor de la frecuencia de resonancia disminuye hasta en dos órdenes de magnitud.



Comportamiento de la fase para el primer acelerómetro propuesto sometido a una presión de encapsulado de 100 [Pa].



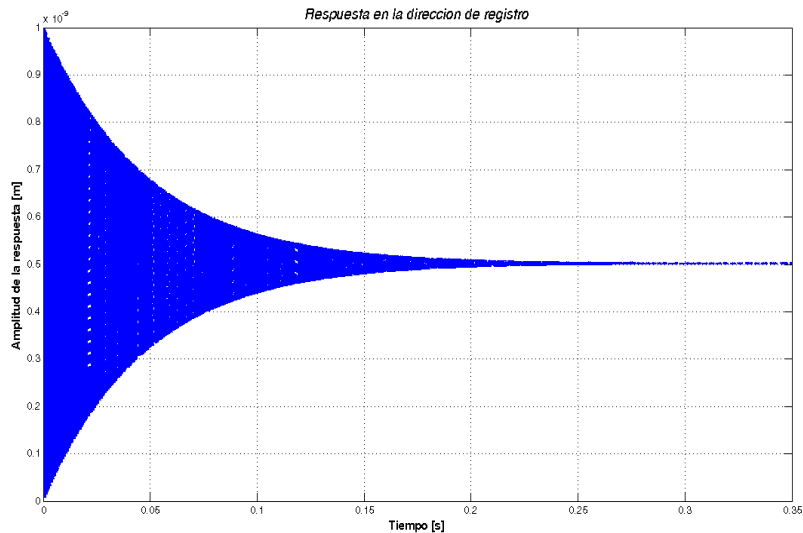
Comportamiento de la fase para el primer acelerómetro propuesto con una presión en el encapsulado igual a 10 [kPa].



Solución gráfica para la relación entre aceleración ponderada y desplazamiento relativo para el sensor-actuador diferencial con realimentación electromecánica del primer acelerómetro propuesto, $p_0 = 0,641$, $\alpha = 0,05$ y $V_r \leq V_0$.

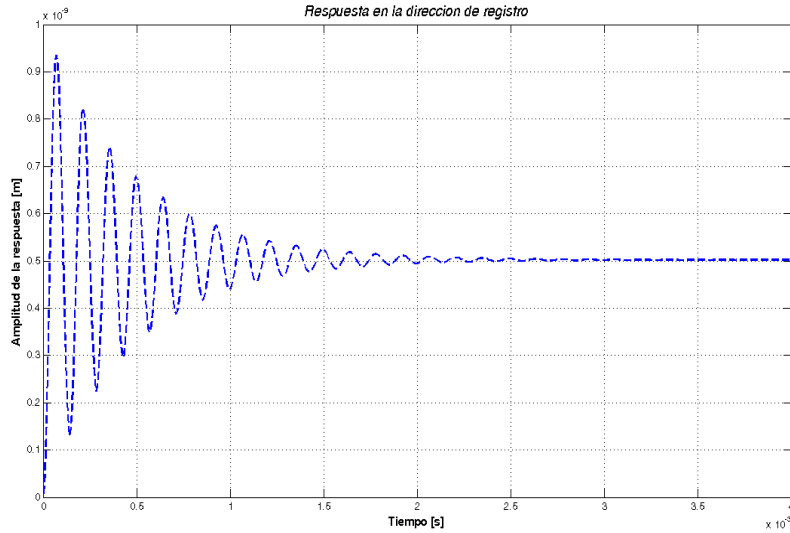
9.2.2. Acelerómetro de $600 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital

A continuación se consignan las gráficas del comportamiento simulado para el segundo acelerómetro propuesto en la sección anterior.

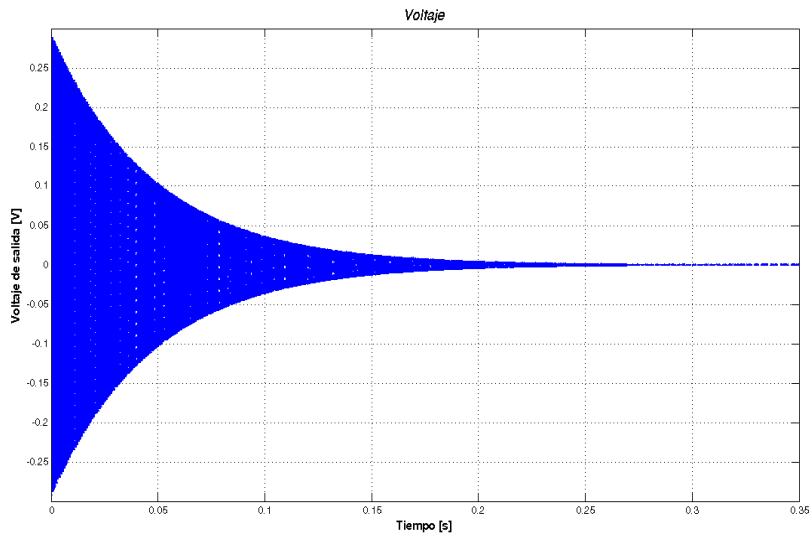


9.2. SIMULACIÓN MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES DE PARÁMETROS CONCENTRADOS 323

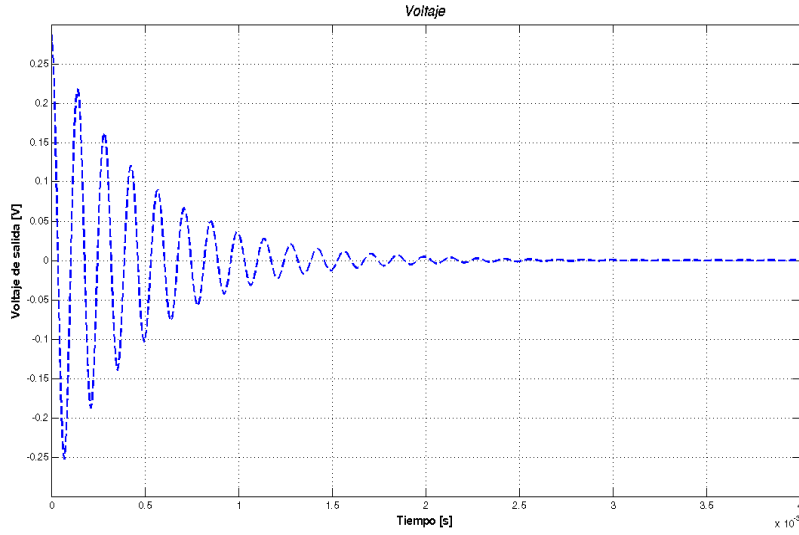
Respuesta en el tiempo del acelerómetro de $600 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital a 45 grados; la señal se estabiliza 0,35 [s] después de registrada la aceleración de entrada. Para esta simulación, la presión se colocó en 100 [Pa].



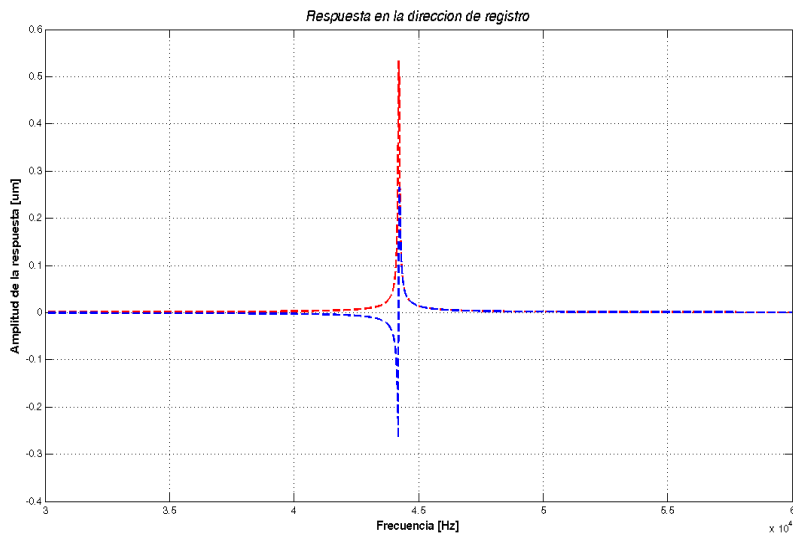
Simulación del comportamiento del segundo acelerómetro propuesto, con una presión de encapsulado igual a 10 [kPa] (vacío bajo). Al aumentar la constante general de amortiguamiento (mecanismo de disipación de energía), el dispositivo oscila por un tiempo menor, en este caso, el sistema deja de oscilar alrededor de 3,5 [ms] después de registrada la aceleración de entrada.



Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático incorporado al acelerómetro, al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 100 [Pa] y aprovechar un factor de amplificación eléctrica de 100.

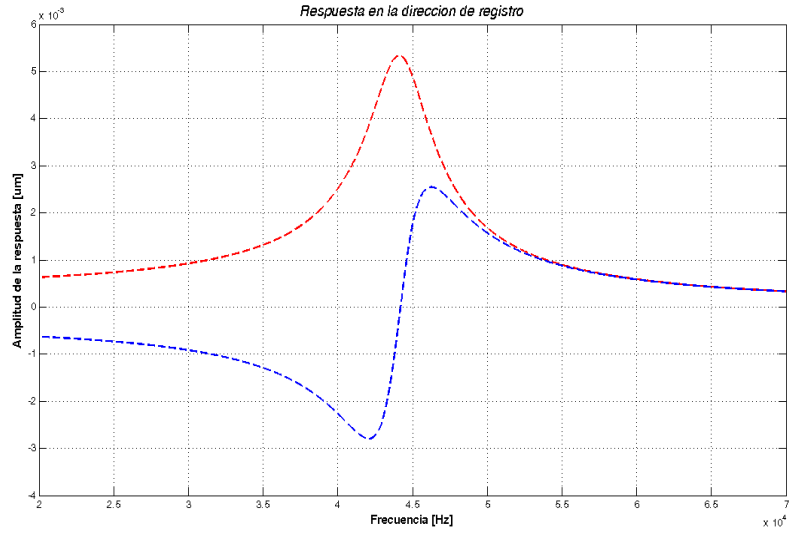


Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 10 [kPa] y mantener un factor de amplificación eléctrica de 100.

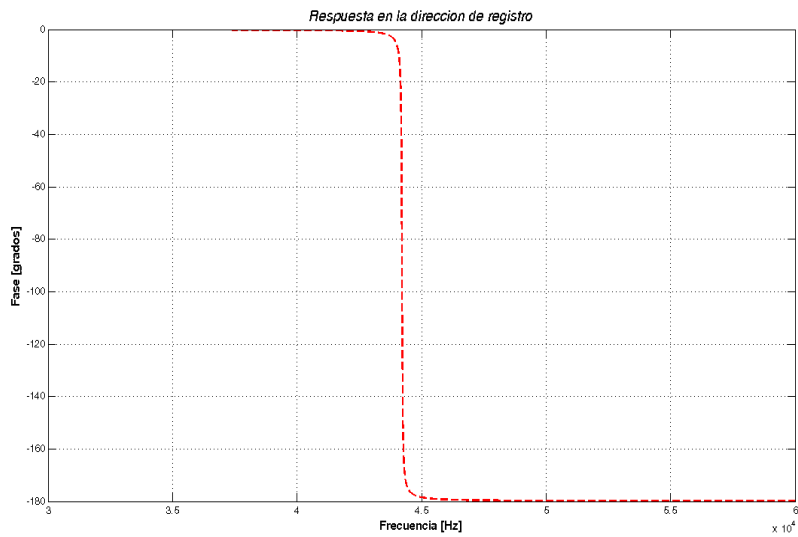


Respuesta en frecuencia del acelerómetro de $600 \times 1200 [\mu\text{m}^2]$ con suspensión tipo sagital. La frecuencia de resonancia se encuentra alrededor de 44 [kHz]. Para esta simulación, la presión del encapsulado del dispositivo se colocó en 100 [Pa].

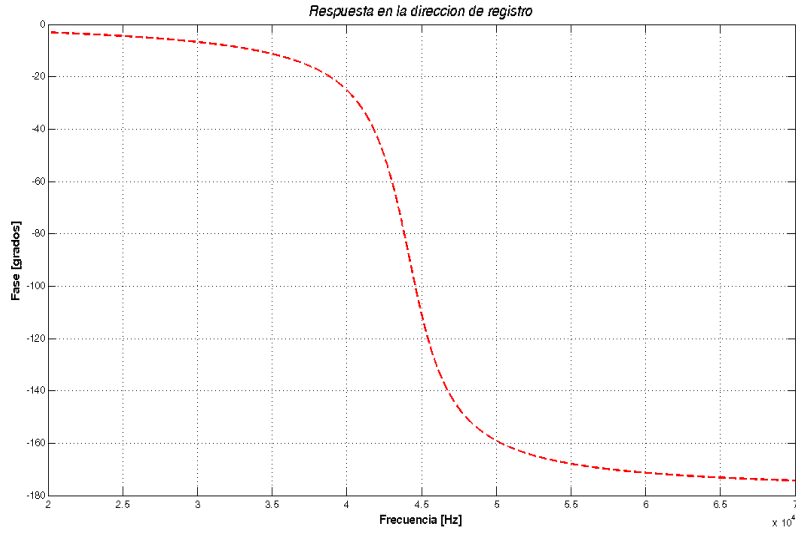
9.2. SIMULACIÓN MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES DE PARÁMETROS CONCENTRADOS 325



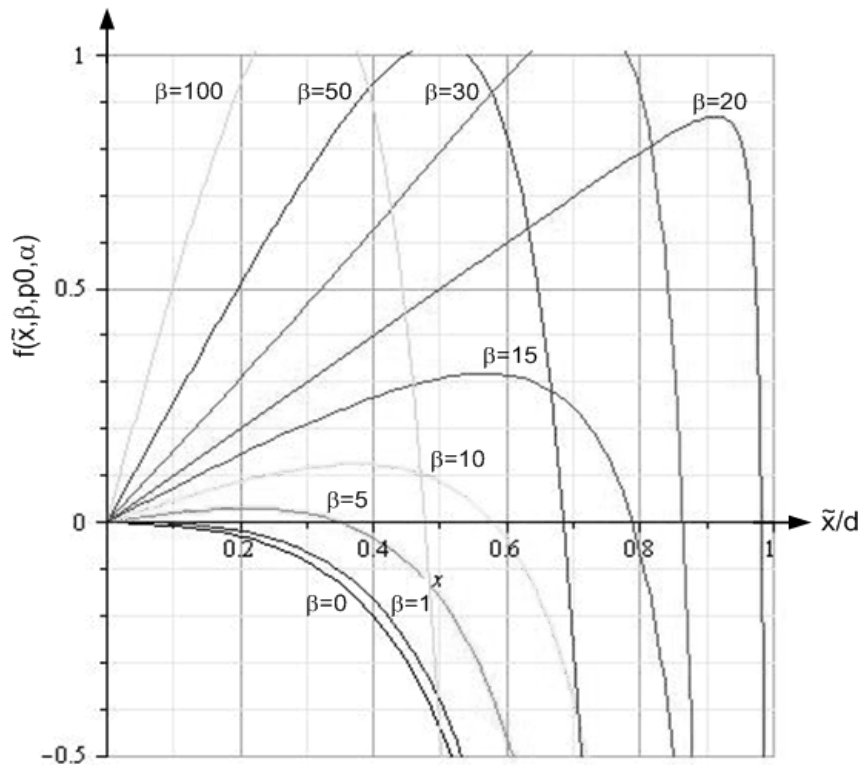
Al aumentar a 10 [kPa] la presión en el encapsulado del segundo acelerómetro propuesto, la amplitud de la respuesta alrededor de la frecuencia de resonancia disminuye hasta en dos órdenes de magnitud.



Comportamiento de la fase para el segundo acelerómetro propuesto sometido a una presión de encapsulado de 100 [Pa].



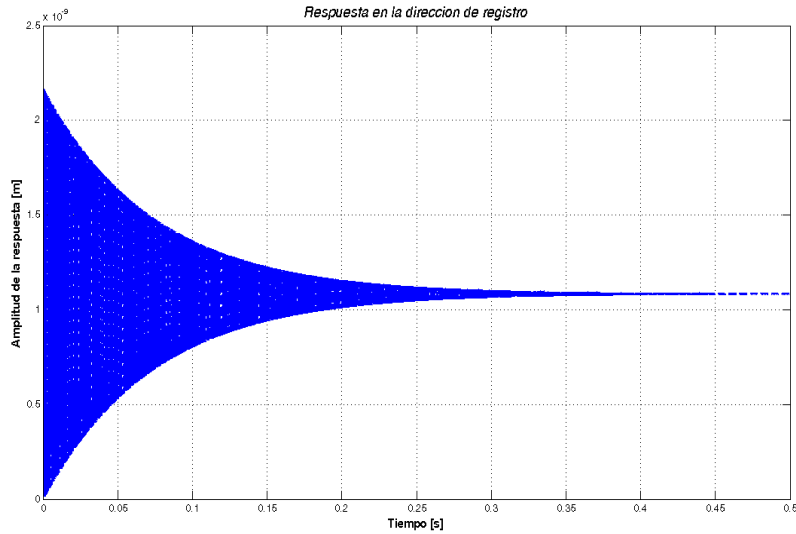
Comportamiento de la fase para el segundo acelerómetro propuesto con una presión en el encapsulado igual a 10 [kPa].



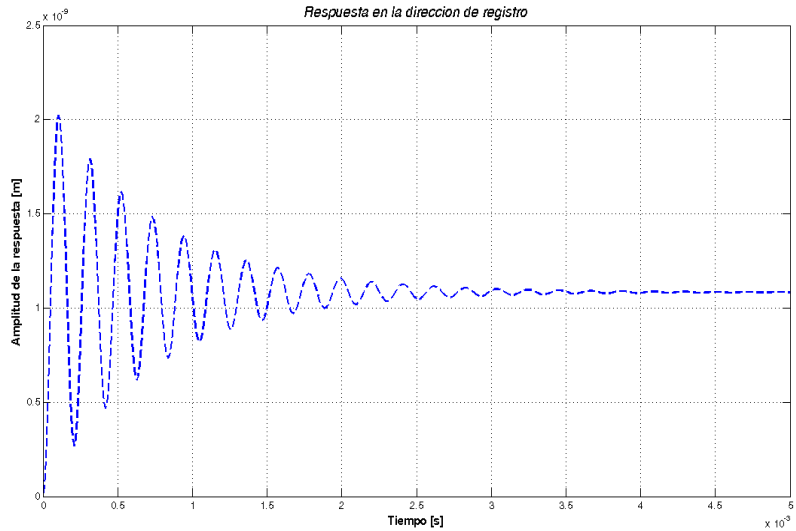
Solución gráfica para la relación entre aceleración ponderada y desplazamiento relativo para el sensor-actuador diferencial con realimentación electromecánica del segundo acelerómetro propuesto, $p_0 = 0,265$, $\alpha = 0,05$ y $V_r \leq V_0$.

9.2.3. Acelerómetro de $960 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja

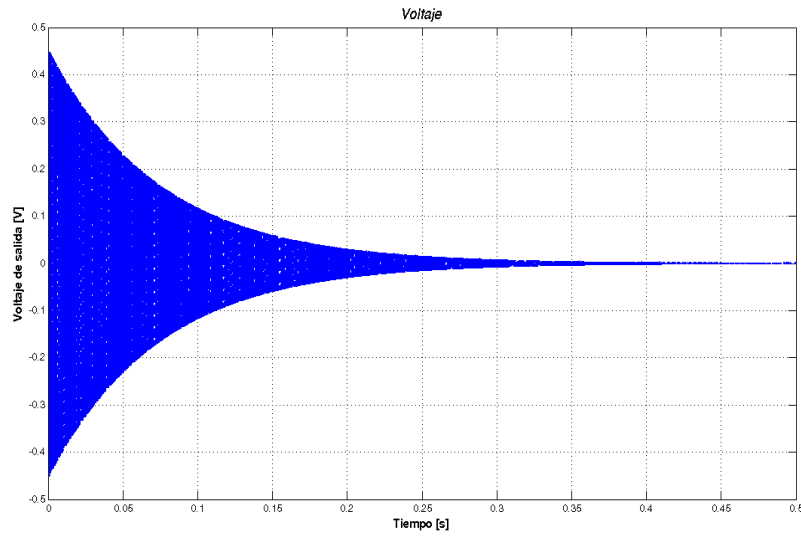
A continuación se consignan las gráficas del comportamiento simulado del tercer acelerómetro propuesto en la sección anterior.



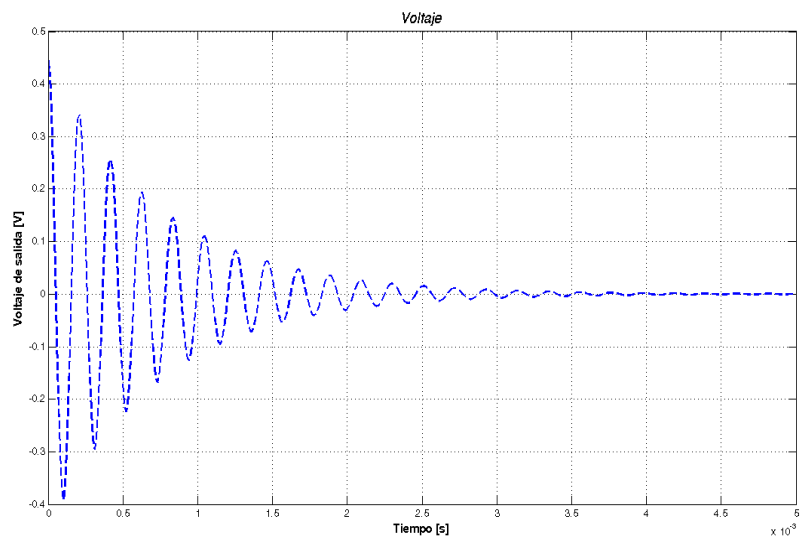
Respuesta en el tiempo del acelerómetro de $960 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja; la señal se estabiliza 0,5 [s] después de registrada la aceleración de entrada. Para esta simulación, la presión se colocó en 100 [Pa].



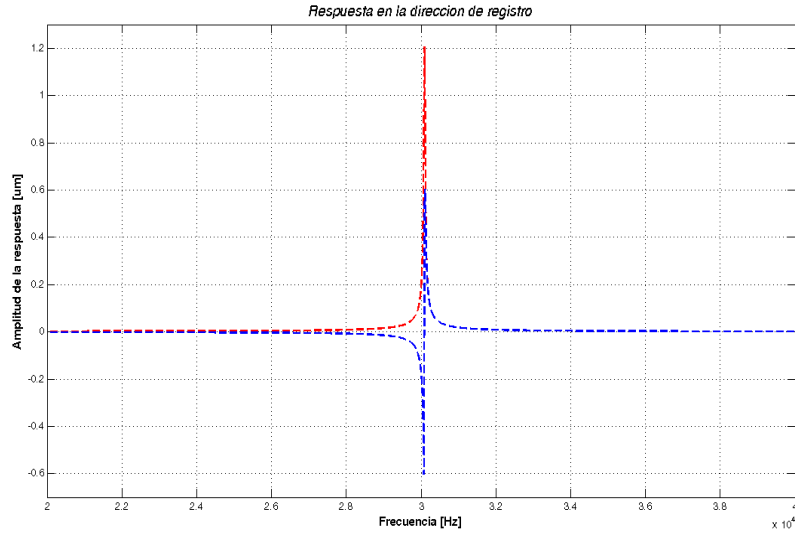
Simulación del comportamiento del tercer acelerómetro propuesto, con una presión de encapsulado igual a 10 [kPa] (vacío bajo). Al aumentar la constante general de amortiguamiento (mecanismo de disipación de energía), el dispositivo oscila por un tiempo menor, en este caso, el sistema deja de oscilar alrededor de 5 [ms] después de registrada la aceleración de entrada.



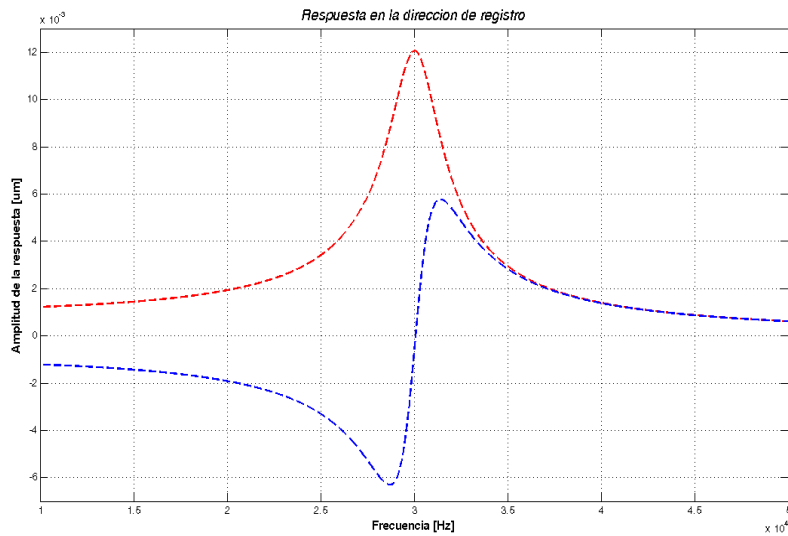
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático del tercer acelerómetro. La aceleración de entrada fue de una décima de gravedad, el encapsulado se encontraba a una presión de 100 [Pa] y el factor de amplificación eléctrica fue de 100.



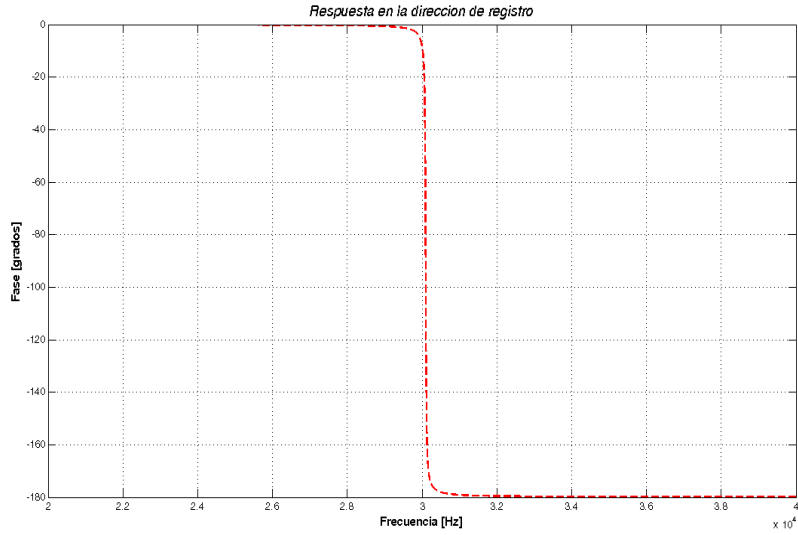
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 10 [kPa] y mantener un factor de amplificación eléctrica de 100.



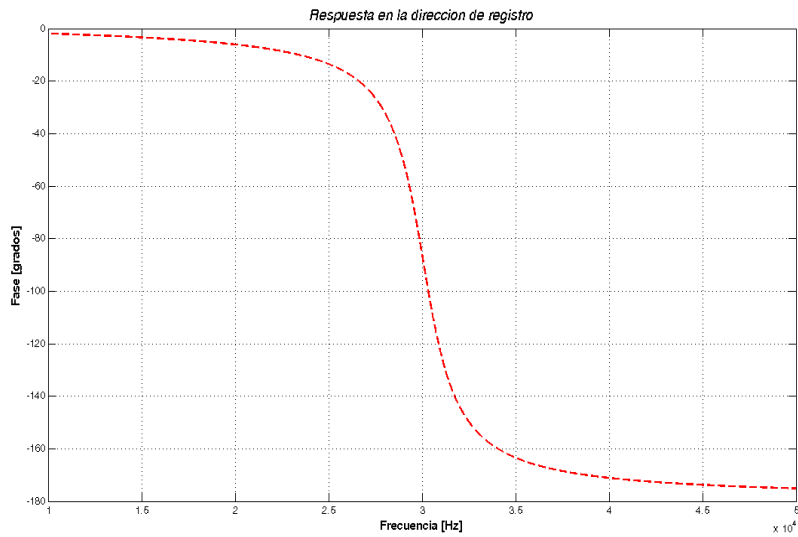
Resposta en frecuencia del acelerómetro de $960 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja. La frecuencia de resonancia se encuentra alrededor de 30 [kHz]. Para esta simulación, la presión del encapsulado del dispositivo se colocó en 100 [Pa].



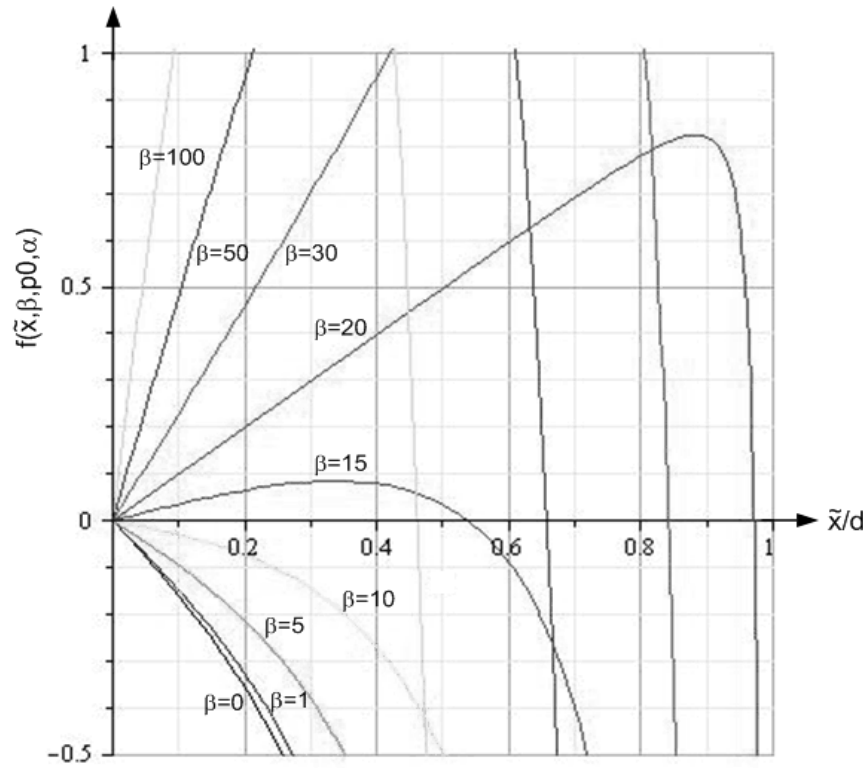
Al aumentar a 10 [kPa] la presión en el encapsulado del tercer acelerómetro propuesto, la amplitud de la respuesta alrededor de la frecuencia de resonancia disminuye hasta en dos órdenes de magnitud.



Comportamiento de la fase para el tercer acelerómetro propuesto sometido a una presión de encapsulado de 100 [Pa].



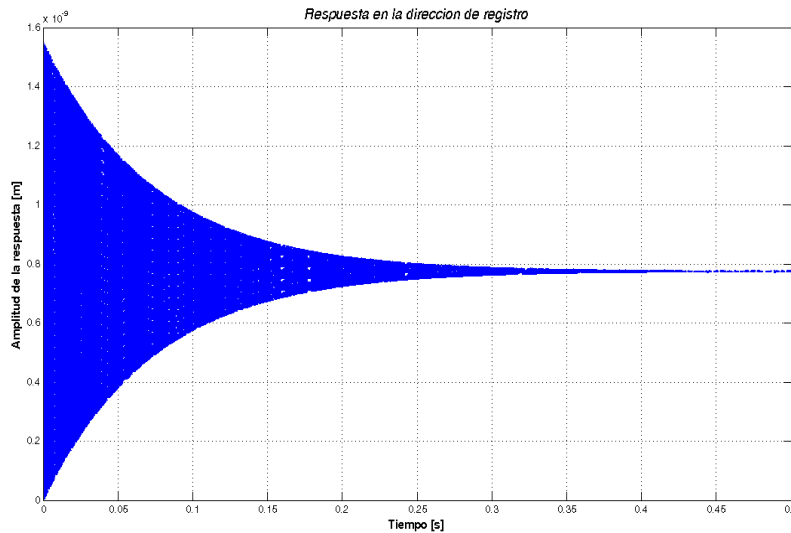
Comportamiento de la fase para el tercer acelerómetro propuesto con una presión en el encapsulado igual a 10 [kPa].



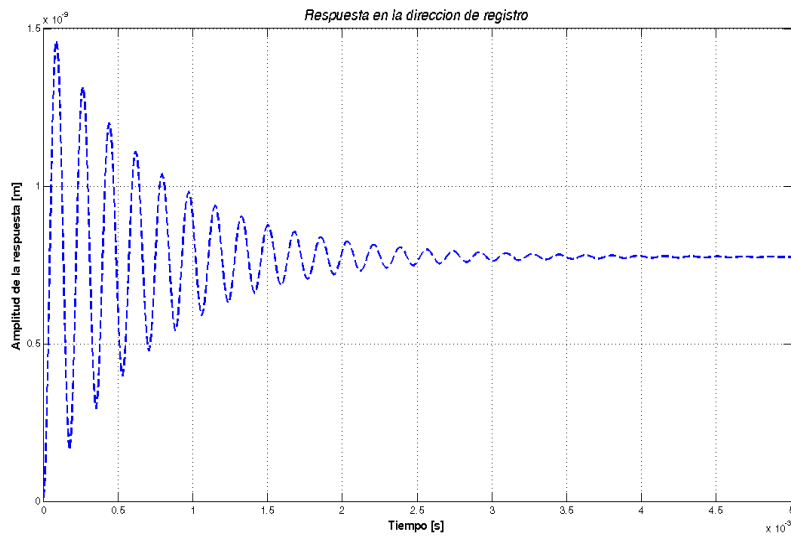
Solución gráfica para la relación entre aceleración ponderada y desplazamiento relativo para el sensor-actuador diferencial con realimentación electromecánica del tercer acelerómetro propuesto, $p_0 = 0,641$, $\alpha = 0,05$ y $V_r \leq V_0$.

9.2.4. Acelerómetro de $960 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital

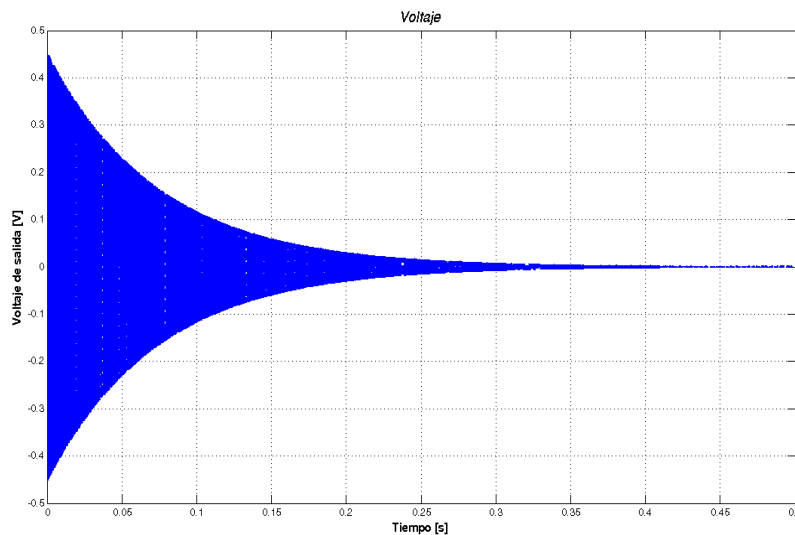
A continuación se consignan las gráficas del comportamiento simulado para el cuarto acelerómetro propuesto en la sección anterior.



Respuesta en el tiempo del acelerómetro de $960 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital; la señal se estabiliza 0,5 [s] después de registrada la aceleración de entrada. Para esta simulación, la presión se colocó en 100 [Pa].

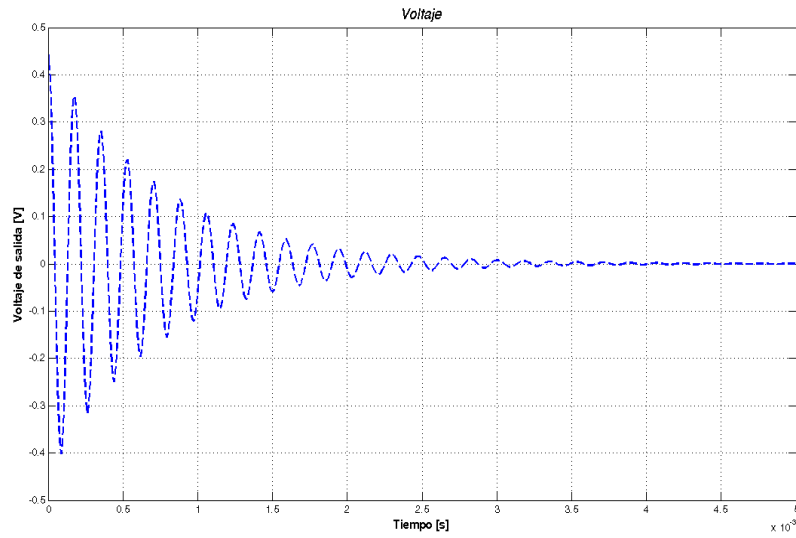


Simulación del comportamiento del cuarto acelerómetro propuesto, con una presión de encapsulado igual a 10 [kPa] (vacío bajo). Al aumentar la constante general de amortiguamiento (mecanismo de disipación de energía), el dispositivo oscila por un tiempo menor, en este caso, el sistema deja de oscilar alrededor de 5 [ms] después de registrada la aceleración de entrada.

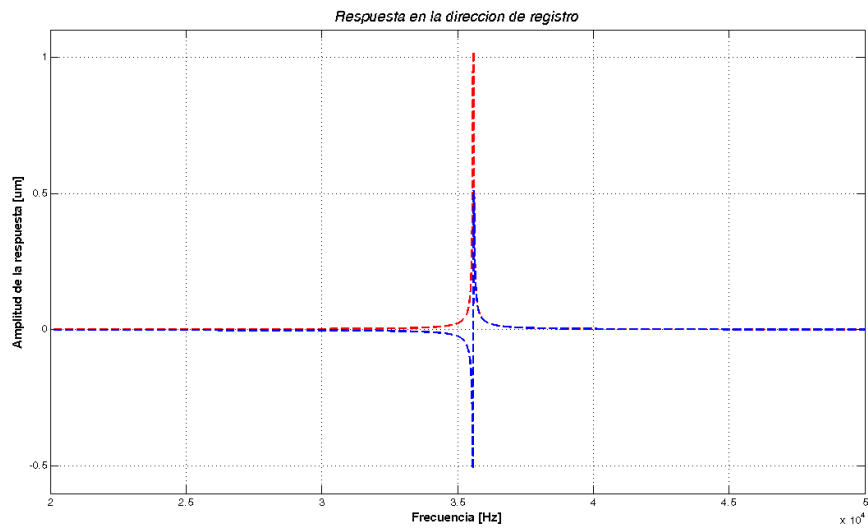


Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático incorporado al acelerómetro, al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 100 [Pa] y aprovechar un factor de amplificación eléctrica de 100.

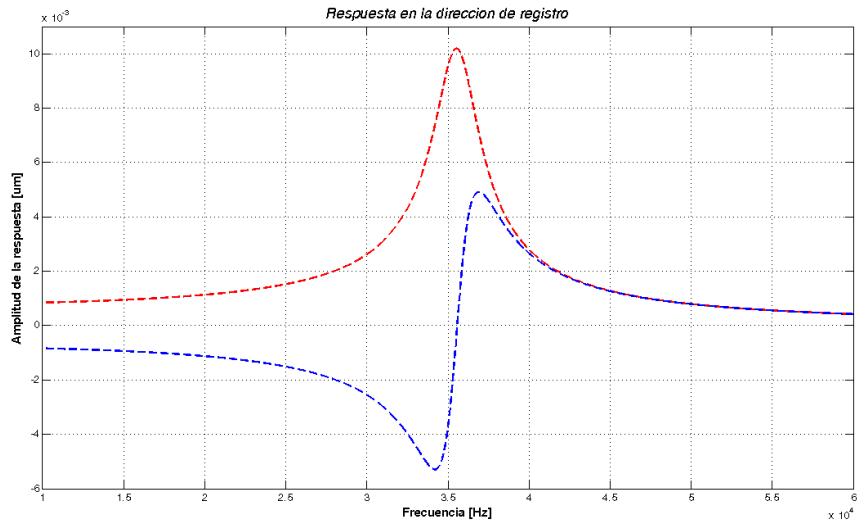
9.2. SIMULACIÓN MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES DE PARÁMETROS CONCENTRADOS 333



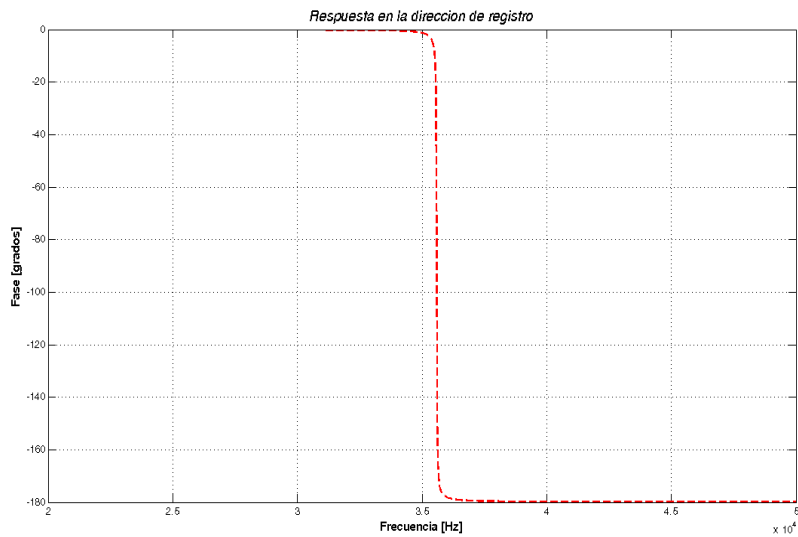
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 10 [kPa] y mantener un factor de amplificación eléctrica de 100.



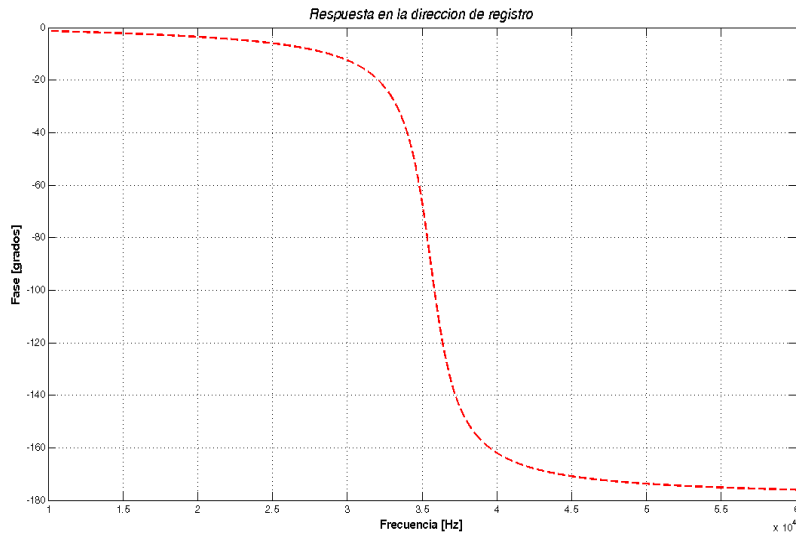
Respuesta en frecuencia del acelerómetro de $960 \times 1200 [\mu\text{m}^2]$ con suspensión tipo sagital. La frecuencia de resonancia se encuentra alrededor de 35 [kHz]. Para esta simulación, la presión del encapsulado del dispositivo se colocó en 100 [Pa].



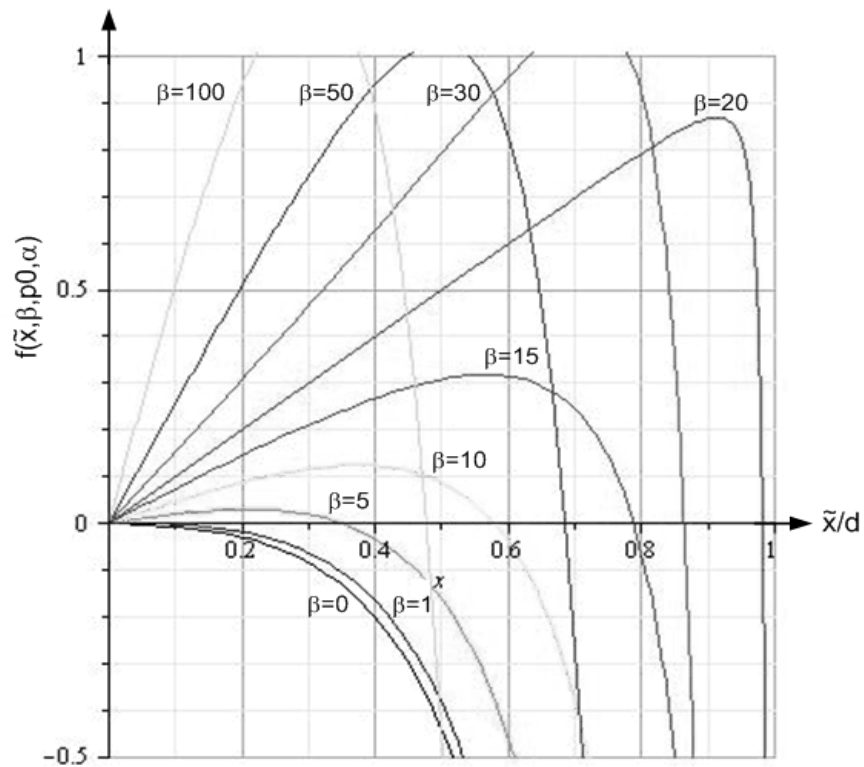
Al aumentar a 10 [kPa] la presión en el encapsulado del cuarto acelerómetro propuesto, la amplitud de la respuesta alrededor de la frecuencia de resonancia disminuye hasta en dos órdenes de magnitud.



Comportamiento de la fase para el cuarto acelerómetro propuesto sometido a una presión de encapsulado de 100 [Pa].



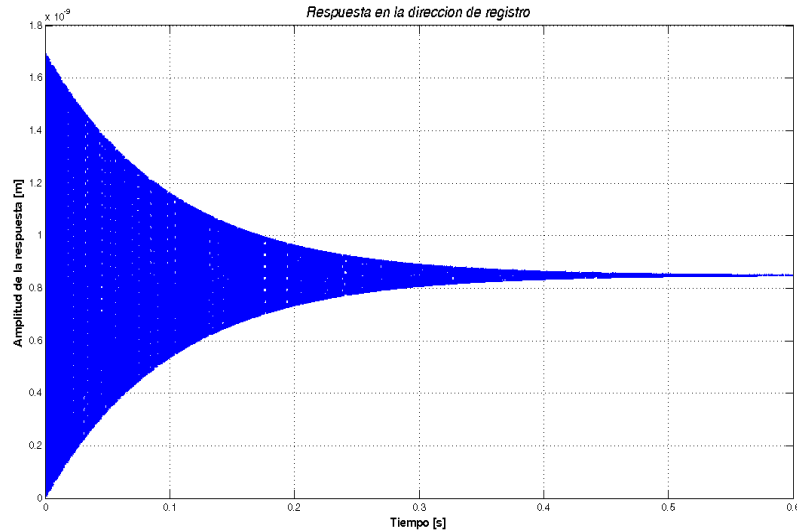
Comportamiento de la fase para el cuarto acelerómetro propuesto con una presión en el encapsulado igual a 10 [kPa].



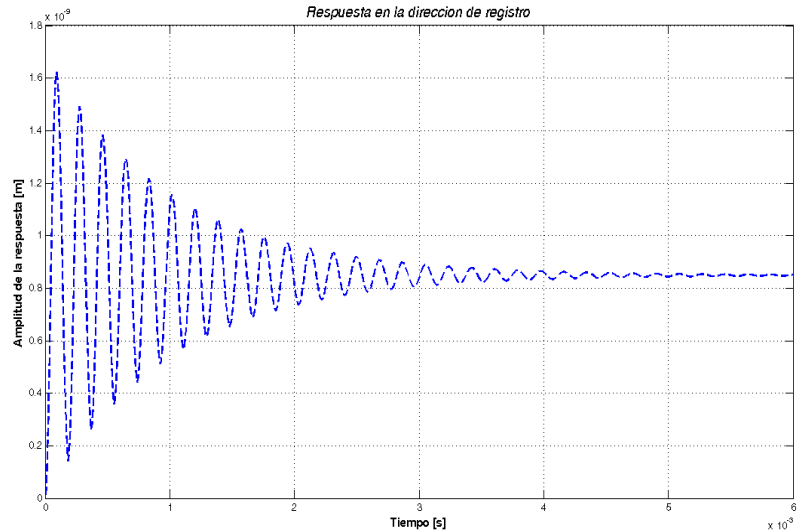
Solución gráfica para la relación entre aceleración ponderada y desplazamiento relativo para el sensor-actuador diferencial con realimentación electromecánica del cuarto acelerómetro propuesto, $p_0 = 0,265$, $\alpha = 0,05$ y $V_r \leq V_0$.

9.2.5. Acelerómetro de $1200 \times 360 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja

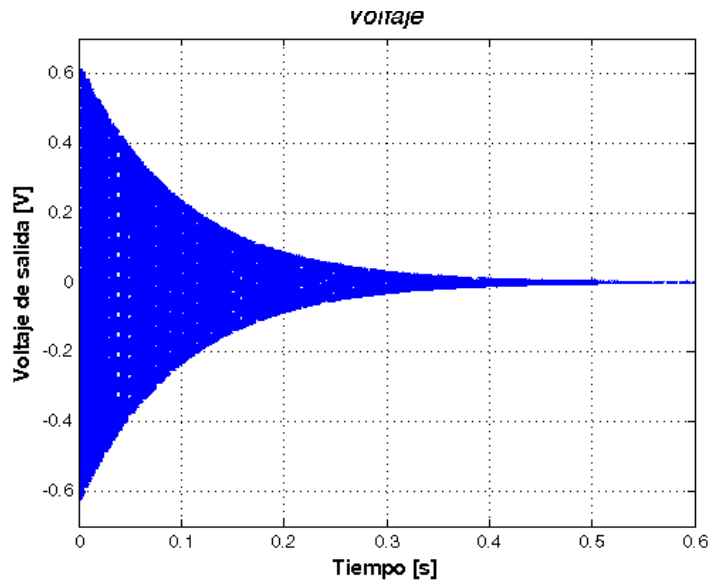
A continuación se consignan las gráficas del comportamiento simulado para el quinto acelerómetro propuesto en la sección anterior.



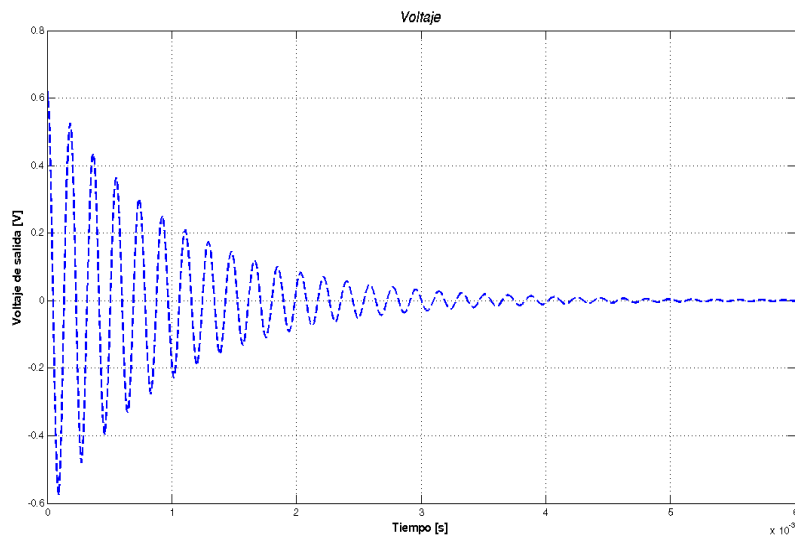
Respuesta en el tiempo del acelerómetro de $1200 \times 360 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja; la señal se estabiliza $0,6 \text{ } [\text{s}]$ después de registrada la aceleración de entrada. Para esta simulación, la presión se colocó en $100 \text{ } [\text{Pa}]$.



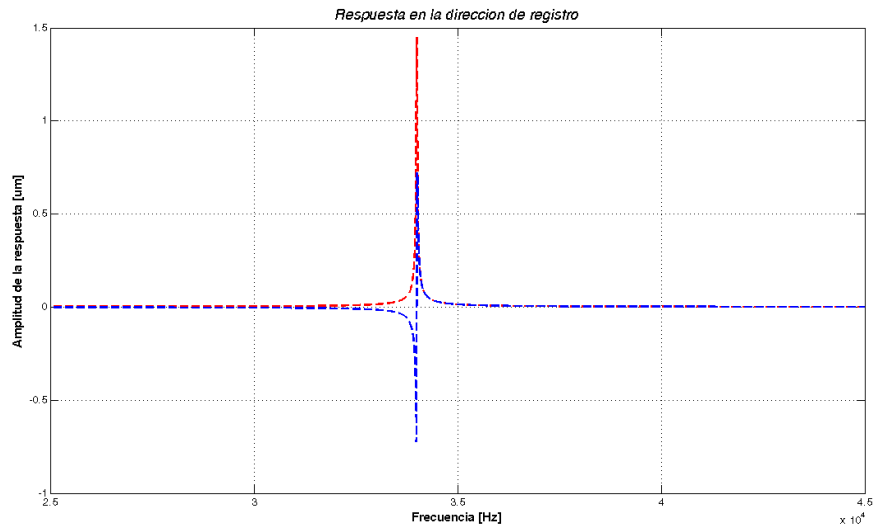
Simulación del comportamiento del quinto acelerómetro propuesto, con una presión de encapsulado igual a $10 \text{ } [\text{kPa}]$ (vacío bajo). Al aumentar la constante general de amortiguamiento (principal mecanismo de disipación de energía), el dispositivo oscila por un tiempo menor, en este caso, el sistema deja de oscilar alrededor de $6 \text{ } [\text{ms}]$ después de registrada la aceleración de entrada.



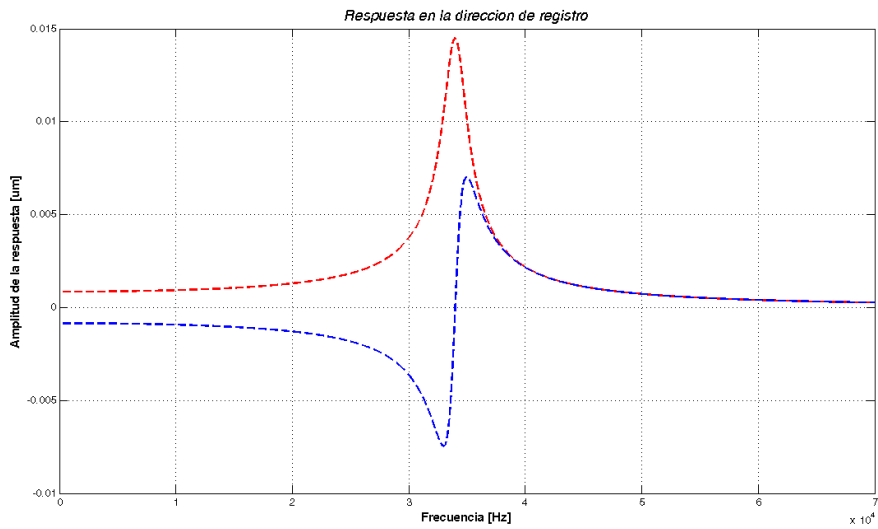
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático del quinto acelerómetro. La aceleración de entrada fue de una décima de gravedad, el encapsulado se encontraba a una presión de 100 [Pa] y el factor de amplificación eléctrica fue de 100.



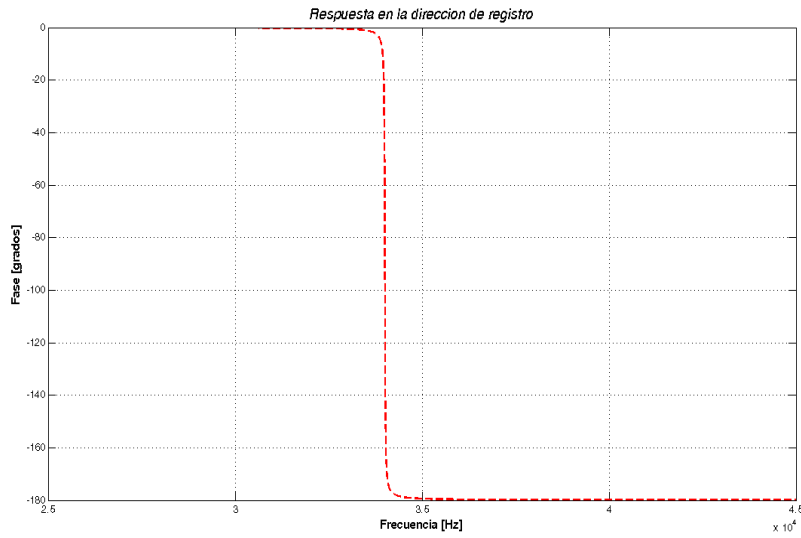
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 10 [kPa] y mantener un factor de amplificación eléctrica de 100.



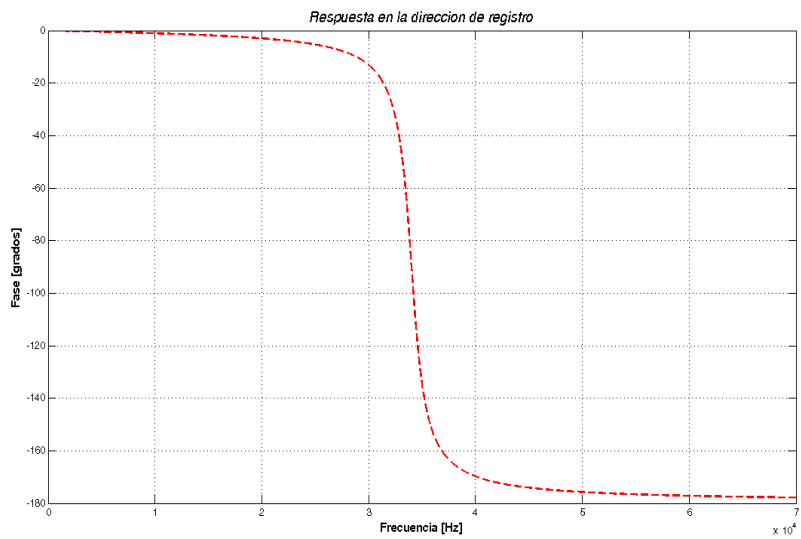
Respuesta en frecuencia del acelerómetro de $1200 \times 360 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja. La frecuencia de resonancia se encuentra alrededor de 35 [kHz]. Para esta simulación, la presión del encapsulado del dispositivo se colocó en 100 [Pa].



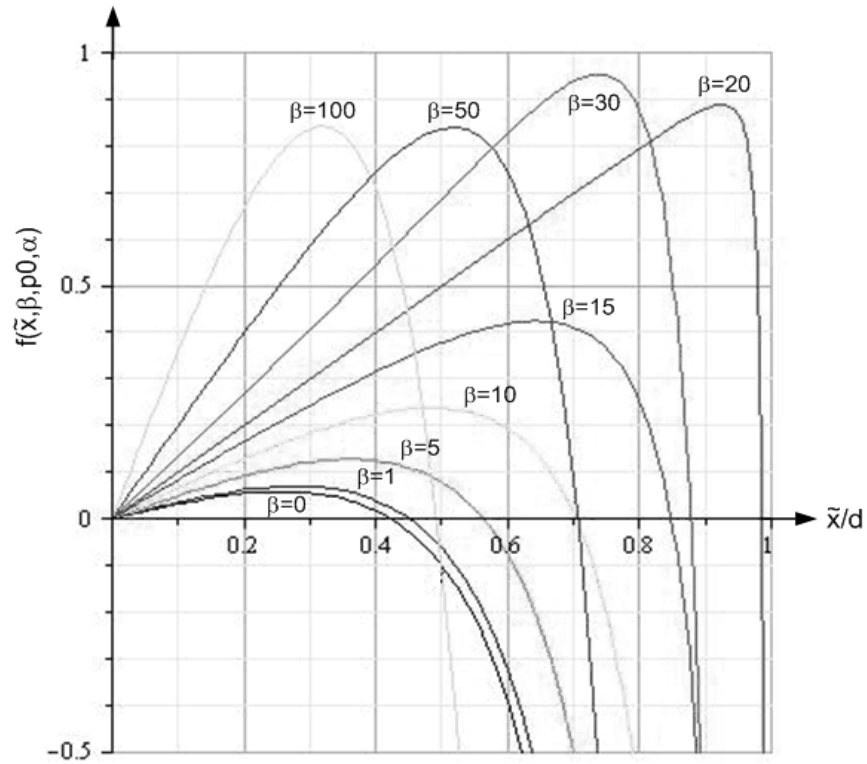
Al aumentar a 10 [kPa] la presión en el encapsulado del quinto acelerómetro propuesto, la amplitud de la respuesta alrededor de la frecuencia de resonancia disminuye hasta en dos órdenes de magnitud.



Comportamiento de la fase para el quinto acelerómetro propuesto sometido a una presión de encapsulado de 100 [Pa].



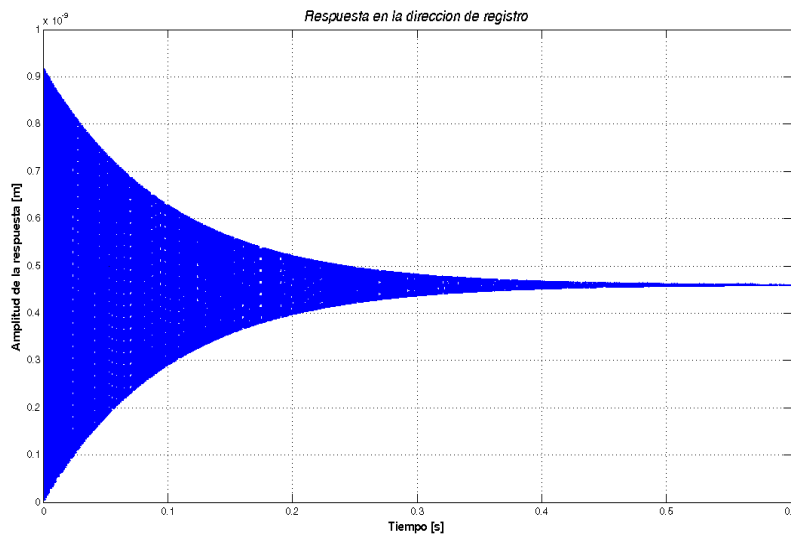
Comportamiento de la fase para el quinto acelerómetro propuesto con una presión en el encapsulado igual a 10 [kPa].



Solución gráfica para la relación entre aceleración ponderada y desplazamiento relativo para el sensor-actuador diferencial con realimentación electromecánica del quinto acelerómetro propuesto, $p_0 = 0,1687$, $\alpha = 0,05$ y $V_r \leq V_0$.

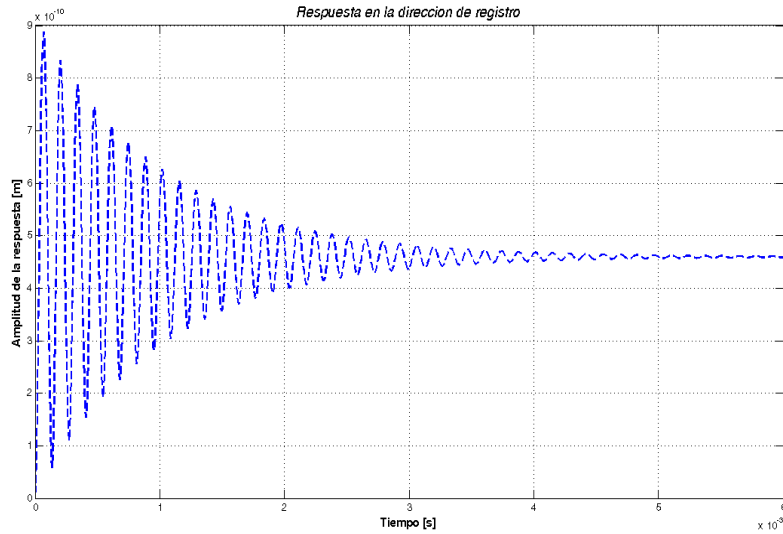
9.2.6. Acelerómetro de $1200 \times 360 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital

A continuación se consignan las gráficas del comportamiento simulado para el sexto acelerómetro propuesto en la sección anterior.

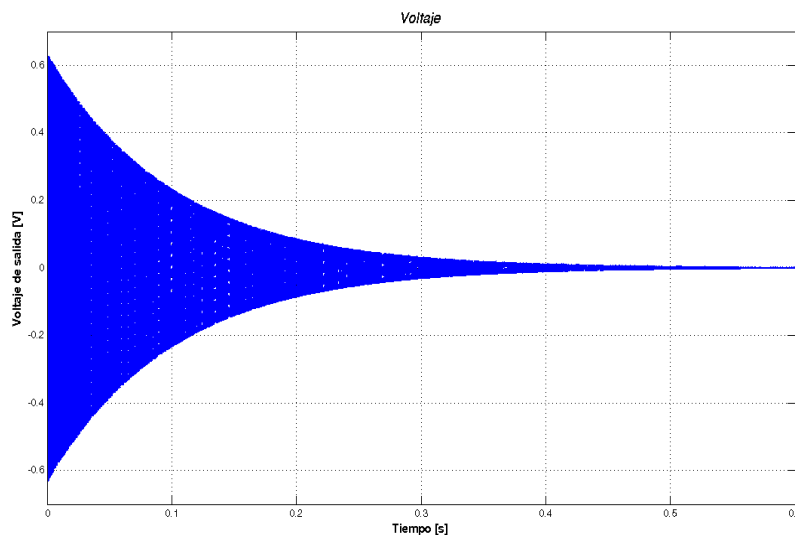


9.2. SIMULACIÓN MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES DE PARÁMETROS CONCENTRADOS 341

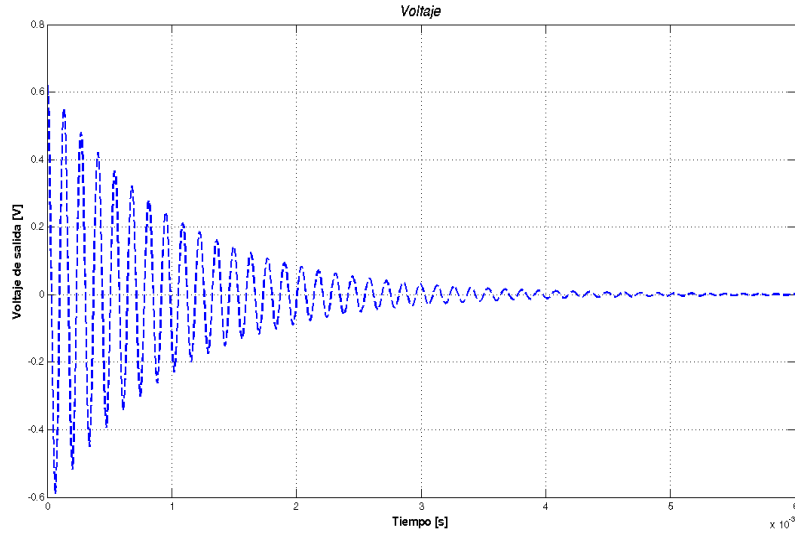
Respuesta en el tiempo del acelerómetro de $1200 \times 360 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital; la señal se estabiliza 0,6 [s] después de registrada la aceleración de entrada. Para esta simulación, la presión se colocó en 100 [Pa].



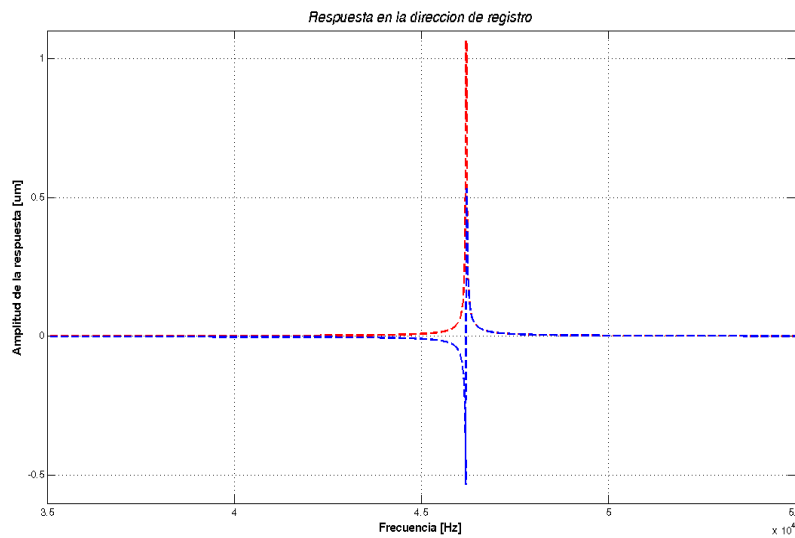
Simulación del comportamiento del sexto acelerómetro propuesto, con una presión de encapsulado igual a 10 [kPa] (vacío bajo). Al aumentar la constante general de amortiguamiento (mecanismo de disipación de energía), el dispositivo oscila por un tiempo menor, en este caso, el sistema deja de oscilar alrededor de 6 [ms] después de registrada la aceleración de entrada.



Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático incorporado al acelerómetro, al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 100 [Pa] y aprovechar un factor de amplificación eléctrica de 100.

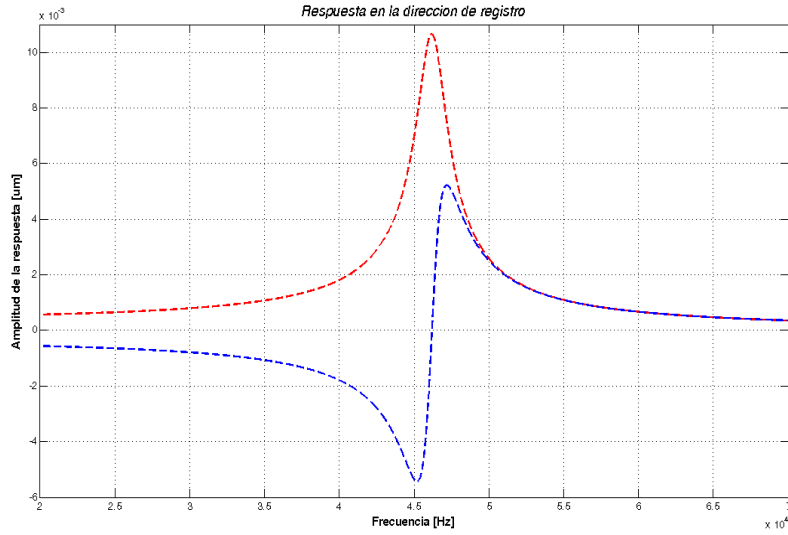


Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 10 [kPa] y mantener un factor de amplificación eléctrica de 100.

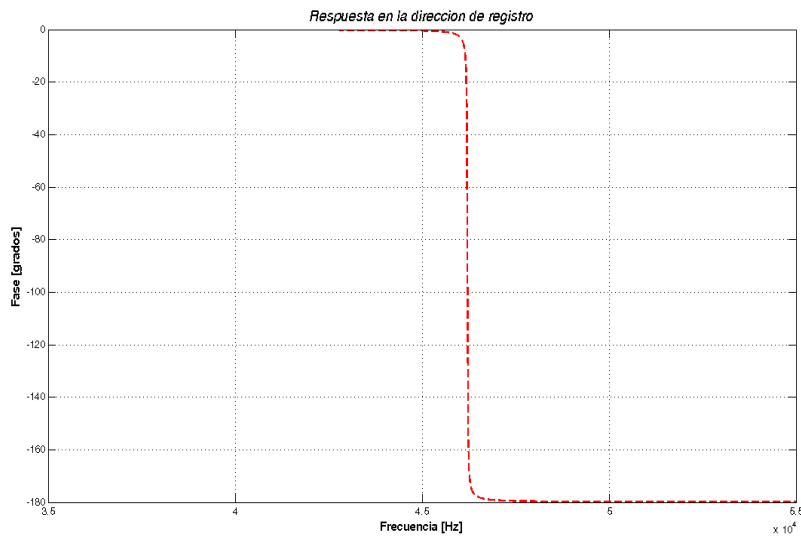


Respuesta en frecuencia del acelerómetro de $1200 \times 360 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión tipo sagital. La frecuencia de resonancia se encuentra alrededor de 45 [kHz]. Para esta simulación, la presión del encapsulado del dispositivo se colocó en 100 [Pa].

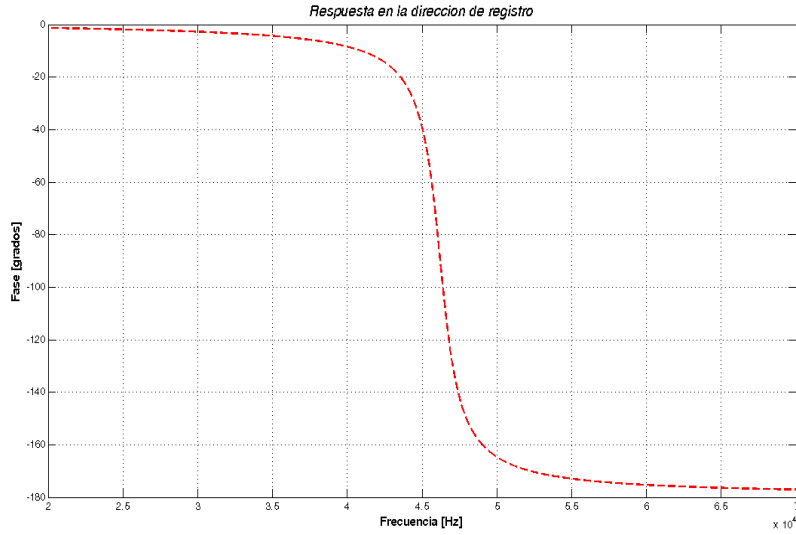
9.2. SIMULACIÓN MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES DE PARÁMETROS CONCENTRADOS 343



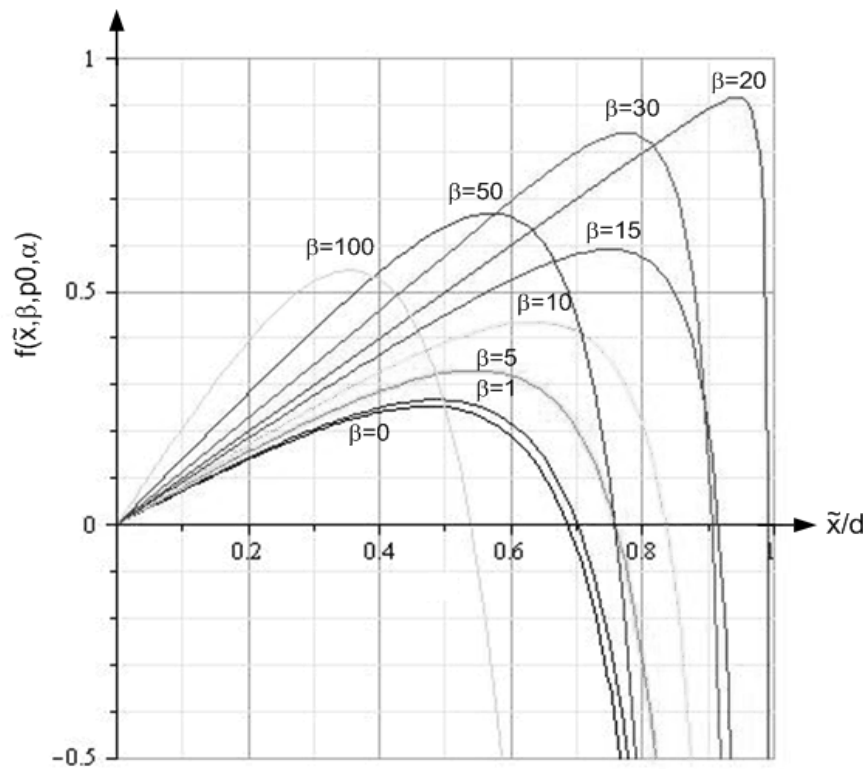
Al aumentar a 10 [kPa] la presión en el encapsulado del sexto acelerómetro propuesto, la amplitud de la respuesta alrededor de la frecuencia de resonancia disminuye hasta en dos órdenes de magnitud.



Comportamiento de la fase para el sexto acelerómetro propuesto sometido a una presión de encapsulado de 100 [Pa].



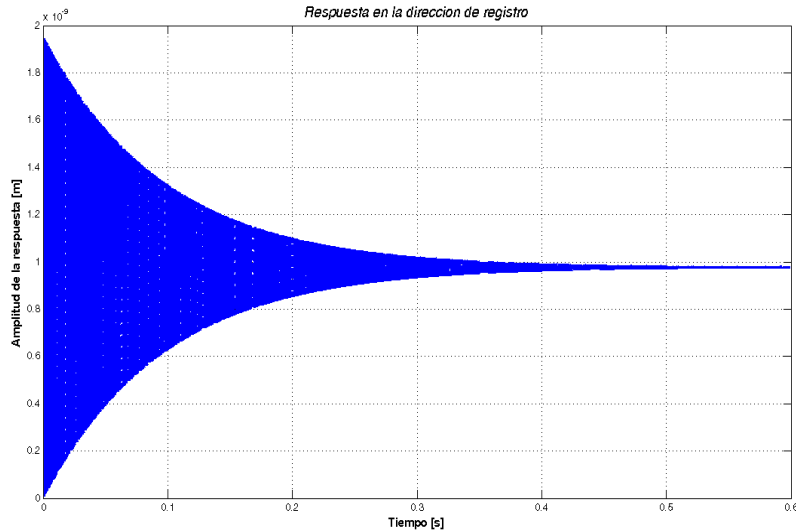
Comportamiento de la fase para el sexto acelerómetro propuesto con una presión en el encapsulado igual a 10 [kPa].



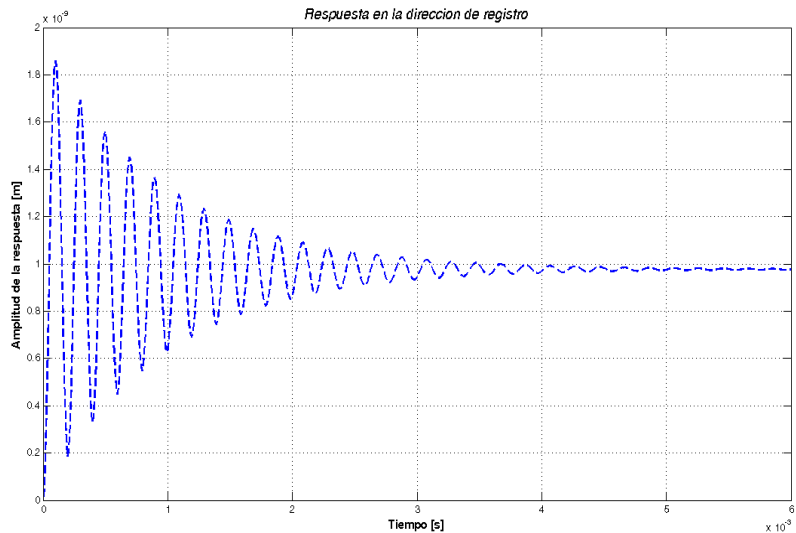
Solución gráfica para la relación entre aceleración ponderada y desplazamiento relativo para el sensor-actuador diferencial con realimentación electromecánica del cuarto acelerómetro propuesto, $p_0 = 0,0697$, $\alpha = 0,05$ y $V_r \leq V_0$.

9.2.7. Acelerómetro de $1200 \times 480 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja

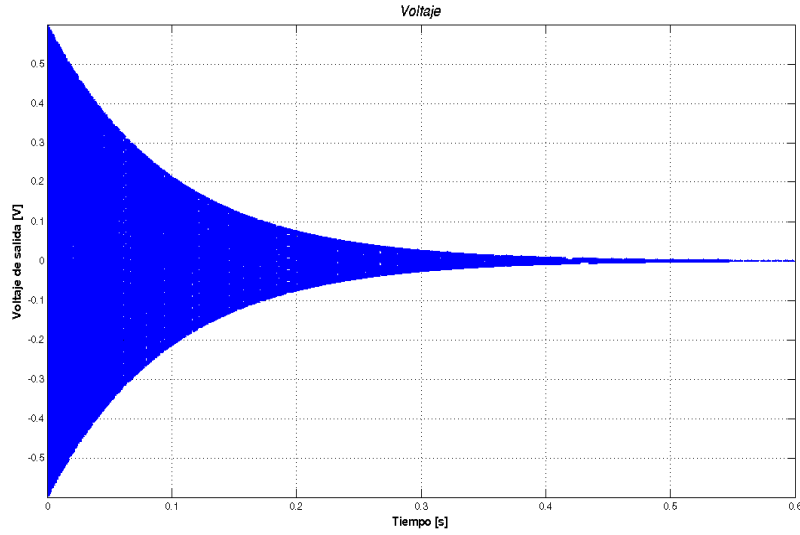
A continuación se consignan las gráficas del comportamiento simulado del séptimo acelerómetro propuesto en la sección anterior.



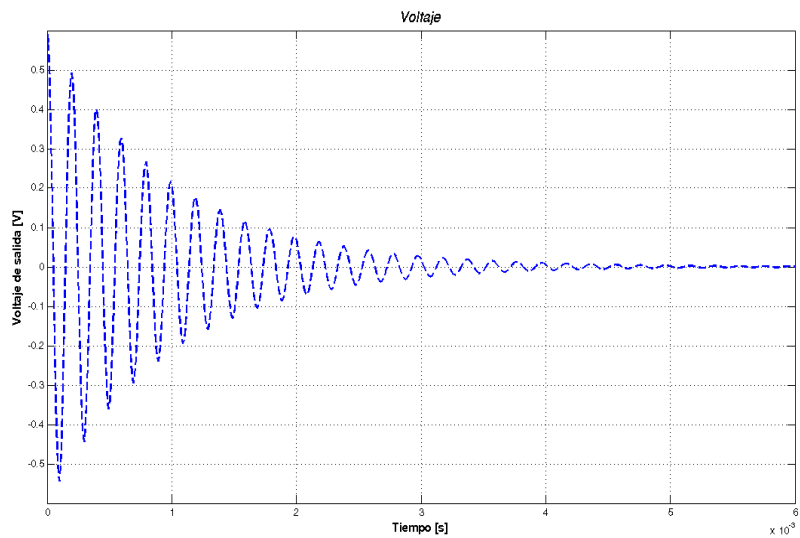
Respuesta en el tiempo del acelerómetro de $1200 \times 480 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja; la señal se estabiliza $0,6 \text{ } [s]$ después de registrada la aceleración de entrada. Para esta simulación, la presión se colocó en $100 \text{ } [Pa]$.



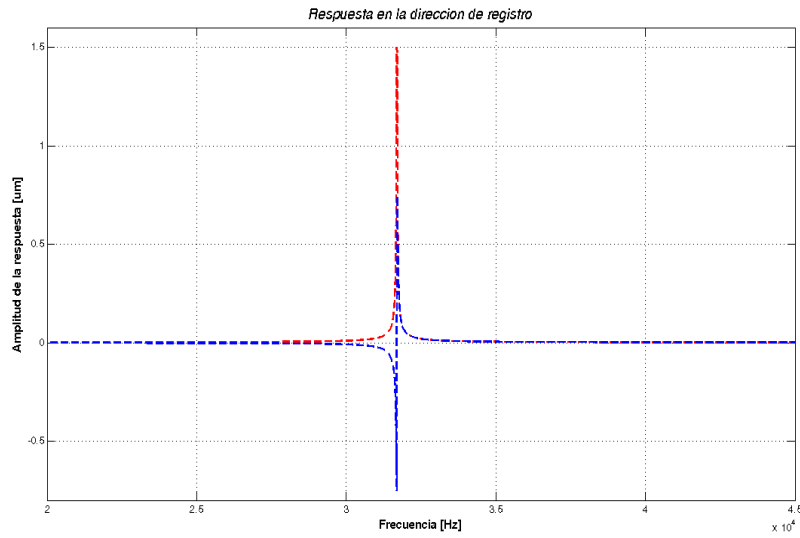
Simulación del comportamiento del séptimo acelerómetro propuesto, con una presión de encapsulado igual a $10 \text{ } [kPa]$ (vacío bajo). Al aumentar la constante general de amortiguamiento (mecanismo de disipación de energía), el dispositivo oscila por un tiempo menor, en este caso, el sistema deja de oscilar alrededor de $6 \text{ } [ms]$ después de registrada la aceleración de entrada.



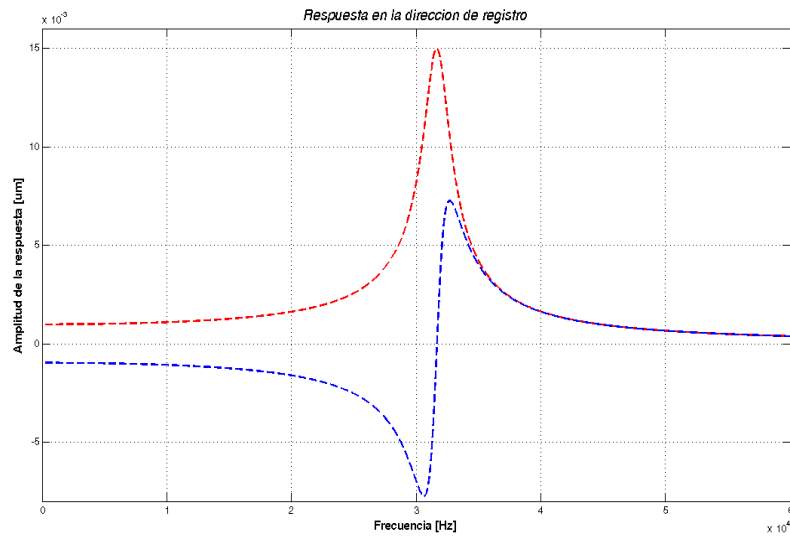
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático del séptimo acelerómetro. La aceleración de entrada fue de una décima de gravedad, el encapsulado se encontraba a una presión de 100 [Pa] y el factor de amplificación eléctrica fue de 100.



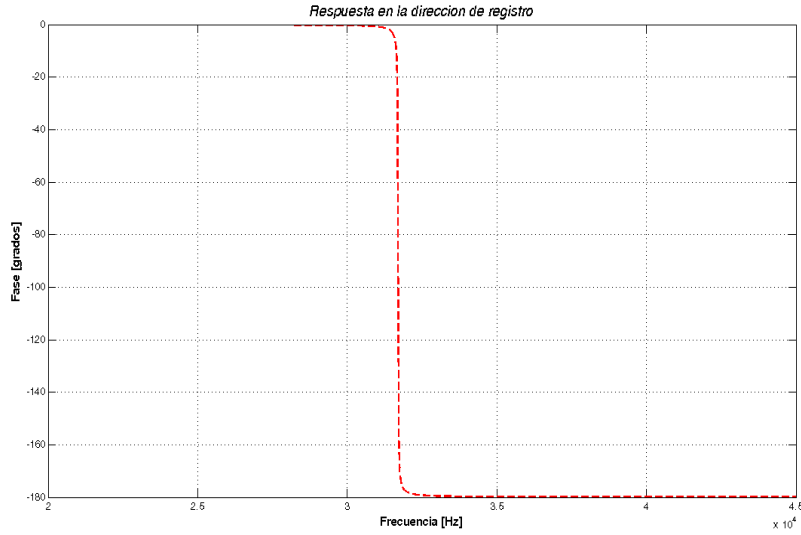
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 10 [kPa] y mantener un factor de amplificación eléctrica de 100.



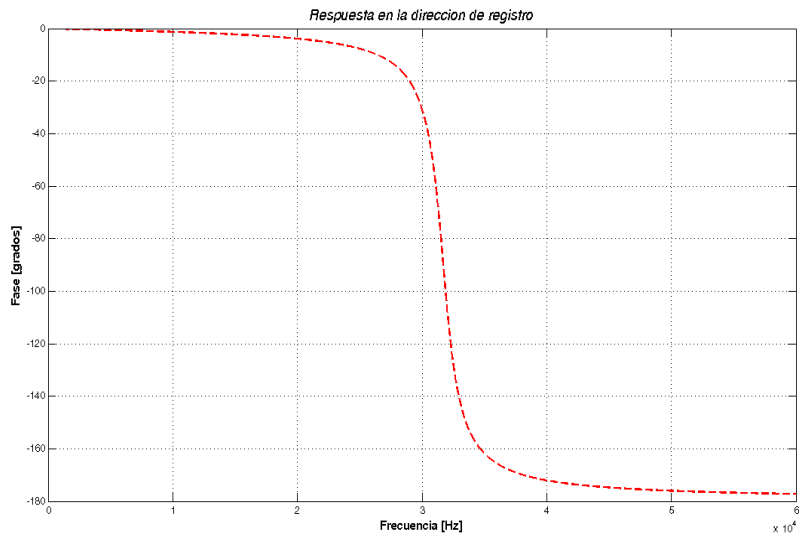
Resposta en frecuencia del acelerómetro de $1200 \times 480 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja. La frecuencia de resonancia se encuentra alrededor de 30 [kHz]. Para esta simulación, la presión del encapsulado del dispositivo se colocó en 100 [Pa].



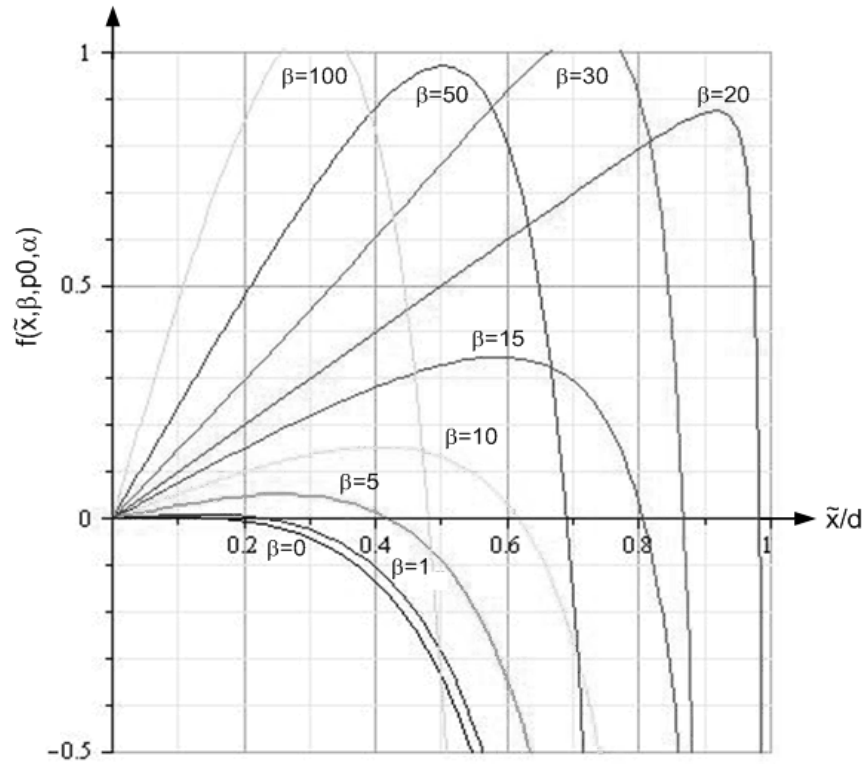
Al aumentar a 10 [kPa] la presión en el encapsulado del séptimo acelerómetro propuesto, la amplitud de la respuesta alrededor de la frecuencia de resonancia disminuye hasta en dos órdenes de magnitud.



Comportamiento de la fase para el séptimo acelerómetro propuesto sometido a una presión de encapsulado de 100 [Pa].



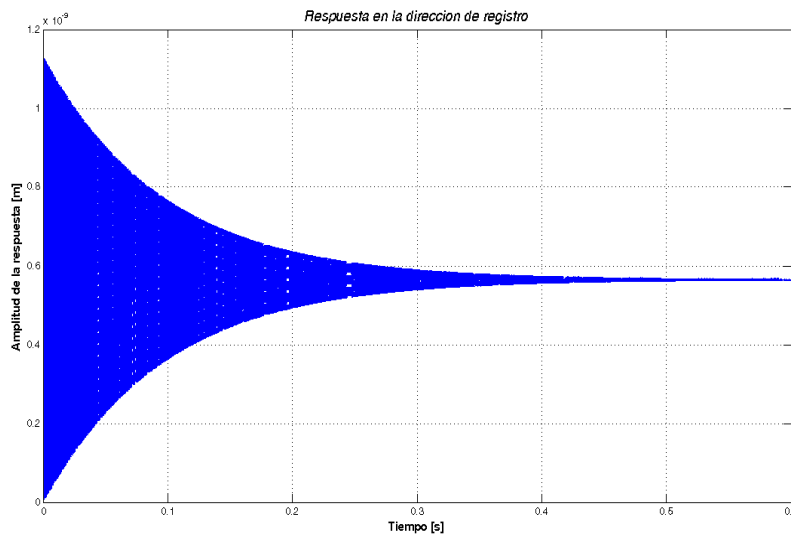
Comportamiento de la fase para el séptimo acelerómetro propuesto con una presión en el encapsulado igual a 10 [kPa].



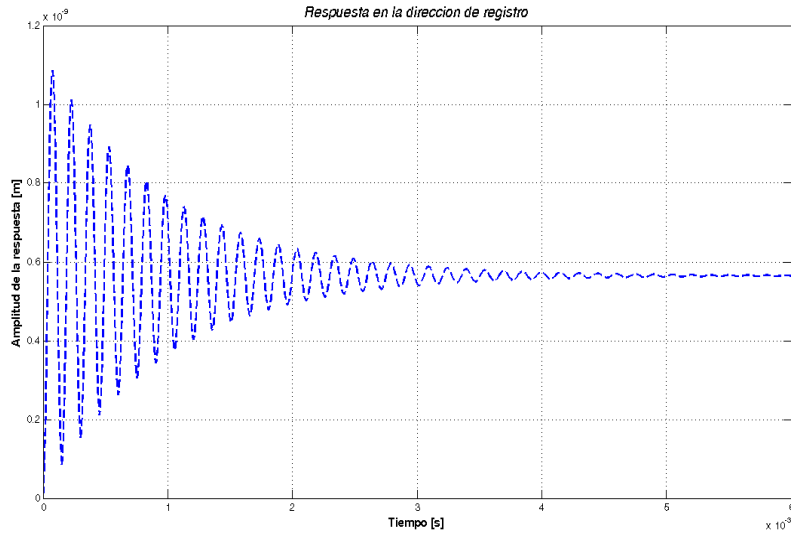
Solución gráfica para la relación entre aceleración ponderada y desplazamiento relativo para el sensor-actuador diferencial con realimentación electromecánica del cuarto acelerómetro propuesto, $p_0 = 0,2361$, $\alpha = 0,05$ y $V_r \leq V_0$.

9.2.8. Acelerómetro de $1200 \times 480 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital

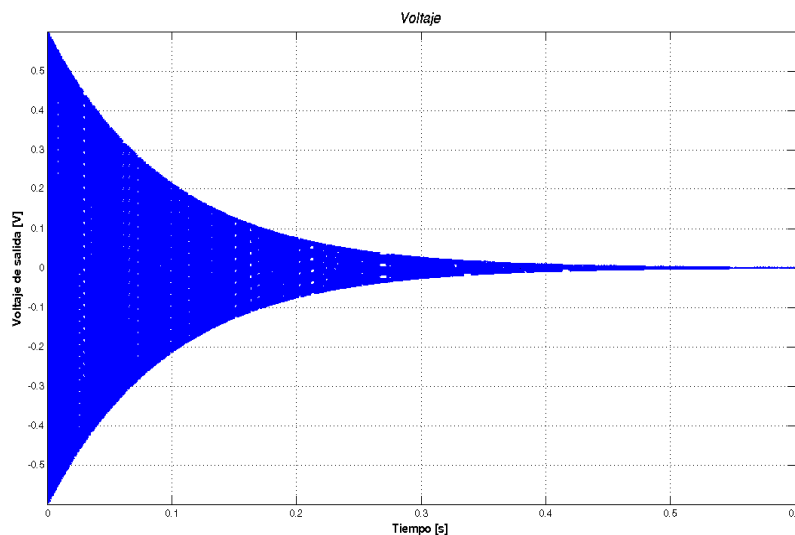
A continuación se consignan las gráficas del comportamiento simulado del último acelerómetro propuesto en la sección anterior.



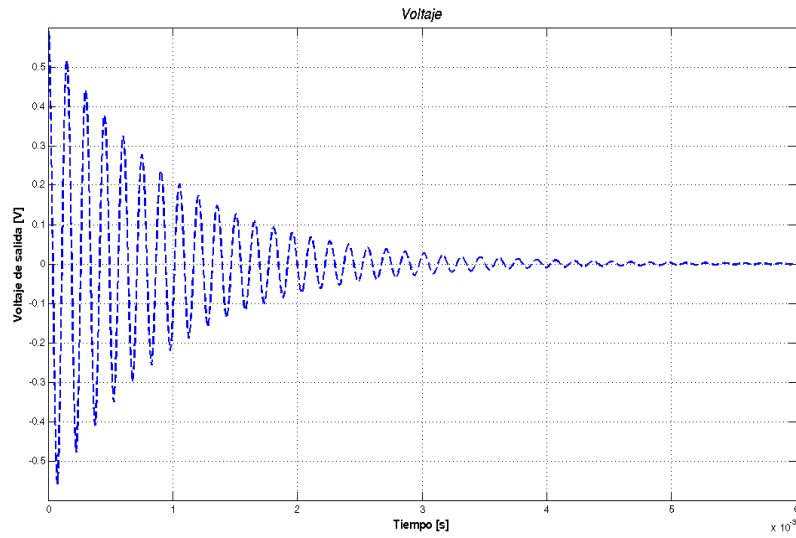
Respuesta en el tiempo del acelerómetro de $1200 \times 480 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital; la señal se estabiliza 0,6 [s] después de registrada la aceleración de entrada. Para esta simulación, la presión se colocó en 100 [Pa].



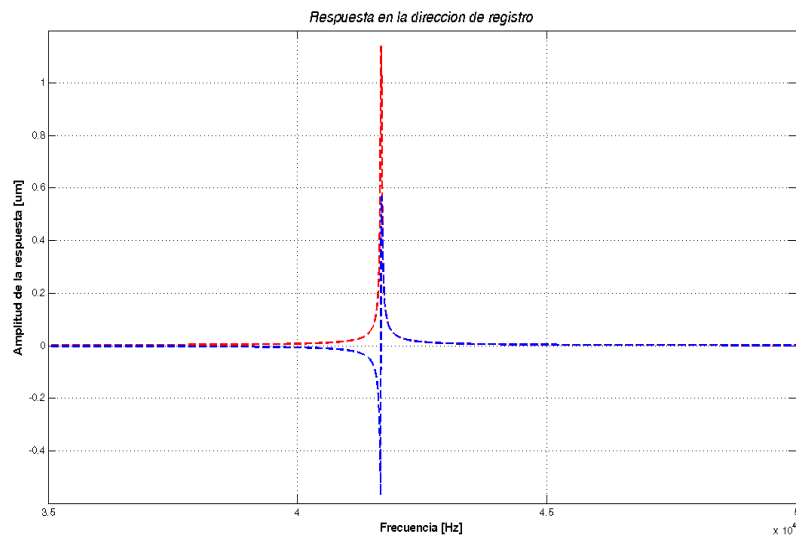
Simulación del comportamiento del octavo acelerómetro propuesto, con una presión de encapsulado igual a 10 [kPa] (vacío bajo). Al aumentar la constante general de amortiguamiento (mecanismo de disipación de energía), el dispositivo oscila por un tiempo menor, en este caso, el sistema deja de oscilar alrededor de 6,5 [ms] después de registrada la aceleración de entrada.



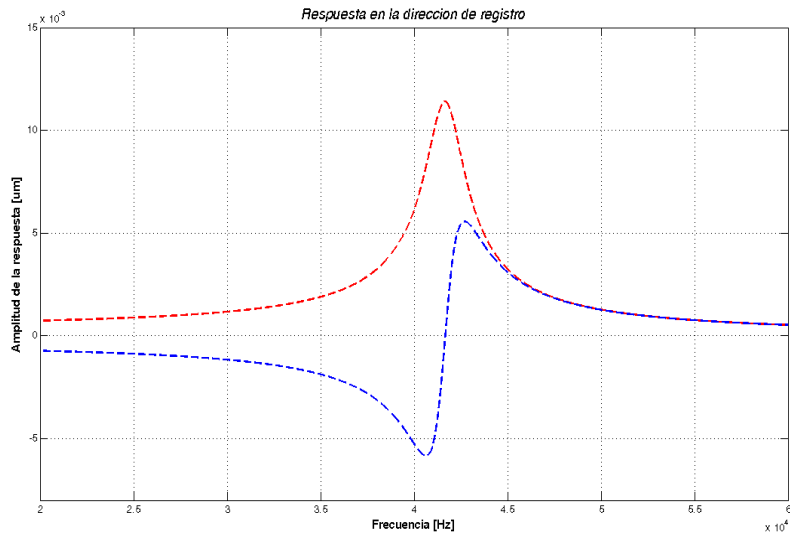
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático incorporado al acelerómetro, al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 100 [Pa] y aprovechar un factor de amplificación eléctrica de 100.



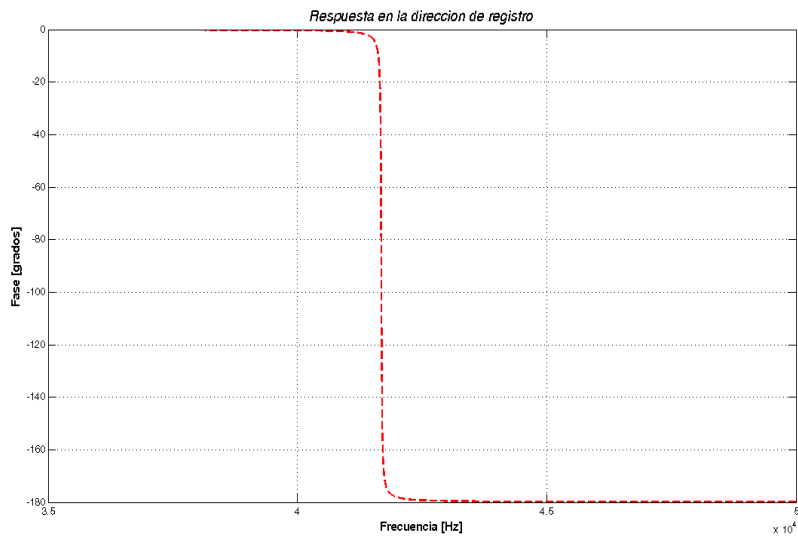
Voltaje de salida del sensor-actuador capacitivo-electrostático al recibir una aceleración de entrada de una décima de gravedad, estar encapsulado a una presión de 10 [kPa] y mantener un factor de amplificación eléctrica de 100.



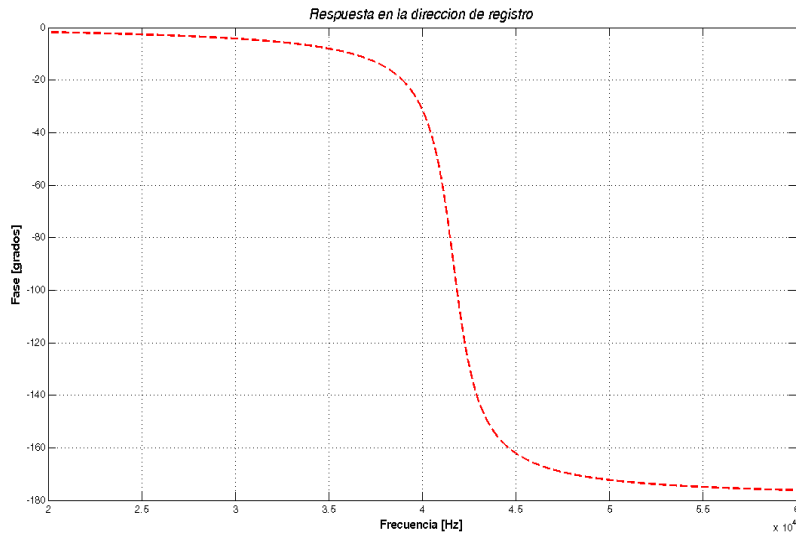
Respuesta en frecuencia del acelerómetro de $1200 \times 480 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión tipo sagital. La frecuencia de resonancia se encuentra alrededor de 40 [kHz]. Para esta simulación, la presión del encapsulado del dispositivo se colocó en 100 [Pa].



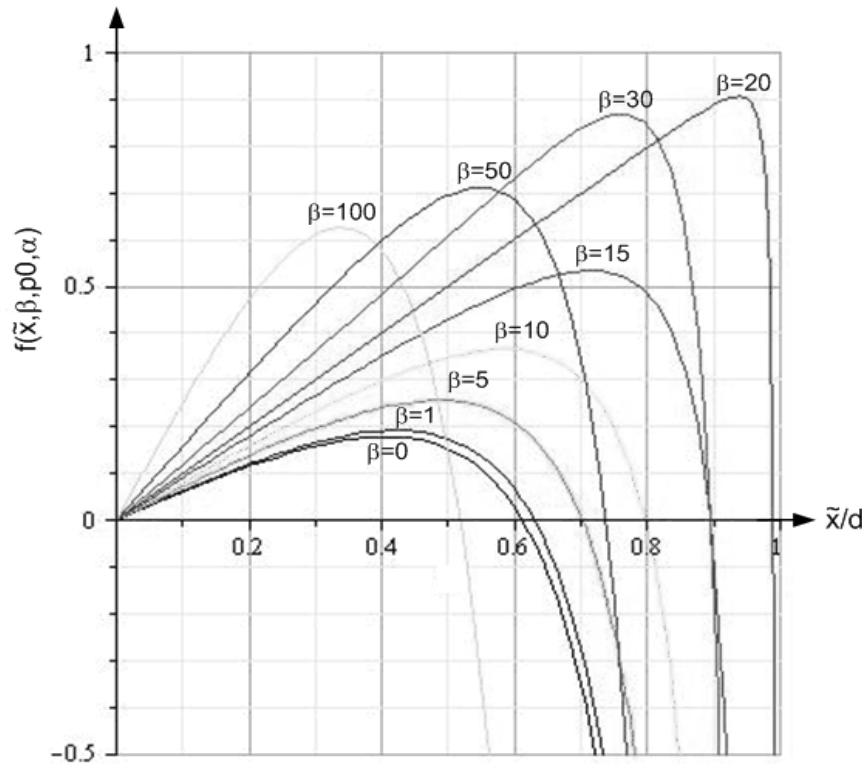
Al aumentar a 10 [kPa] la presión en el encapsulado del octavo acelerómetro propuesto, la amplitud de la respuesta alrededor de la frecuencia de resonancia disminuye hasta en dos órdenes de magnitud.



Comportamiento de la fase para el octavo acelerómetro propuesto sometido a una presión de encapsulado de 100 [Pa].



Comportamiento de la fase para el octavo acelerómetro propuesto con una presión en el encapsulado igual a 10 [kPa].



Solución gráfica para la relación entre aceleración ponderada y desplazamiento relativo para el sensor-actuador diferencial con realimentación electromecánica del cuarto acelerómetro propuesto, $p_0 = 0,0976$, $\alpha = 0,05$ y $V_r \leq V_0$.

A partir de lo obtenido en las simulaciones el diseño que obtiene el mejor desempeño corresponde al acelerómetro de $1200 \times 480 [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja, el segundo mejor desempeño lo obtuvo el acelerómetro de $1200 \times 360 [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja, el tercer mejor desempeño corresponde al acelerómetro

de 1200×480 [μm^2] con suspensión sagital, el cuarto mejor desempeño fue para el acelerómetro de 960×1200 [μm^2] con suspensión de caja.

9.3. Máscara final

La última fase del trabajo es la realización de las máscaras de cada uno de los dispositivos propuestos (8 acelerómetros) en el proceso PolyMumps mediante el uso de la herramienta de edición de MemPro llamada *L-Edit*. Las máscaras de los acelerómetros tienen particularidades en su realización y sobre ellas se comentará de forma general en este último apartado.

Una de las características que vale la pena resaltar en las máscaras de los acelerómetros es la incorporación de una placa de polisilicio para la nivelación de la masa móvil, dicha placa de nivelación está formada por la capa identificada como Poly0 en el proceso PolyMumps y permite que el depósito de las placas estructurales Poly1 y Poly2 sea uniforme y no se presenten irregularidades significativas. Placas semejantes se colocaron debajo de los pares de electrodos que forman el actuador electrostático con la finalidad de nivelar sus perfiles laterales y disponer de la mayor área de traslape posible.

También se colocaron placas de nivelación debajo de las vigas que forman la suspensión, ello con el objetivo de evitar dobleces o desniveles que alteren su rigidez.

Nótese que en el anclado de las suspensiones del acelerómetro se han colocado pads de contacto de 100×100 [μm^2] para realizar la conexión eléctrica con la masa móvil a través de las vigas voladas de la suspensión. La correcta polarización del actuador electrostático implica que los electrodos pegados a la masa móvil se encuentren al mismo potencial eléctrico que el polo negativo de la señal de alimentación, por lo que en alguno de los pads de contacto de sus anclas se colocará la terminal negativa. Por otra parte, nótese que los electrodos pegados a la masa móvil se encuentran flanqueados por dos electrodos, uno en la parte derecha o superior y otro en la parte izquierda o inferior (según sea la orientación en que se aprecia la máscara). Todos los electrodos en la parte izquierda o superior están conectados entre sí y con el pad colocado a la derecha o en la parte superior de la máscara; en tanto que todos los dedos en la parte derecha o inferior están conectados entre sí y con el pad colocado a la izquierda o en la parte inferior; de este modo se crea el capacitor diferencial de placas paralelas que se consideró como parte del diseño de los dispositivos.

Todas las placas de polisilicio estructural y la placa final de oro tienen agujeros de liberación y la primera capa de polisilicio estructural móvil conocida como Poly1 tiene dimples. El propósito de los agujeros es permitir el ingreso del atacante químico que elimina la primera capa de óxido que sirve como capa de sacrificio para separar las capas estructurales Poly0 y Poly1 y evitar que queden pegadas por su inadecuada remoción. En tanto que los dimples, son un trabajo de grabado (perforación) sobre la primera capa de óxido con una profundidad de $0,75$ [μm] que generan un escurrimiento de la capa del polisilicio estructural Poly1 (cuando éste se deposita) con la finalidad de formar pequeños postes en el espacio de separación de Poly0 y Poly1. Los objetivos de inclusión de estos postes son dos, por una parte, evitar la adhesión electrostática entre las capas paralelas de Poly0 y Poly1 al entrar en contacto como dos superficies planas (fenómeno que es conocido en inglés como *stiction*) y, en segundo lugar, para los casos en que las estructuras de Poly1 se desplacen sobre placas de Poly0, disminuir la superficie de contacto y con ello la fricción.

Los agujeros hechos en la capa de polisilicio estructural Poly1 son seguidos por agujeros en las capas de Poly2 y Metal, ello con la finalidad, también, de permitir el paso del atacante químico que removerá la capa de óxido (capa de sacrificio) que separa las capas Poly0 y Poly1. Las reglas de diseño señalan que los agujeros en Poly2 deben encerrar al menos por 2 micrómetros a los agujeros en la capa Poly1 y los agujeros en la capa Metal deben encerrar a los agujeros en la capa Poly2 también al menos por 2 micrómetros.

Se aprovechó la disposición de la capa de oro (que es mucho más denso que el silicio policristalino) en el proceso PolyMumps para depositarla sobre la capa de polisilicio estructural Poly2 en la placa suspendida que forma la masa móvil, ello con el objetivo de ganar masa sin incrementar en exceso las dimensiones de

dicha placa. Como señalan las reglas de diseño del proceso, el trazo o depósito de la placa de oro debe quedar inscrito al trazo o depósito de la placa de polisilicio estructural Poly2 en al menos cuatro micrómetros para evitar anomalías en su grabado.

Como se señaló en el apartado *Elementos básicos en el diseño de MEMS* del capítulo 2, en algunas ocasiones se violan las reglas de diseño para obtener un resultado especial, en este caso otra alternativa para ganar mayor cantidad de masa sin incrementar en exceso las dimensiones de la placa suspendida que forma la masa móvil, es atrapar la capa de óxido (segunda capa de sacrificio del proceso) que se emplea para separar las capas de polisilicio estructural Poly1 y Poly2. Si se construye un cuadrado en Poly1 de $60 \times 60 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ se le deberá hacer un agujero de $4 \times 4 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ en la parte central para permitir la liberación de la capa de sacrificio entre Poly0 y Poly1, sobre este cuadrado se colocará otro cuadrado en Poly2 también de $60 \times 60 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con un agujero de $8 \times 8 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ en el centro. Ahora para atrapar la capa de óxido entre Poly1 y Poly2 se sellarán los extremos, para ello se colocará una tira de $6 \text{ } [\mu\text{m}]$ de grosor, de la capa llamada Poly1-Poly2 Via, alrededor de los cuadrados sobrepuestos de Poly1 y Poly2, cuidando que la banda siempre rebase en $2 \text{ } [\mu\text{m}]$ el borde de dichos cuadrados; en el centro de los cuadrados sobrepuestos de Poly1 y Poly2 se coloca un cuadrado de Poly1-Poly2 Via de $16 \times 16 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ (tal como se muestra). De este modo, al depositarse la capa de Poly2, hará contacto físico con la capa de Poly1 en todos aquellos lugares en dónde se hubiera retirado la segunda capa de sacrificio (véase la figura) y se atraparán entre estas dos capas, como si se tratara de un sandwich, el resto del material de la capa de sacrificio (óxido de silicio), ganando un poco de masa sin crecer el largo o ancho de la placa. Dado que la densidad del óxido de silicio es de $2,6 \times 10^{-15} \text{ } [\text{kg}/\mu\text{m}^3]$, es decir, mayor que la del polisilicio, atrapar la capa de óxido de $0,75 \text{ } [\mu\text{m}]$ de espesor es equivalente a sumar una placa de material estructural para ganar mayor cantidad de masa. Cabe aclarar que esta técnica no se empleó en el diseño de los acelerómetros consignados en el presente trabajo.

Otro aspecto importante de las máscaras de los acelerómetros es el aislamiento eléctrico de las placas de Poly0 que forman la parte más baja del pad de contacto en el anclaje de las suspensiones y la que está debajo de las vigas voladas de la suspensión y de la masa móvil. Así, se podría conectar a la placa de nivelación de la masa móvil un pad de contacto para aprovechar el capacitor de placas paralelas (formado por las placas de la masa móvil y la placa de nivelación) y registrar las conexiones de la suspensión, que son aproximaciones o alejamientos de las placas, en la dirección z y con ello agregar una dirección de registro para aceleración al diseño. Debe aclararse que en este caso, el capacitor generado no es diferencial, pero que a pesar de ello puede emplearse un control en lazo cerrado para evitar el nocivo efecto de llegada (*pull-in effect*). También, es conveniente que la placa de nivelación, debajo de los electrodos del actuador electrostático esté aislada de la placa de nivelación debajo de la masa móvil, a fin de evitar la flexión y eventual contacto de las vigas voladas estáticas (electrodos inmóviles) del actuador. Finalmente, también es aconsejable que debajo de cada dimple de la masa móvil se coloque un cuadro de Poly0 de $8 \times 8 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ aislado eléctricamente del resto de la placa de nivelación (electrodo del capacitor de placas paralelas en la dirección z) por una separación de al menos $4 \text{ } [\mu\text{m}]$ que lo rodee, ello con la finalidad de que en caso de una flexión pronunciada de la suspensión, no se genere contacto eléctrico entre las placas de nivelación y masa móvil.

Para formar los capacitores diferenciales de registro a partir de una serie de electrodos intercalados (que también funcionen como actuadores electrostáticos diferenciales) es necesario que cada electrodo saliente de la masa móvil sea flanqueado por dos electrodos, cada uno de ellos eléctricamente aislado del otro, a fin de permitir la alimentación de dos señales eléctricas independientes que permitan el registro y control del desplazamiento de la masa móvil (en la dirección de menor rigidez de la suspensión, también llamada dirección de registro). Para lograr que todos los electrodos en la parte superior o a la derecha de cada electrodo saliente de la masa móvil (según sea la perspectiva en que se aprecia el dispositivo) estén eléctricamente conectados, se coloca una tira de Poly0 debajo de ellos (eléctricamente aislada de las placas de nivelación) y se crean unas pequeñas bases de algunos micrómetros cuadrados con un ancla hacia la capa Poly0 para cada electrodo; al final de la tira de Poly0 a la que se conectan todos los electrodos superiores o a la derecha se ubica un pad de contacto de $100 \times 100 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ a través del cual se alimentará la señal eléctrica correspondiente (debe recordarse que el polo negativo de la vía de alimentación de cada señal con que se alimente el dispositivo estará conectado al pad en el anclaje de la suspensión). Del mismo modo, para conectar todos los electrodos en la parte inferior o a la izquierda de cada electrodo saliente de la masa móvil se coloca una tira de Poly0

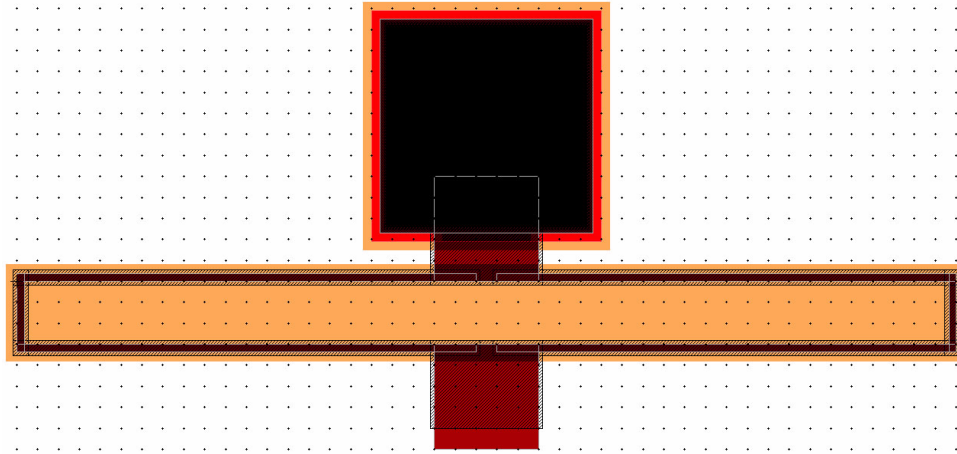
debajo de ellos, a la cual deberán anclarse mediante pequeñas bases y al final de la cual se colocará un pad de contacto para alimentar otra señal eléctrica. De este modo se evita que se presente el efecto de llegada (*pull-in effect*) mediante el balanceo de fuerzas electrostáticas empleando el actuador electrostático diferencial.

En la creación de las vigas voladas y la placa suspendida que forman la suspensión de la masa móvil, respectivamente, la capa del proceso PolyMumps llamada Poly1-Poly2 Via cubre por completo y rebasa en 2 [μm] los trazos de las placas de material estructural Poly1 y Poly2 para fusionarlas y lograr elementos con un grosor de 3,5 [μm]. Este procedimiento viola las reglas de diseño del proceso y pone en riesgo el resultado de la corrida (envío a fabricación), sin embargo, esta forma de fusionar las dos capas de material estructural para lograr perfiles de 3,5 [μm] de grosor se consigna en el apartado *Creating Double Thickness Structures* del manual de reglas de diseño.

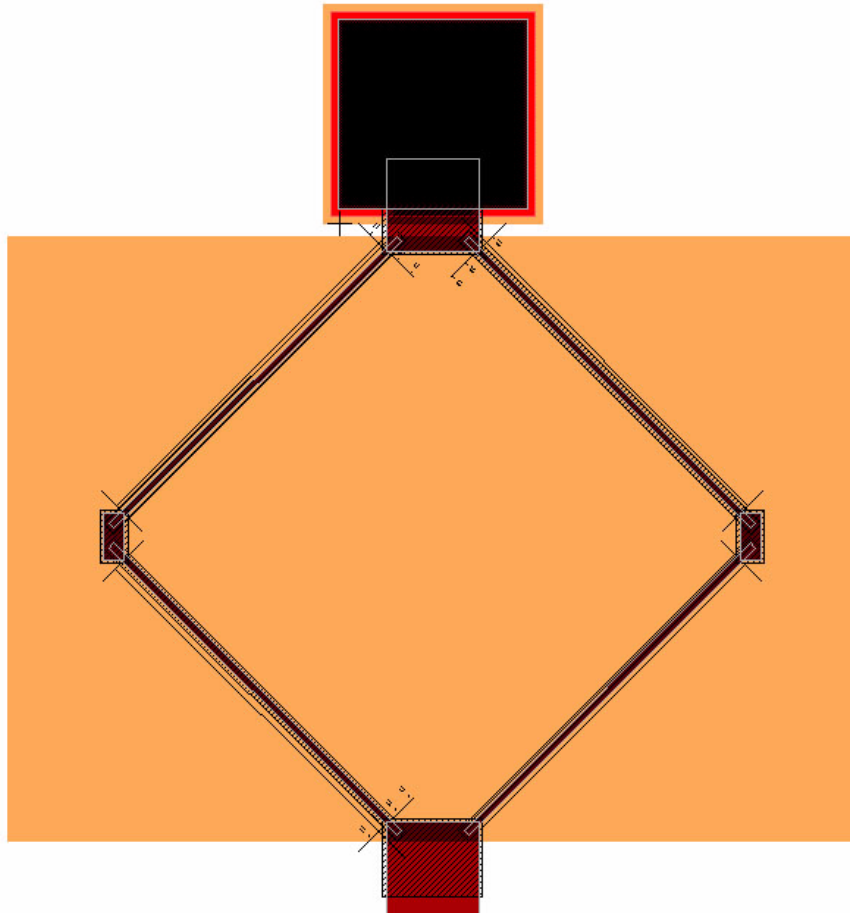
Un recurso muy poderoso en la creación de máscaras de cualquier dispositivo lo constituyen las celdas. Se trata de un agrupamiento de elementos creados a partir de las capas del proceso de fabricación que se identifican mediante un nombre genérico para su posterior inserción y reproducción dentro de una plantilla más grande. Las celdas pueden emplearse para crear partes repetitivas dentro de un dispositivo muy grande, tal como: los dientes en un engrane o los juegos de electrodos diferenciales en un actuador electrostático. A la reproducción de una celda dentro de un plantilla se le conoce como instancia y cualquier modificación que sufra el diseño base o la celda maestra, se verá reflejado de inmediato en todas sus instancias, sin la necesidad de editarlas una por una. La división del diseño de un dispositivo en partes simples que se puedan colocar en una celda para su posterior uso y reproducción, abrevia los tiempos de creación de las máscaras y posibilita la creación rápida de variaciones sobre un mismo dispositivo base.

Respecto de las variaciones sobre los diseños base de los dispositivos, en la máscara final se han introducido dos variaciones en las suspensiones y se han tomado las masas móviles ya propuestas y combinado con estas variaciones de las suspensiones. La primera de las variaciones realizada sobre las suspensiones fue una suspensión de caja con bordes redondeados. La segunda variación realizada sobre las suspensiones fue mover el ángulo de inclinación de la suspensión sagital a 30 grados. Finalmente, la tercera variación ha sido convertir la placa de nivelación y la placa de la masa móvil en un capacitor. Finalmente, un proceso que es muy importante realizar cada vez que se crea una celda (subcomponente de un dispositivo) o la máscara de algún dispositivo es muy importante realizar la revisión automática de las reglas de diseño para verificar posibles violaciones que generen problemas. El comando se encuentra en la barra de herramientas MemsPro, en la opción *Tools* y bajo el nombre *Mems DRC*. Si por alguna razón no aparece la barra de herramientas de MemsPro, entonces deberá cargarse mediante el siguiente procedimiento:

1. Seleccione en el menú principal de *L-Edit*, la opción *Tools*.
2. A continuación seleccione el comando *Macro...*, se abrirá una ventana con una serie de botones en la parte derecha.
3. De esos botones, seleccione el botón *Load*, aparecerá una nueva ventana para la paginación de archivos, navegue hasta el directorio *C:\Archivos de programa\Memscap\MEMS Pro v4.0\MemsLibs*, seleccione el archivo *MEMSPHysicall.dll* y presione el botón abrir.
4. El foco del programa regresará a la ventana inicial y deberá presionarse el botón *Close*.
5. La barra de herramientas de MemsPro debe estar cargada y abierta.



Máscara de la suspensión de caja con vigas horizontales de $200\ \mu\text{m}$ de largo, $3.5\ \mu\text{m}$ de ancho y $3.5\ \mu\text{m}$ de grosor. Las barras verticales tienen $30\ \mu\text{m}$ de largo, $3.5\ \mu\text{m}$ de ancho y $3.5\ \mu\text{m}$ de grosor.



Máscara de la suspensión sagital con inclinación de 45° y largo de las vigas de $200\ \mu\text{m}$, el ancho y grosor de las vigas inclinadas es de $3.5\ \mu\text{m}$.

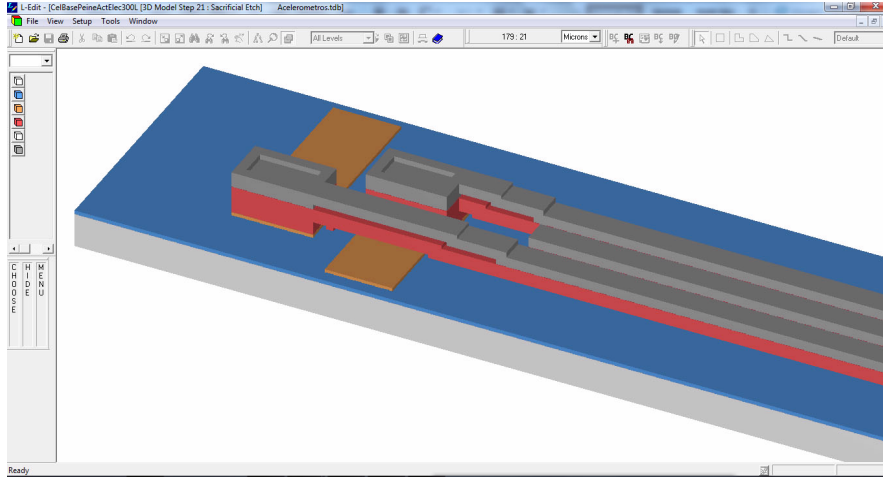
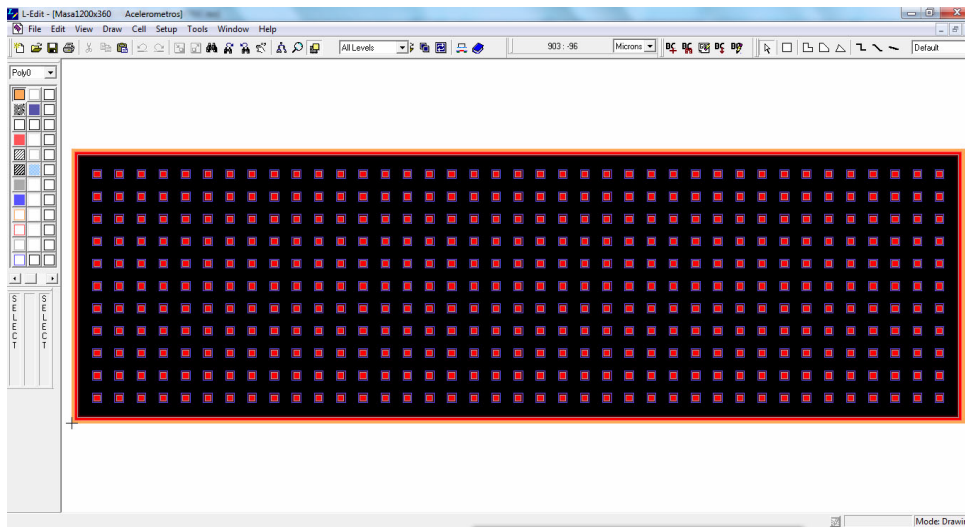
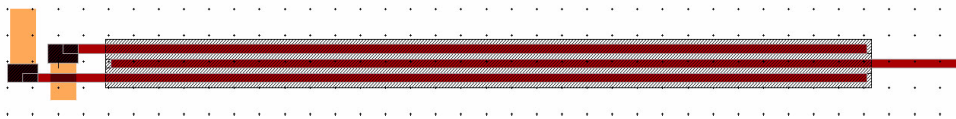


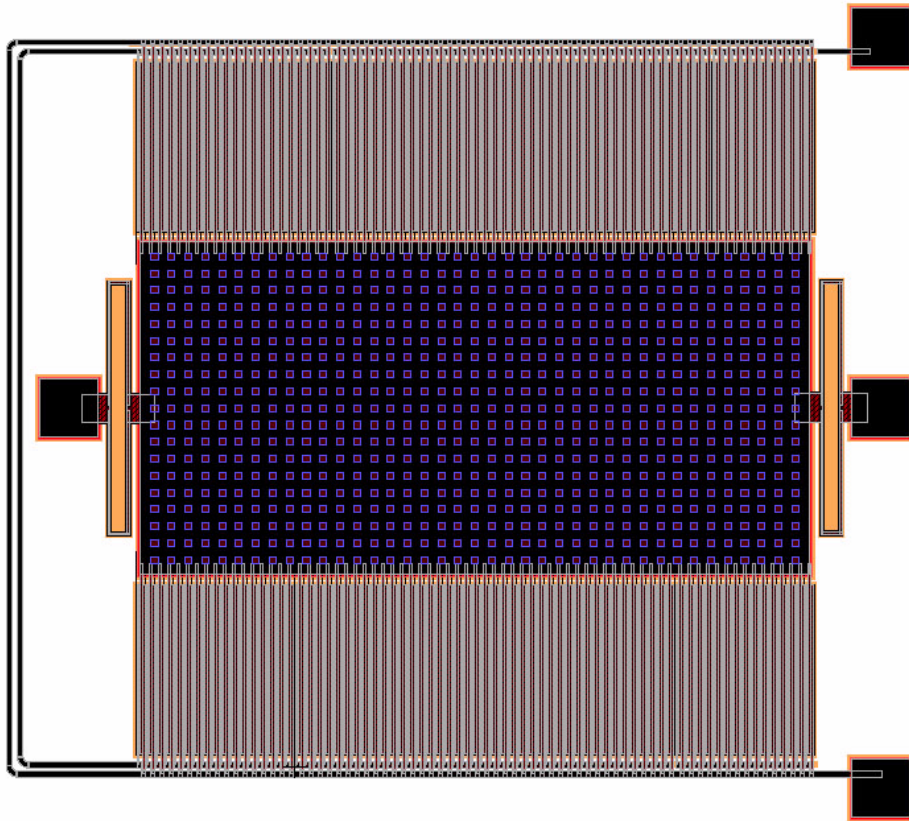
Figura 9.1: Modelo tridimensional del actuador y sensor electrostático. Se aprecian las anclas de los electrodos diferenciales fijos y las pistas de Poly0 que sirven para la conexión eléctrica y corren por debajo de los electrodos (vigas) suspendidos.



Máscara de la masa móvil sin electrodos del acelerómetro de $1200 \times 360 \text{ } [\mu\text{m}]$.

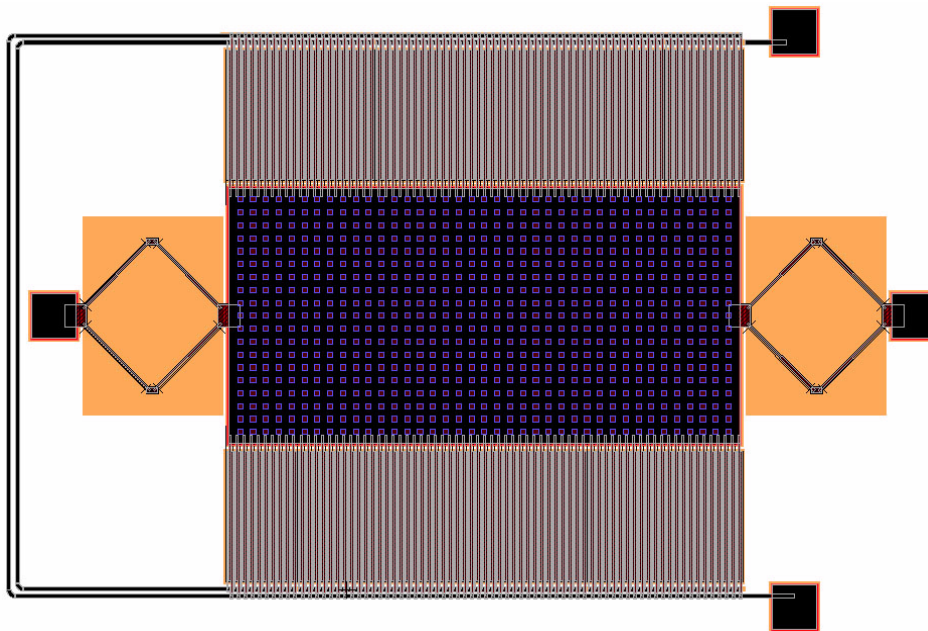


Máscara del actuador y sensor electrostático formado por los electrodos móviles pegados a la masa de prueba (electrodo central) y los electrodos fijos diferenciales (electrodos superior e inferior).

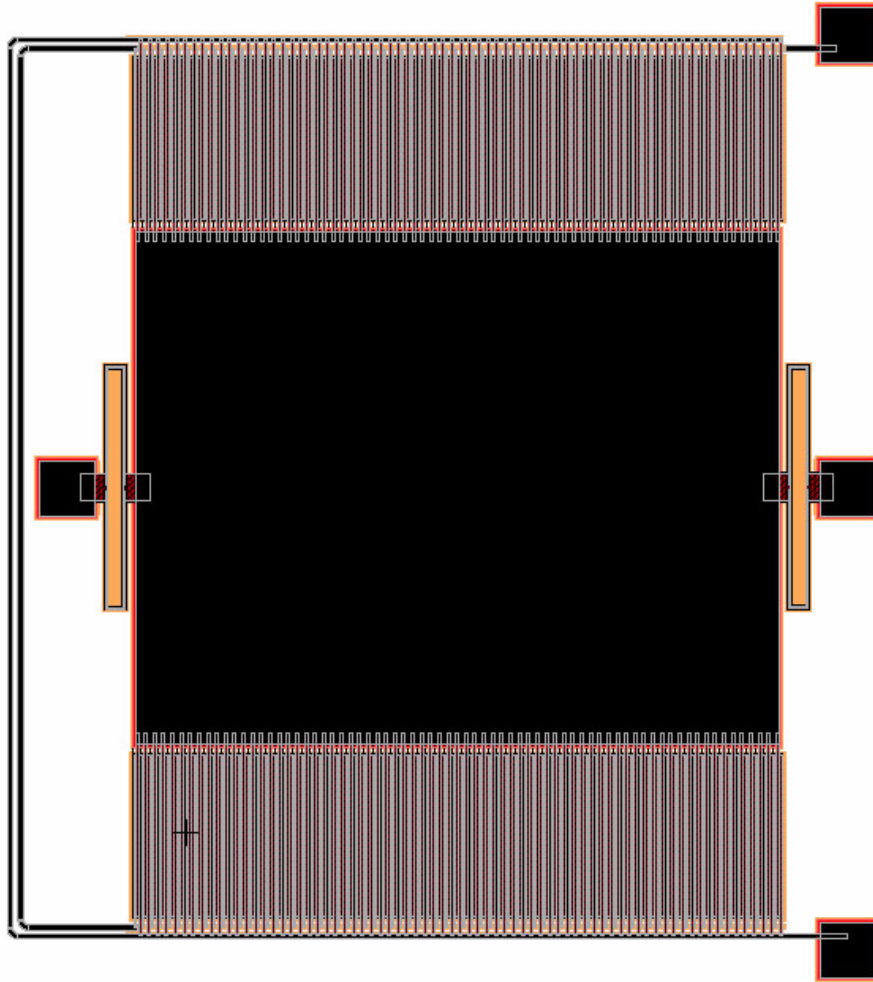
9.3.1. Acelerómetro de $600 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja

Máscara correspondiente al acelerómetro de $600 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión de caja.

9.3.2. Acelerómetro de $600 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital

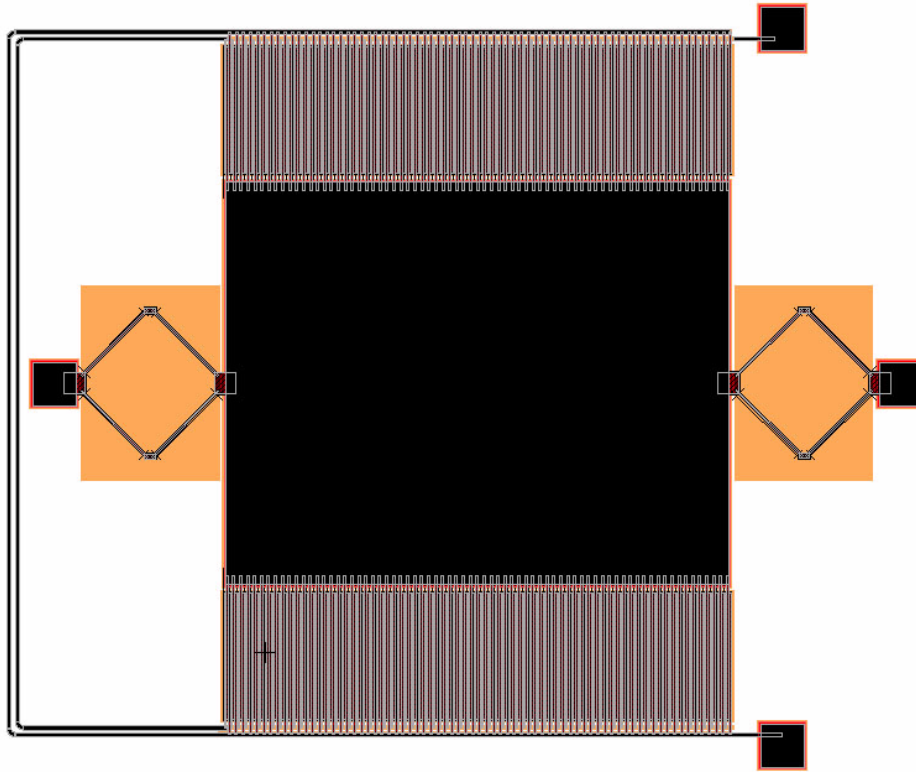


Máscara correspondiente al acelerómetro de $600 \times 1200 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital.

9.3.3. Acelerómetro de 960×1200 [μm^2] con suspensión de caja

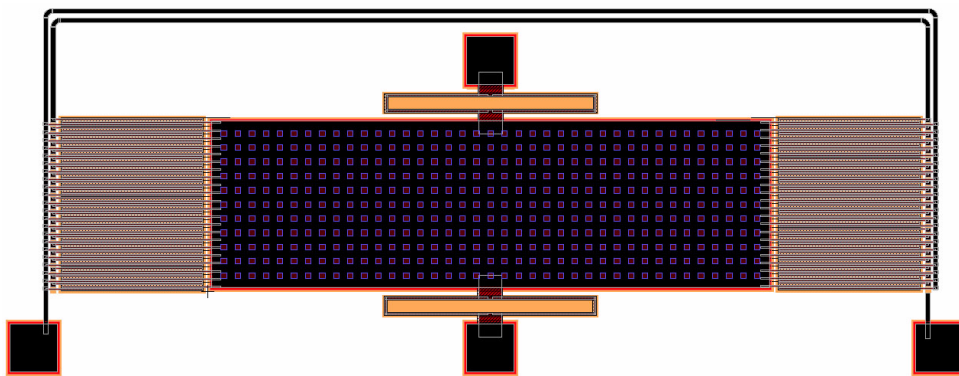
Máscara correspondiente al acelerómetro de 960×1200 [μm^2] con suspensión de caja.

9.3.4. Acelerómetro de 960×1200 [μm^2] con suspensión sagital

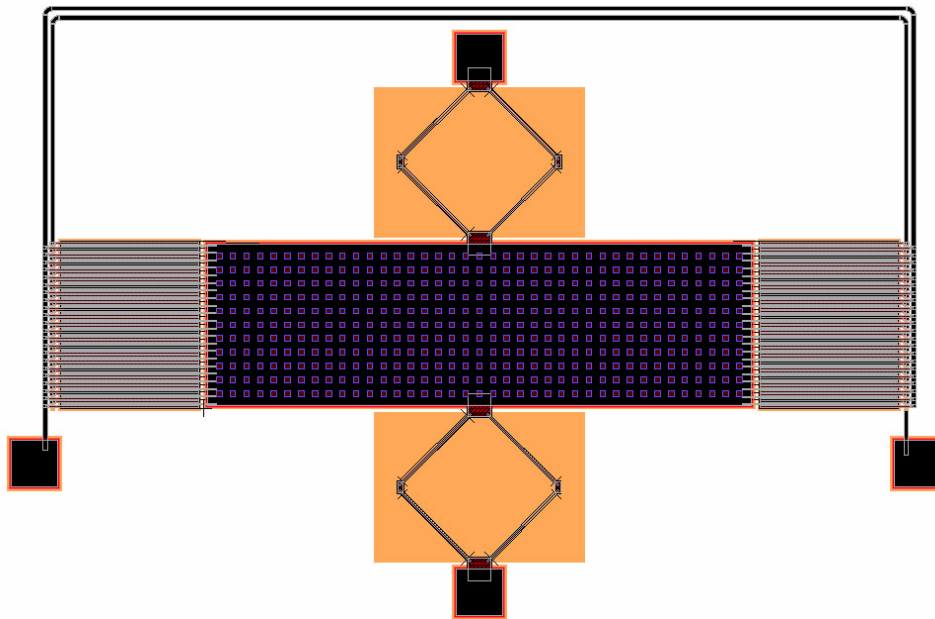


Máscara correspondiente al acelerómetro de 960×1200 [μm^2] con suspensión sagital.

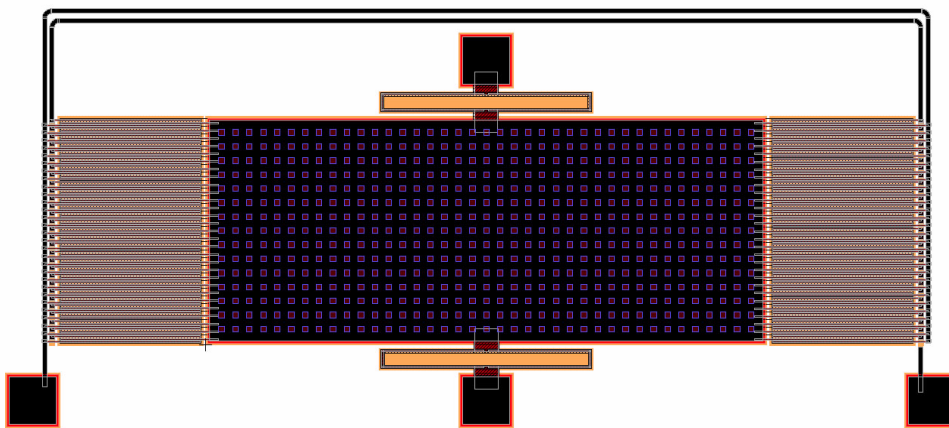
9.3.5. Acelerómetro de 1200×360 [μm^2] con suspensión de caja



Máscara correspondiente al acelerómetro de 1200×360 [μm^2] con suspensión de caja.

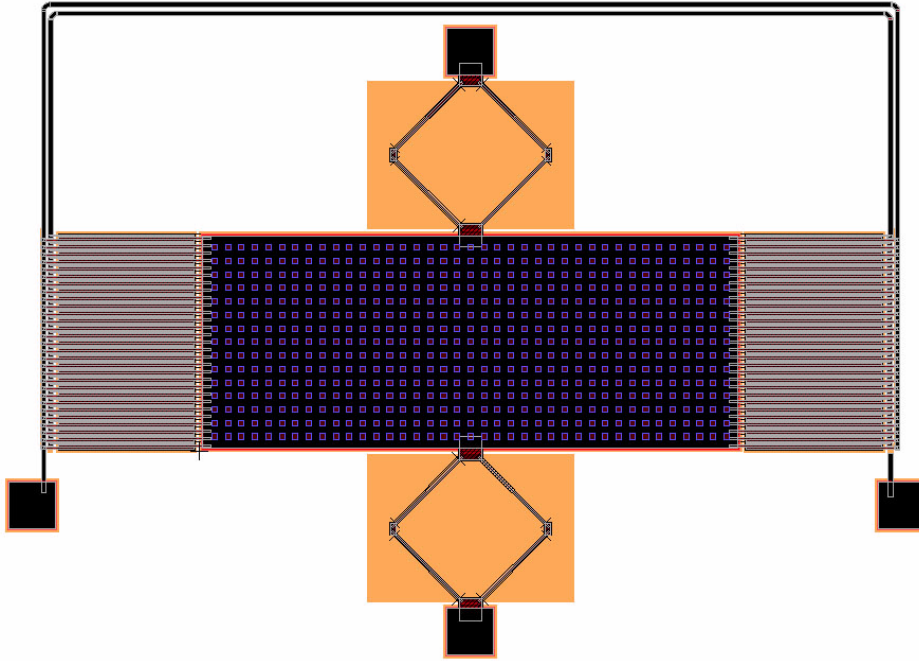
9.3.6. Acelerómetro de 1200×360 [μm^2] con suspensión sagital

Máscara correspondiente al acelerómetro de 1200×360 [μm^2] con suspensión sagital.

9.3.7. Acelerómetro de 1200×480 [μm^2] con suspensión de caja

Máscara correspondiente al acelerómetro de 1200×480 [μm^2] con suspensión de caja.

9.3.8. Acelerómetro de $1200 \times 480 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital



Máscara correspondiente al acelerómetro de $1200 \times 480 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ con suspensión sagital.

9.3.9. Verificación general automática de las reglas de diseño y aproximación de la geometría

Una vez que se han reunido los elementos de un dispositivo o se han agrupado dos o más máscaras correspondientes a dispositivos es conveniente ejecutar una revisión automática de las reglas de diseño, para cerciorarse que todo marcha adecuadamente. Esto con la finalidad de verificar que el proceso de reunión de dos o más celdas se ha hecho cuidadosamente (sobre todo en lo relativo al alineamiento) y no se ha provocado una violación de las reglas de diseño.

Un paso muy importante para la creación de la máscara general del dado es la aproximación de la geometría de los dispositivos mediante líneas escalonadas. Cualquier línea o trazo en la geometría de los dispositivos que sea diferente de líneas rectas paralelas a los ejes coordenados x y y debe pasar por un proceso de aproximación mediante líneas escalonadas, que es la forma en que el proceso de fabricación tratará los trazos curvos o inclinados.

9.3.10. Formación del dado final

La fase final del desarrollo de la máscara que se enviará a fabricación es la integración de todos los dispositivos en un cuadrado de $1000 \times 1000 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ llamado dado, que en sus bordes debe tener una hilera de pads de contacto útiles para hacer las conexiones de los dispositivos hacia las terminales del encapsulado en dónde se colocará finalmente dicho dado. Para determinar la cantidad de pads útiles, debe tenerse en mente el número de terminales que el encapsulado proporciona, son comunes los empaques DIP de 40 pines y 48 pines.