

Capítol 3 . Disseny d'un MCM-Sensor.

3.1 *Introducció.*

Com ja hem introduït al capítol 1, l'objectiu d'aquest treball és el desenvolupament d'un encapsulat multixip per a un sensor, sistema que a partir d'ara anomenarem MCM-Sensor. Pel disseny d'un MCM-Sensor, en particular per a un sensor d'acceleració, cal endegar tres tasques ben diferenciades: La primera és el disseny de l'acceleròmetre ajustant-lo a les especificacions requerides en la seva aplicació, la segona és la concepció del substrat multixip incloent-hi l'electrònica de lectura pel sensor i per últim, el desenvolupament d'una tècnica *flip-chip* especial per a l'encapsulat de MEMS. Aquesta última és la tasca més novedosa d'aquest treball.

Quant al disseny del sensor, s'han dut a terme una sèrie de simulacions per elements finits per tal d'ajustar el *layout* 2D del sensor als requeriments de rang i sensibilitat. Pel substrat multixip s'han realitzat dues versions: un substrat de test per caracteritzar la tecnologia de muntatge MCM i un substrat CMOS amb una etapa pre-amplificadora pel senyal del sensor. Aquest últim, s'ha dissenyat amb una tecnologia nova al CNM que combina la tecnologia CMOS de doble metall amb la MCM-D. I per últim, s'ha treballat en el desenvolupament de la tècnica *flip-chip* per a MEMS la qual, a la vegada, també es pot subdividir en tres parts: l'adaptació de la tecnologia del sensor, el disseny del marc tancat de soldadura i l'estudi termo-mecànic de l'encapsulat MCM. A continuació passem a descriure aquestes tres sub-tasques.

A nivell de tecnologia de fabricació del sensor, la compatibilització MCM s'ha traduït en l'adaptació dels pads del sensor per fer-los compatibles amb l'encapsulat *flip-chip*. Això consisteix, bàsicament, en la substitució dels pads estàndard dels IC pels pads típics de la tecnologia MCM, anomenats *bump pads*. Es tracta d'uns pads octogonals definits amb un metall soldable, de dimensions i espaiat d'acord amb les regles de disseny de la tecnologia MCM. L'existència de parts mòbils i fràgils a l'estructura dels sensors plantejava un problema d'encapsulat. Aquestes parts mòbils calia protegir-les del procés d'*underfill*, procés estàndard de la tecnologia MCM destinat a incrementar la fiabilitat de les unions *flip-chip* i que consisteix en cobrir tot el mòdul amb un gel de silicona. Per evitar que aquest gel de silicona arribés a les parts mòbils del sensor es va pensar en dissenyar un quadrat tancat semi-hermètic que encerclés tota l'estructura. Aquest tancat estaria format de la mateixa pasta de soldadura amb la qual es realitzen les connexions *flip-chip* i, per tant, es formarien durant el mateix procés. L'arquitectura final del mòdul multixip quedaria doncs com es mostra a la Figura 3.1.

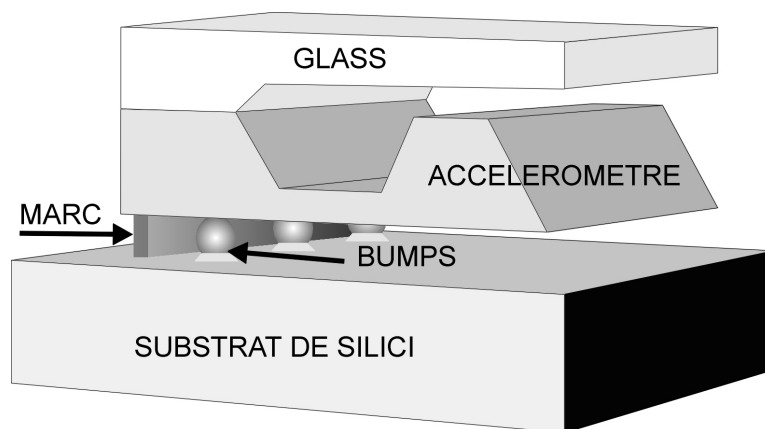


Figura 3.1: Dibuix de l'arquitectura d'un MCM-Sensor.

El tancat de soldadura es definiria a la part exterior de les connexions *flip-chip* i aquestes accedirien a l'exterior a través del substrat multixip. La soldadura de la part exterior del sensor a una oblia de vidre s'ha mantingut dins el procés d'encapsulat com a protecció de l'acceleròmetre durant tot el procés. El disseny d'aquest encapsulat completament tancat aporta robustesa al conjunt a la vegada que facilita la manipulació del sensor en etapes d'encapsulat posteriors com si fos qualsevol altre MCM. Aquesta nova tècnica *flip-chip* pot ser emprada en una gran varietat de sensors o dispositius MEMS [1].

L'existència d'aquest tancat plantejava el problema de l'aparició d'esforços mecànics indesitjats a l'encapsulat MCM, els quals podien afectar el comportament del sensor. Per determinar aquests possibles efectes calia estudiar el procés de fusió de la pasta de soldadura, propi de l'encapsulat *flip-chip*, mitjançant simulacions FEM termo-mecàniques.

En aquest capítol també es descriu el disseny i la simulació del xip de test dedicat a l'estudi i caracterització de totes les etapes del procés d'encapsulat del sensor. Mitjançant simulacions s'ha estudiat la estructura del xip, així com la posició dels elements de test inclosos en aquest. Aquests elements, anomenats *rosettes*, s'utilitzen de forma estàndard en la indústria per a l'estudi dels encapsulats. Les estructures *rosette* també s'han inclòs en el disseny dels sensors per la mesura dels estressos a aquest nivell.

Resumint, les tasques a dur a terme pel desenvolupament d'un MCM-Sensor són: la definició d'un procés tecnològic de fabricació d'acceleròmetres adaptat a l'encapsulat *flip-chip*, l'estudi de viabilitat en la fabricació de cavitats semi-hermètiques que protegeixin les estructures mòbils dels sensors i, per últim, l'estudi de compatibilitat que verifiqui que aquest tipus d'encapsulat no perjudica al comportament elèctric del transductor. Val a dir, que totes aquestes tasques estan fortament interrelacionades i que, per tant, en tots els punts del procés de disseny del MCM s'ha de tenir en compte l'arquitectura multixip i ha d'existir un *feed-back* d'informació entre el disseny del sensor i del substrat, i viceversa.

3.2 Simulació i disseny dels acceleròmetres.

El treball de disseny dels dispositius s'ha realitzat a partir d'uns components ja existents al CNM [2]. S'ha treballat principalment sobre dos dissenys: un acceleròmetre uniaxial amb sistema d'autotest i un acceleròmetre triaxial de doble massa. Malgrat això, requeriments específics sobre sensibilitat i rang ens han dut a redissenyar aquests components modificant alguns dels seus paràmetres geomètrics. L'objectiu era aconseguir optimitzar el comportament d'aquests dispositius, ajustant-los a les especificacions desitjades. Aquest procés de disseny i d'optimització s'ha dut a terme amb l'ajut del simulador d'elements finits ANSYS® a través de simulacions mecàniques, tèrmiques i modals. Aquest software de simulació disposa també d'un mòdul d'optimització, el qual realitza automàticament una sèrie de simulacions variant els paràmetres del model físic, com poden ser les dimensions o les propietats dels materials, per tal d'aconseguir optimitzar el comportament. A continuació descrivim el treball fet amb el simulador ANSYS.

3.2.1 Simulacions per elements finits.

El mètode d'anàlisi per elements finits és una tècnica d'anàlisi numèric que treu profit de l'elevada capacitat de càlcul dels ordinadors actuals. En aquest tipus d'estudi, el model físic es divideix en unitats més petites anomenades elements, connectades entre sí per nodes. Les equacions d'estudi, impossibles de resoldre analíticament en dissenys complexes, es resolen així, sobre una xarxa de nodes interconnectats. Les simulacions per elements finits, a partir d'ara FEM (*Finite Element Modelling*), són una eina d'ús comú a l'hora de dissenyar dispositius micro-electromecànics. També s'utilitzen per predir el comportament termomecànic de l'encapsulat de ICs i els efectes que aquest pot tenir sobre el comportament del sensor. En el cas dels sensors piezoresistius aquest problema adquireix encara més rellevància i interès [3], [4].

□ Simulacions mecàniques.

En les simulacions mecàniques o estructurals es sotmet el dispositiu a forces estàtiques, pressions o acceleracions i s'estudia el desplaçament o els esforços relacionats amb les forces, a través del que s'anomena matriu de rigidesa del sistema. Les magnituds físiques que s'empren en aquest tipus d'anàlisi són les que es mostren a la Taula 3.1.

Una anàlisi modal o freqüencial també és una anàlisi estructural que dona com a resultat les freqüències de vibració naturals del sistema sense considerar l'amortiment.

Material	Propietat	Símbol	Valor	Unitats
Silici	Mòdul de Young (110)	E_{110}	1.69e11	Pa
	Mòdul de Young ($\bar{1}0$)	$E_{\bar{1}0}$	1.69e11	Pa
	Mòdul de Young (100)	E_{100}	1.30e11	Pa
	Coefficient de Poisson (110)(100)	ν	0.2785	
	Coefficient de Poisson (110)($\bar{1}0$)	ν	0.0625	
	Densitat	ρ	2.33e3	Kg/m ³
Pyrex#7740	Mòdul de Young	E	0.66e11	Pa
	Coefficient de Poisson	ν	0.20	
	Densitat	ρ	2.23e3	Kg/m ³
Sn63Pb37	Mòdul de Young	E	36e9	Pa
	Coefficient de Poisson	ν	0.36	
	Densitat	ρ	8.41e3	Kg/m ³

Taula 3.1: Propietats físiques emprades en una anàlisi estructural.

□ **Simulacions termo-mecàniques.**

Un dels objectius de les simulacions termo-mecàniques és estudiar el funcionament del sistema d'autotest integrat als acceleròmetres uniaxials. Aquest sistema empra un element calefactor per escalfar l'estructura i mesura el seu moviment degut a l'expansió tèrmica. Aquest tipus d'estudi requereix de dues simulacions consecutives. Primer, es porta a terme una simulació tèrmica aplicant una certa densitat de potència dissipada al lloc on es troba la resistència calefactora. Com a resultat s'obté la distribució de temperatura a tot el dispositiu un cop s'ha arribat a l'estat estacionari. Aquesta distribució de temperatura, s'utilitza, després, com a punt de partida en la simulació estructural, és a dir, s'estudia com afecta aquesta distribució de temperatura a la estructura física del disseny. Els resultats combinats d'aquestes dues simulacions són els desplaçaments provocats per l'expansió tèrmica del silici degut a la dissipació de calor.

L'altre estudi termo-mecànic realitzat ha estat el del comportament del mòdul MCM durant el procés de soldadura *flip-chip*. Concretament s'ha estudiat l'etapa de refredament del conjunt, un cop per sota la temperatura de fusió de la pasta de soldadura ($T_f = 183^\circ\text{C}$). Per aquest tipus d'estudi es necessita conèixer la conductivitat tèrmica i els coeficients d'expansió tèrmica (CTE) dels materials simulats. Els valors d'aquestes propietats físiques emprades durant les simulacions es recullen a la Taula 3.2.

Material	Propietat	Símbol	Valor	Unitats
Silici	Conductivitat tèrmica	k	150	W/(K·m)
	Coefficient d'expansió tèrmica	α	2.3e-6	K ⁻¹
Pyrex#7740	Conductivitat tèrmica	k	0.96	W/(K·m)
	Coefficient d'expansió tèrmica	α	3.2e-6	K ⁻¹
Sn63Pb37	Conductivitat tèrmica	k	50	W/(K·m)
	Coefficient d'expansió tèrmica	α	24e-6	K ⁻¹

Taula 3.2: Propietats físiques emprades en una anàlisi termo-mecànica.

□ **Mòdul d'optimització d'ANSYS.**

El mòdul d'optimització d'ANSYS és una eina útil per fer un estudi exhaustiu del disseny doncs permet la realització d'un conjunt de simulacions automàtiques ja sigui de forma aleatòria, en escombrat de variables, o mitjançant algun algorisme d'optimització. És en aquesta última utilitat on centrarem aquesta descripció.

Per optimització s'entén trobar el disseny que millor s'ajusti a les especificacions amb la major eficiència (menor pes, menor estrès, etc.) Per aconseguir-ho, el mòdul optimització realitza una sèrie de cicles anàlisi-avaluació-modificació del disseny fins que aconseguix el valor objectiu demanat pel dissenyador. En aquest tipus d'anàlisi s'han de definir tres tipus de variables: les variables independents, o de *disseny*, que poden ser paràmetres geomètrics o propietats físiques dels materials; la *variable objectiu* que es pretén optimitzar i les *variables d'estat* que imposen restriccions al disseny. L'usuari defineix un rang de valors per les variables de *disseny* i, a partir d'un estat inicial, el software realitza iteracions incorporant els resultats de les simulacions en la propera simulació fins que el resultat convergeix a un valor satisfactori o òptim. En general, les tècniques d'optimització es centren en la minimització de la *variable o funció objectiu*.

L'algorisme d'optimització que hem utilitzat en aquest treball és l'anomenat *Subproblem approximation method*. Aquest és un mètode avançat d'ordre zero que treballa només sobre els valors de les variables objectiu i d'estat i no de les seves derivades. El software realitza un ajustament per mínims quadrats de la funció objectiu a una corba, respecte de les variables independents. L'ajustament és quadràtic i incorpora termes creuats amb totes les variables independents. És sobre aquesta corba que el software realitza la minimització. Al final el software proposa “el millor disseny”, és a dir, aquell que ha aconseguit minimitzar la funció objectiu, mantenint-se dintre de les restriccions del disseny.

Per aquest tipus d'estudi el programa treballa amb dos fitxers, un d'ells amb la descripció de la simulació a fer i un altre on es defineixen els detalls del procés d'optimització. En aquest últim es detallen les variables independents que es volen modificar, la variable objectiu i les variables d'estat, variables que constreixen l'estudi a uns límits.

3.2.2 *Acceleròmetre cantilever amb sistema d'autotest.*

El disseny tipus biga suspesa (*cantilever*) va ser el primer disseny emprat com a sensor d'acceleració piezoresistiu l'any 1979 [5]. Amb una elevada sensibilitat i una simplicitat de disseny, continua essent un dels més emprats. L'acceleròmetre *cantilever* amb sistema d'autotest és una variació d'aquest primer disseny [6]. A la Figura 3.2a) es mostra la geometria d'aquest dispositiu, així com la posició de les piezoresistències. Presenta dos punts de subjecció, o punts, i un tercer punt on es situa una resistència calefactora. Aquest tercer punt és el que defineix el sistema d'autotest. La resistència calefactora escalfa l'estructura i provoca un desplaçament de la massa. Aquest desplaçament provocat per l'expansió tèrmica, i no per la presència d'una acceleració, s'empra per testejar el bon funcionament dels elements sensors. Com en qualsevol disseny *cantilever*, els esforços més importants es donen als punts laterals, per tant, és aquí on es col·loquen les piezoresistències sensores. En general, el pont central és més prim i llarg que els dos laterals per tal de localitzar l'escalfament a la zona central del pont. D'aquesta manera es tracta d'evitar un augment de temperatura de les piezoresistències, doncs presenten una alta sensibilitat a la temperatura.

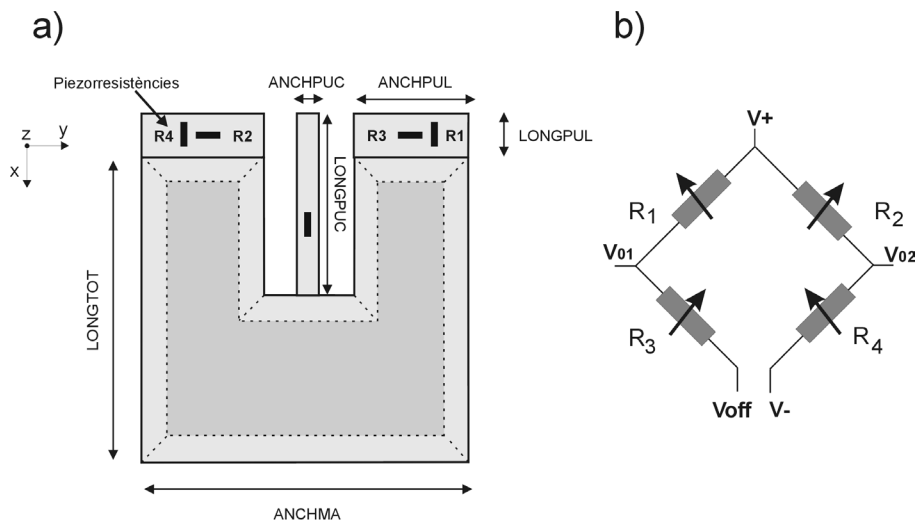


Figura 3.2: a) Disseny i paràmetres geomètrics més importants per l'acceleròmetre tipus *cantilever* amb sistema d'autotest, b) Esquema del pont de *Wheatstone* implementat al sensor.

La Figura 3.2.b) és un esquema elèctric del pont de *Wheatstone* implementat amb les piezoresistències dels ponts laterals. El pont no es va tancar completament a nivell de dau per fer servir una de les sortides per controlar l'offset del sensor.

En el cas de l'acceleròmetre tipus *cantilever* amb un únic pont, les equacions analítiques que descriuen el seu comportament són relativament senzilles d'extreure. Per aquest disseny de dos ponts i sistema d'autotest no existeixen equacions analítiques que el descriguin, per tant, per conèixer el seu comportament i obtenir dades com la sensibilitat, les sensibilitats creuades o la freqüència de ressonància, l'estudi FEM es fa imprescindible.

Com ja hem dit a la introducció, l'objectiu del treball sota simulador estructural és l'obtenció de nous dissenys amb uns valors de sensibilitat ajustats a les especificacions requerides. Els dissenys que es volien aconseguir i els seus objectius eren els següents:

Disseny D2U-2.5g	Màxima sensibilitat en el rang de 2.5g
Disseny D2U-1.5g	Màxima sensibilitat en el rang de 1.5g
Disseny D2U-10g	Màxim recorregut en el rang de 10g

El model físic de l'acceleròmetre es va introduir al simulador d'elements finits ANSYS i es va mallar amb elements estructurals 3D SOLID45, els quals tenen 8 nodes, un a cada vèrtex del cub. Les variables o paràmetres geomètrics amb més rellevància en el comportament del sensor són les que s'indiquen a la Figura 3.2.a). Aquestes variables són: l'amplada de la massa (*anchma*), la longitud de la massa (*longtot*), l'amplada i la longitud del pont lateral (*anchpul* i *longpul*) i la longitud del pont central (*longpuc*). Altres paràmetres de la geometria del sensor com el gruix dels ponts o de la massa vénen fixats per les oblies base amb les quals es treballa i, per tant, no van ser objecte de modificació.

Abans, però, d'iniciar un estudi d'optimització, és recomanable tenir una visió general del comportament de les variables en el rang d'estudi. Un possible error del procés d'optimització és que doni com a resultat un mínim local enlloc d'un mínim global, per això és interessant fer un estudi previ del sistema i buscar un bon punt de partida. Un tipus d'anàlisi que permet tenir una visió global del comportament del sistema i avaluar quines són les variables que més hi influeixen és el conegut com anàlisi factorial.

□ Disseny Factorial.

El disseny factorial permet determinar la relació entre les diferents variables independents i la variable resposta, amb la diferència respecte els mètodes clàssics en que és capaç de descobrir interaccions entre les diferents variables. A les variables independents que intervenen en l'anàlisi a partir d'ara les anomenarem factors. Així, un anàlisi factorial consistirà en decidir quants estudis es realitzaran i a quins valors es fixaran els diferents factors que hi intervenen. A aquests valors se'ls acostuma a anomenar nivells. El disseny factorial presenta en cada experiment una combinació dels nivells de tots els factors que es creu influeixen la variable resposta estudiada.

Les interaccions entre factors són la quantificació de la influència conjunta de dos o més factors de manera que la variable resposta no es comportarà de la mateixa manera al variar un factor sinó que dependrà del valor que tinguin els altres amb els quals interacciona. Això cal diferenciar-ho bé del fet de la independència entre variables. Suposem la variable resposta Y lligada a dues variables X de la següent manera:

$$Y = X_1 + 3X_2 - 1.5X_1X_2$$

La influència de la variació de la variable X_1 sobre Y depèn del valor que agafi X_2 . El coeficient -1.5 representa l'efecte o interacció d'ambdós factors sobre la resposta. Els altres coeficients, corresponents als factors X_1 i X_2 per separat, són els anomenats efectes principals.

La superfície resposta pot ser modelada per un polinomi de primer grau, de segon o de grau superior. Per a calcular els coeficients d'aquest polinomi, és a dir, tant els efectes principals com les interaccions, cal introduir, en primer lloc, la nomenclatura més emprada en l'anàlisi factorial a dos nivells. Aquesta nomenclatura consisteix a assignar un signe -1 al nivell d'actuació més baix i un signe $+1$ al més alt. Això es fa per a cada factor que intervé en l'anàlisi factorial. Així, l'efecte principal d'un factor serà l'efecte promig que sobre la variable resposta produeixi el canvi del nivell -1 al $+1$. L'efecte d'interacció entre dos factors es calcula fent la diferència entre l'efecte de variar un dels factors quan l'altre està al nivell $+1$ i l'efecte de variar-lo quan està al nivell -1 . Cal afegir que no només pot haver-hi interaccions de segon grau, entre dos factors, sinó d'ordre superior, encara que, habitualment, en els problemes reals no solen aparèixer amb gaire freqüència.

Així doncs, el que volem determinar és la importància relativa de cadascuna de les variables que tenim sobre la funció de sortida. Vegem però primer quins factors hem tingut en compte i quines respostes de sortida volíem optimitzar.

Com a variables hem triat quatre factors que són: longitud del pont lateral (*longpul*), l'amplada de la massa (*anchma*), la longitud de la massa (*longtot*) i l'amplada del pont lateral (*anchpul*). I com a respostes a estudiar hem triat el desplaçament màxim de la massa (*umax*)

i la sensibilitat del pont de *Wheatstone* (*sens*). La sensibilitat del pont s'extreu a partir dels esforços mecànics i dels valors dels coeficients piezoresistius segons la relació A.16 de l'annex A. A aquesta equació se li aplica un factor de correcció de 0.7 pel dopatge emprat en la nostra tecnologia. (En el nostre cas, tenim piezoresistències de tipus p amb una concentració a la superfície de 10^{19}cm^{-3}). La relació A.16 queda com:

$$S = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta g} \cdot \frac{1}{V_{DD}} = 0.7(71.8 \cdot \sigma_l - 66.3 \cdot \sigma_t) \cdot 10^{-11} \quad (3.1)$$

La Taula 3.3 mostra els valors dels coeficients per a cadascun dels factors emprats a les simulacions. Amb aquests valors s'han fet les 16 simulacions corresponents a un disseny factorial complet. Els resultats dels efectes principals i de les interaccions es mostren a la Taula 3.4:

Factor		+1	-1
1	Longpul [μm]	400	200
2	Anchma [μm]	3000	2300
3	Longtot [μm]	300	150
4	Anchpul [μm]	1000	900

Taula 3.3: Factors emprats en el disseny factorial i valors assignats a cadascun dels nivells.

Coeficients		Sens ($\cdot 10^{-2}$)	Umax ($\cdot 10^{-7}$)
Efectes principals	1	-3.28	3.37
	2	-6.45	0.96
	3	-4.71	0.96
	4	1.76	-0.26
Efectes de segon ordre	12	-0.26	0.35
	13	-0.15	0.34
	14	0.05	-0.09
	23	-0.70	0.13
	24	0.33	-0.05
	34	0.24	-0.04

Taula 3.4: Resultats dels coeficients principals i de segon ordre per a un disseny factorial complet.

De l'anàlisi de la Taula 3.4 s'extreu que per a *Umax* hi ha un efecte principal molt significatiu que és la longitud del pont lateral, mentre que l'amplada de la massa i la longitud total són menys importants. L'amplada del pont és molt poc important i a més presenta una contribució de signe contrari a les altres variables, quan ella creix la variable *Umax* disminueix. Quant a les interaccions de segon ordre podem subratllar com a relativament importants la 12, i la 13, ja que són més importants que l'efecte principal 4. Aquests coeficients corresponen a les interaccions entre la variable *longpul* i la variable *anchma* i *longtot* respectivament. Les interaccions de tercer ordre no les hem incloses a la taula perquè son menyspreables. Per a la variable *Sens* els efectes principals importants són 2 i 3 i una

mica menys 1 i 4. Quant a les interaccions de segon ordre, contràriament al que succeïa amb la variable U_{max} , cap té un pes més gran que les interaccions de primer ordre. Així i tot, destaquem com a més significativa la interacció entre la longitud i l'amplada de la massa.

Es fa notar, que els factors que més pes tenen en la sensibilitat o en el desplaçament màxim no coincideixen. Del resultat d'aquest estudi vam poder comprovar que el desplaçament i la sensibilitat no estan directament relacionats, sinó que d'altres factors com l'amplada del dispositiu o l'amplada dels ponts laterals afecta de manera important a la sensibilitat. La poca influència dels termes creuats en la sensibilitat ens permet considerar el model lineal de primer ordre. Això ens va permetre realitzar una sèrie d'escombrats per cadascuna de les variables per separat. Els valors quantitius que es van obtenir es mostren a les figures següents.

Estat inicial: $Anchma = 2300\mu m$
 $Anchpul = 1000\mu m$
 $Longpul = 200\mu m$
 $Longtot = 2250\mu m$
 $Sensibilitat = 0.264mV/V*g$

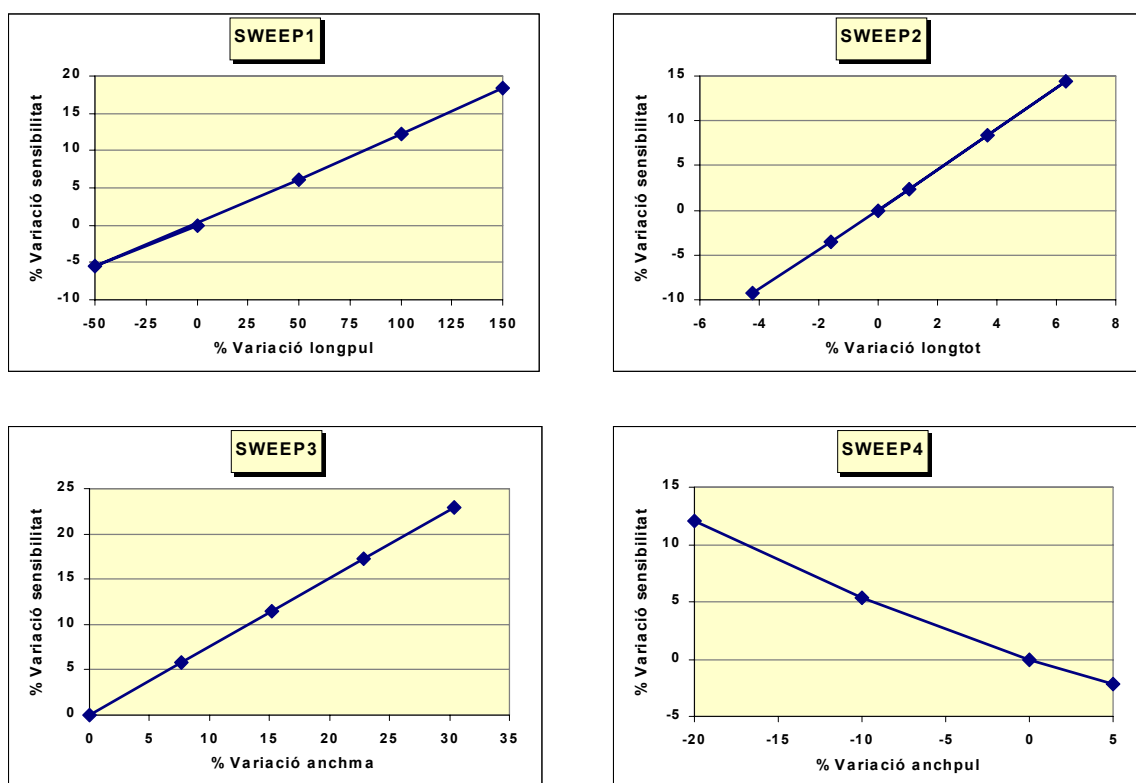


Figura 3.3: Resultats de la variació en la sensibilitat per l'escombrat de les variables, a) longitud dels ponts laterals, b) longitud total de la massa, c) amplada de la massa, d) amplada dels ponts laterals

Dels resultats dels escombrats de cadascuna de les variables per separat que es mostren a la Figura 3.3 s'extreu que la variable que afecta més al resultat és la longitud del dispositiu, ja que aporta molta massa a aquest. La variació de l'amplada dels ponts, mantenint l'ample del dispositiu fix, és molt interessant ja que també afecten de manera important a la sensibilitat. Com a resum dels resultats es pot decidir que per augmentar la sensibilitat s'ha

d'augmentar la massa i la llargada del pont, a la vegada que es redueix la seva amplada. D'aquests resultats inicials es va passar ja a la utilització del mòdul d'ANSYS per l'optimització.

□ **Optimització del disseny.**

Com hem explicat a la introducció, el procés d'optimització treballa sobre la variable objectiu tractant de minimitzar (maximitzar) el seu valor. En el nostre cas la variable a maximitzar era la sensibilitat del pont. Per aquesta anàlisi es van imposar unes condicions de contorn o restriccions físiques del disseny. Aquestes van ser: una mida màxima del xip, una amplada mínima dels ponts laterals de 900µm que venia recomanada per les normes de disseny, i una màxima deflexió de 2µm de la massa, ja que aquest és el recorregut màxim que poden fer aquests dispositius dotats d'estructures de protecció. Aquesta darrera restricció no la vam implementar en l'estudi del Disseny D2U-10g perquè es tractava de trobar un dispositiu de màxim recorregut i màxima sensibilitat. Per aconseguir-ho, calia doncs lliurar-lo de les estructures de protecció que limitaven el seu recorregut. Les dimensions físiques dels dissenys obtinguts del procés d'optimització es mostren a la Taula 3.5.

Variables [µm]	Longpuc	Anchpul	Anchma	Longpul	Longtot	Desplaçament
D2U-2.5g	1600	1000	3000	300	2700	0.69
D2U-1.5g	1500	950	2900	400	2900	1.27
D2U-10g	1400	900	3400	500	3400	3.42

Taula 3.5: Recull dels resultats del procés d'optimització realitzat amb acceleròmetre cantilever amb sistema d'autotest.

A continuació es mostren els resultats obtinguts de les simulacions mecàniques pel disseny D2U-2.5g.

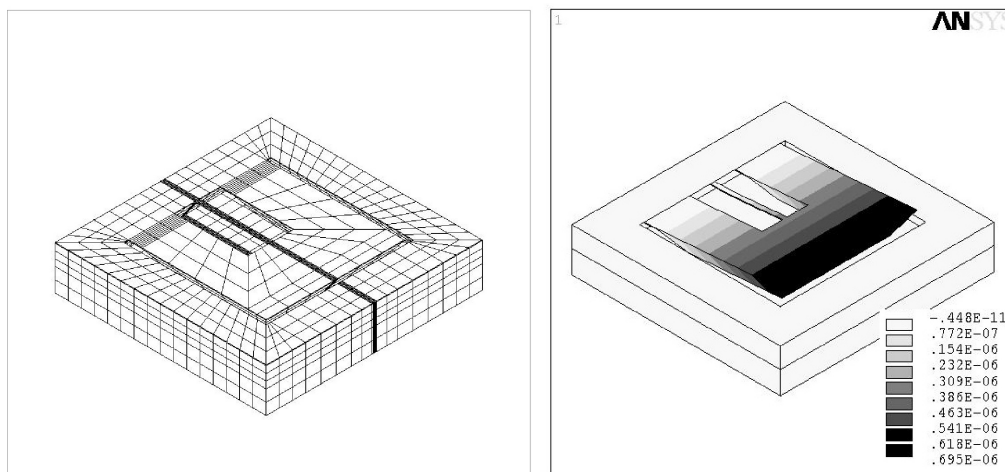


Figura 3.4: Dibuix del mallat del disseny uniaxial i desplaçament en la direcció z, en metres, pel disseny D2U-2.5g.

La Figura 3.4a) mostra el model físic introduït al simulador. S'observa com el nivell de mallat és més dens als ponts laterals on es dona el màxim d'estrès. La Figura 3.4b) és el resultat pel desplaçament corresponent a una acceleració d'1g en la direcció z perpendicular

al pla del dispositiu. Es pot veure com el desplaçament té un màxim en l'extrem més exterior de la massa. Si realitzem un perfil de la variació de la sensibilitat al llarg d'un dels ponts laterals obtenim la gràfica de la Figura 3.5

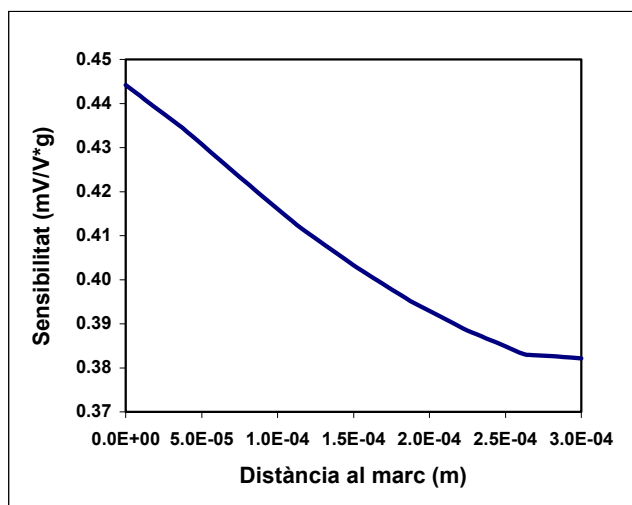


Figura 3.5: Variació de la sensibilitat en un pont lateral en funció de la distància al punt d'anclatge.

Es comprova com la màxima sensibilitat, corresponent al màxim d'esforços mecànics, es dona a l'extrem més proper al marc, o punt d'ancoratge, i disminueix conforme augmenta la distància al marc. Les piezoresistències es col·loquen a una distància de 50 μ m, per estar el més proper possible al màxim de sensibilitat però en una regió on els esforços siguin més uniformes. El valor de la sensibilitat creuada, o sensibilitat a les altres components de l'acceleració que no són la d'estudi, és un paràmetre important per definir el comportament d'un acceleròmetre. Per a determinar el valor de les sensibilitats creuades, s'han realitzat simulacions per acceleracions en els eixos x i y. La Taula 3.6 és un recull dels resultats obtinguts de les simulacions mecàniques pels tres dissenys resultants del procés d'optimització.

		Sl [MPa/g]	St [MPa/g]	Sens [mV/V·g]	Zmax [μ m/g]
D2U-2.5g	Direcció z	1.14	0.31	0.43	0.69
	Direcció y	0.022	6.8e-3	0.0078	2.74e-4
	Direcció x	0.118	0.032	0.044	0.075
D2U-1.5g	Direcció z	1.47	0.39	0.56	1.27
	Direcció y	0.032	8.0e-3	0.019	7.3e-4
	Direcció x	0.14	0.038	0.052	0.128
D2U-10g	Direcció z	2.71	0.729	1.03	3.42
	Direcció y	0.047	0.012	0.018	1.69e-3
	Direcció x	0.225	0.061	0.084	0.3

Taula 3.6: Valors de tensions que es donen a nivell del pont, tant longitudinal (Sl) com transversal (St), sensibilitat del pont de Wheatstone (Sens) i desplaçament màxim en la direcció z patit per la massa (Zmax).

Els valors d'esforços de la Taula 3.6 són valors obtinguts de les simulacions per a un punt situat a 50µm de l'extrem del pont. Com s'extreu de la Taula 3.6, la sensibilitat creuada amb l'eix x és la més important amb uns valors de 10.3%, 9.3% i 8.2% respectivament. Aquesta elevada sensibilitat creuada en la direcció x és coneguda en els acceleròmetres tipus *cantilever* [7]. S'anomena l'efecte tridimensional i està relacionat amb l'asimetria de la massa en la direcció z. Aquesta asimetria situa el centre de masses de la massa per sota del centre de masses del pont i del pla del component, en definitiva. Això provoca un moment que desplaça la massa per intentar alinear tots dos centres de masses i aquest desplaçament és el causant d'un senyal a la sortida. Aquest moment és inversament proporcional a la longitud de la massa i per això el valor de la sensibilitat creuada disminueix per D2U-10g respecte D2U-2.5g, i D2U-1.5g. Aquest efecte pot ser compensat adequadament inclinant una mica els sensors en el moment del muntatge, però això pot ser de gran dificultat.

□ Optimització del sistema d'autotest.

El sistema d'autotest també va ser objecte d'optimització. Pel disseny D2U-2.5g es va calcular el valor de la resistència d'escalfament de manera que alimentada a tensió constant provoqués un desplaçament, per expansió tèrmica, equivalent a l'acció d'1g d'acceleració. Aquest estudi es pot fer mitjançant un anàlisi combinat de simulació tèrmica i mecànica. El primer proporciona una distribució de temperatura deguda a la dissipació tèrmica de la resistència. Seguidament es realitza la simulació estructural la qual tindrà la distribució de temperatures obtinguda de l'anàlisi tèrmic com a càrrega inicial.

A la Figura 3.6.a) es pot veure el resultat de la simulació tèrmica per a una alimentació de la resistència calefactora de 5 Volts. La distribució de temperatura està molt confinada al pont central on arriba a assolir valors de 89°C ($T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$), mentre que a la regió dels ponts laterals on es troben les piezoresistències sensores la temperatura no supera els 24°C.

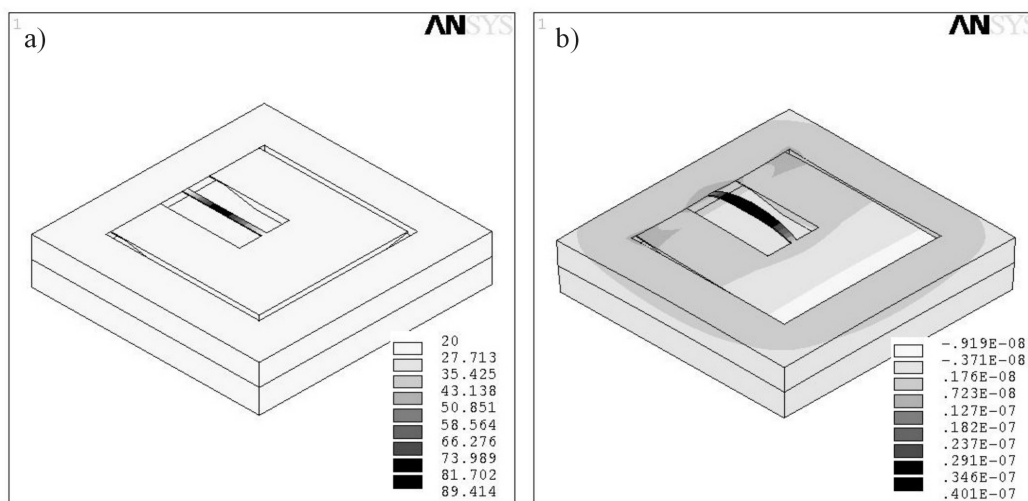


Figura 3.6: Resultats de les simulacions pel disseny D2U-2.5g. a) Distribució de temperatura (°C) per una alimentació constant de 5V b) Desplaçament provocat per la distribució de temperatura (m).

La Figura 3.6.b) mostra el desplaçament provocat per l'expansió tèrmica pel disseny D2U-2.5g. Els valors màxims es donen al pont central i la sensibilitat obtinguda als ponts

lateral és de $0.44\text{mV/V}\cdot\text{g}$, molt semblant al valor corresponent al de l'acció d'una acceleració d'1g.

Com s'extreu de la Taula 3.5, la longitud del pont central també és un factor que influeix en la sensibilitat. Quant més curta és aquesta dimensió millora la sensibilitat del dispositiu però a costa d'un augment de la temperatura que s'assoleix als ponts on es troben les piezoresistències. Aquest fet va fer que no es volgués reduir encara més aquestes dimensions ja que com s'explica en l'annex A les piezoresistències són sensibles a les variacions de temperatura.

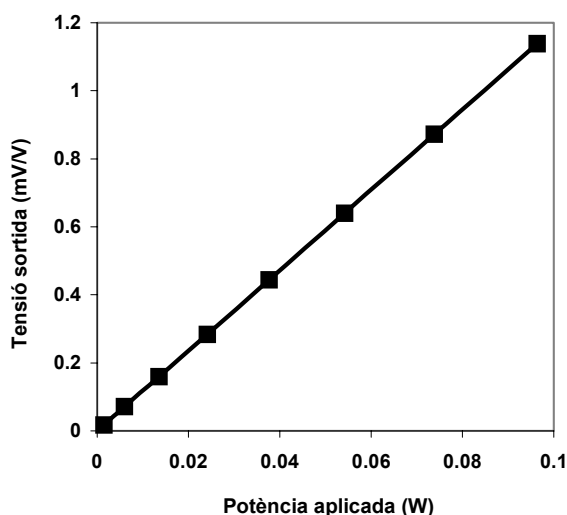


Figura 3.7: Variació de la sortida del sensor en funció de la potència aplicada a la resistència calefactors. (Disseny D2U-2.5g)

La Figura 3.7 mostra els valors de la tensió a la sortida del pont en funció de la potència aplicada a la resistència. La resistència calefactors implantada té un valor de 664Ω , per tant, una alimentació de 5Volts correspon a una potència de 37mW. Com és evident, a més potència dissipada més elevada serà la temperatura associada al pont i més important la dilatació tèrmica. S'observa que la relació de la potència dissipada amb el senyal de sortida és perfectament lineal, en aquests nivells de temperatura.

□ Freqüències de ressonància.

Un altre estudi que es pot realitzar mitjançant elements finits, és l'anàlisi modal dels dissenys. Aquest estudi permet l'obtenció dels modes de vibració de l'estructura i en conseqüència de la freqüència de ressonància. La freqüència de ressonància és una dada important del comportament del sensor doncs limita el seu funcionament en dinàmic. Però l'estudi dels modes de vibració també pot donar molta informació quant a la situació d'estrès del sensor ja que l'estrès pot afectar a la constant de rigidesa del sistema i, per tant, a la freqüència de ressonància tal i com s'extreu de l'equació 2.2 del capítol 2. Un altre factor relacionat amb el comportament dinàmic d'aquestes estructures és l'esmoreïment del dispositiu. A l'encapsulat MCM que nosaltres proposem el sensor es troba completament tancat entre el vidre a la cara inferior i el substrat MCM a la cara superior. De manera que es preveu un fort esmoreïment del sistema oscil·lador i en conseqüència una variació de la freqüència de ressonància. A partir de l'obtenció de les freqüències de ressonància pel sistema lliure podem deduir, en comparació amb els resultats experimentals, el valor de

l'esmoreïment patit per l'acceleròmetre. Els resultats de l'anàlisi modal pels dissenys sense esmoreïment es mostren a la Taula 3.7, on es recullen els valors de les freqüències pels tres primers modes de vibració.

Freqüència [Hz]	D2U-2.5g	D2U-1.5g	D2U-10g
Mode 1	720	533	326
Mode 2	16924	10840	6845
Mode 3	37714	23767	14319

Taula 3.7: Freqüències dels tres primers modes de vibració dels acceleròmetres tipus cantilever.

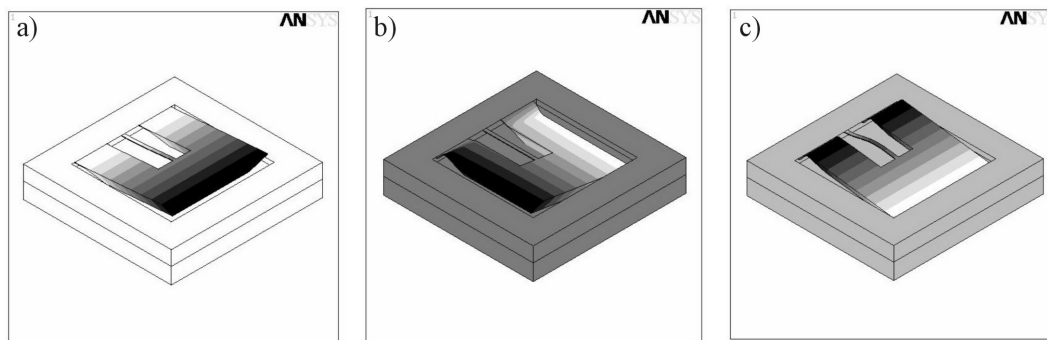


Figura 3.8: Tres primers modes de vibració pel disseny D2U-2.5g.

La Figura 3.8 mostra el desplaçament en z pels tres primers modes de vibració pel disseny D2U-2.5g. Com es veu el primer mode de vibració correspon a l'aplicació d'una acceleració en z.

3.2.3 Acceleròmetre triaxial.

Aquest acceleròmetre és un disseny amb dues masses i un total de 6 ponts, dos centrals i quatre laterals. El seu disseny permet la mesura de l'acceleració en els tres eixos. Als ponts centrals es situen les piezoresistències dedicades a la detecció de l'acceleració en l'eix perpendicular a les masses, a partir d'ara, eix z. Les piezoresistències col·locades als ponts laterals permeten la mesura de les acceleracions que es donen en el pla de les masses, és a dir, les direccions x i y. La Figura 3.9 és un dibuix d'aquest tipus de dispositiu, on es poden veure els dos ponts centrals i els quatre laterals. També es mostra la posició de les piezoresistències que posteriorment s'implementaran en ponts de *Wheatstone*.

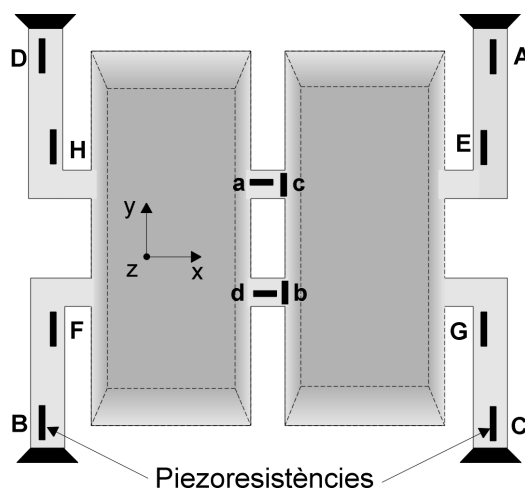


Figura 3.9: Acceleròmetre triaxial tipus doble massa. Distribució de les piezoresistències i convenció de les direccions utilitzades.

La sensibilitat d'aquest tipus de disseny és molt alta per les acceleracions en la direcció z , mentre que per les altres dues direccions sol ser entre quatre i cinc cops més baixa. Una altra característica significativa és que el pont central gairebé no pateix esforços mecànics davant d'acceleracions en el pla del component. Al contrari succeeix amb els ponts laterals, els quals són molt sensibles a l'acceleració en z i pateixen estressos molt importants també en aquesta direcció. Això es tradueix en una sensibilitat creuada molt elevada que és molt negativa pel funcionament del sensor. El treball d'optimització sobre aquests dissenys es va centrar en reduir aquests valors de sensibilitat creuada mantenint uns valors d'esforços mecànics detectables i unes dimensions de xip raonables.

Així doncs, sobre el disseny triaxial es va treballar en tres variants:

- **Disseny 1.** Aquest disseny té implementats dos ponts de *Wheatstone*; el format per les resistències **a, b, c, d** dedicat a la detecció de les acceleracions en l'eix z i el format per les piezoresistències **A, B, C, D** per les acceleracions del pla x - y .
- **Disseny 2.** Aquest disseny presenta modificacions geomètriques respecte del Disseny 1 adreçades a reduir la sensibilitat creuada dels ponts laterals. Té implementat els mateixos dos ponts de *Wheatstone* que el Disseny 1.
- **Disseny 3.** Disseny geomètricament idèntic al Disseny 1 però amb quatre piezoresistències extres **E, F, G, H** adreçades a la mesura de la sensibilitat en la direcció y per separat.

A continuació descriurem cadascun d'aquests dissenys, el treball d'optimització realitzat sobre ells i donarem els resultats obtinguts a partir de les simulacions FEM.

□ **Disseny 1: Triaxial.**

Com en el cas dels acceleròmetres uniaxials per analitzar el comportament d'aquests dispositius es va dur a terme un treball de simulació amb elements finits per conèixer, en l'etapa de disseny, els valors dels esforços mecànics i de la sensibilitat esperada. En les simulacions mecàniques es va aplicar consecutivament valors de $1g$ en la direcció z , x i y .

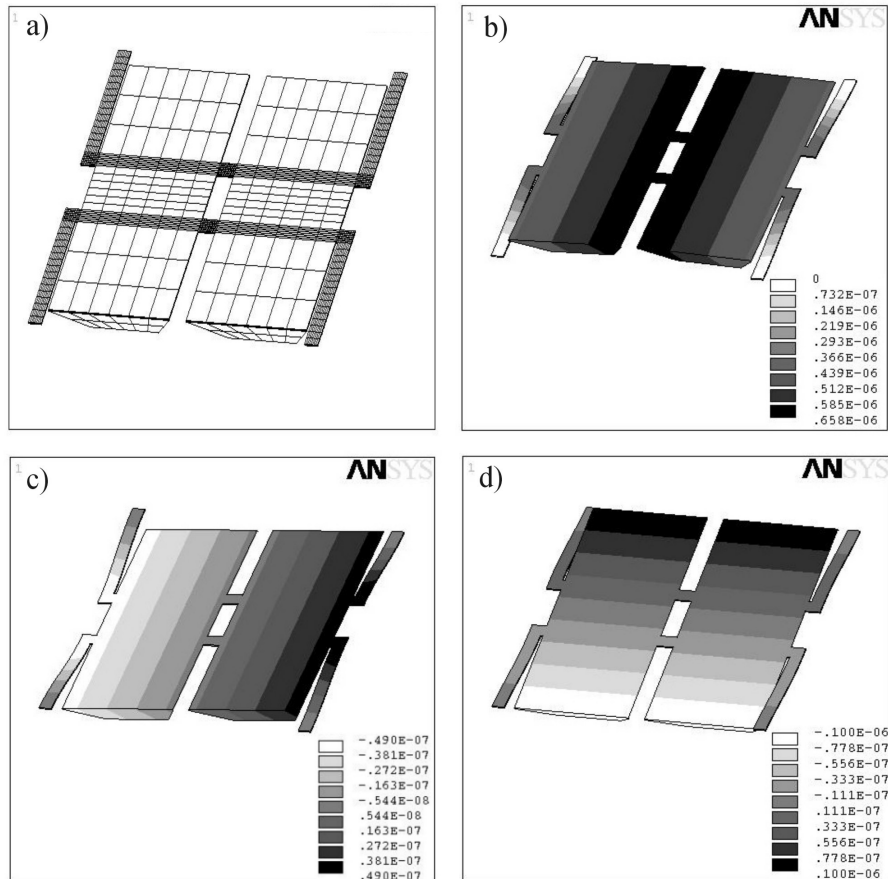


Figura 3.10: Resultats de la simulació mecànica pel disseny triaxial. a) Mallat de la estructura, b), c), d) Desplaçaments en l'eix z de la massa (en metres) quan es sotmesa a acceleracions en els eixos z, x i y, respectivament.

El model mallat de l'acceleròmetre i el resultat pels desplaçaments obtinguts de les simulacions es mostren a la Figura 3.10. S'observa que el pont central només es deforma en presència d'acceleració z, mentre que per les acceleracions en els eixos x i y es manté pla i per tant, en aquest casos, no donarà una tensió de sortida en el pont de *Wheatstone*. Els valors d'esforços mecànics, al pont central, només són importants en la direcció x ($S_x \approx 2\text{MPa}$), mentre que en la direcció y són gairebé menyspreables. En la Figura 3.10.b) s'observa la naturalesa de la sensibilitat creuada. Els ponts laterals es deformen amb l'acceleració en z i en conseqüència pateixen d'estressos que donen un senyal a la sortida en forma d'offset i de sensibilitat creuada.

La Taula 3.8 recull el comportament de les vuit piezoresistències implementades, enfront les tres components de l'acceleració. El signe més fa referència a que el seu valor augmenta i el signe menys a que disminueixen, les caselles no omplertes fan referència a que no hi ha variació apreciable. Veiem que per l'acceleració en z, les piezoresistències **A**, **B**, **C** i **D** es comporten totes de la mateixa manera i amb un nivell d'esforços similars. Si totes les resistències d'un pont de *Wheatstone* varien el mateix valor, a la sortida del pont hi ha un valor nul. El problema apareix amb el *mismatching* de les piezoresistències que formen el pont, llavors un mateix esforç mecànic es correspon amb variacions diferents per les resistències fet que provoca una tensió d'offset a la sortida del pont.

	Pont z				Pont x-y			
	Ra	Rb	Rc	Rd	RA	RB	RC	RD
Acceleració z	+++	---	---	+++	---	---	---	---
Acceleració x					--	++	--	++
Acceleració y					++	--	--	++

Taula 3.8: Variació de les piezoresistències pels dissenys 1 i 2 en presència de les tres components de l'acceleració. Les caselles buides, indiquen que la variació és molt petita.

S'observa també que **A, B, C i D** són sensibles a la presència d'acceleracions tant en la direcció *x* com en la direcció *y*. Per poder detectar una o altre component de l'acceleració per separat, cal configurar-les de forma diferent en el pont de *Wheatstone*, tal i com es mostra a la Figura 3.11. Com es veu, les resistències **C i D** s'intercanvien per detectar una o altre component de les acceleracions en el pla *x-y*.

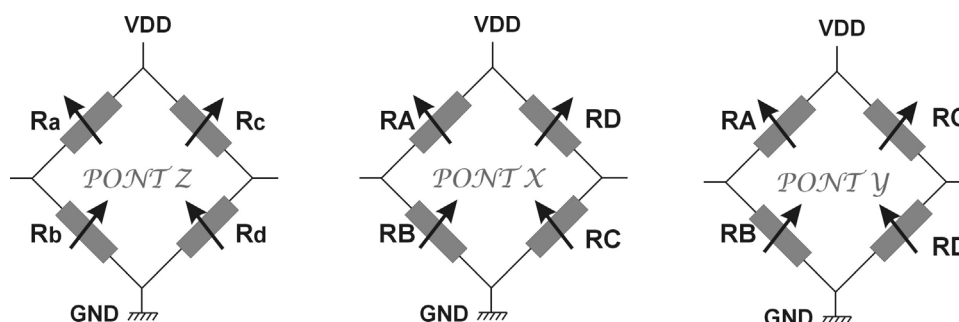


Figura 3.11: Configuració de les piezoresistències en ponts de *Wheatstone* per la detecció de les tres components de l'acceleració pel disseny Triaxial.

A partir dels valors dels esforços mecànics vam calcular el valor de la sensibilitat pels diferents ponts de *Wheatstone* amb l'expressió (3.1). Pels ponts centrals es va utilitzar un punt situat al centre del pont, i en el cas dels laterals va ser un punt situat a $80\mu\text{m}$ respecte el punt d'ancoratge al marc. Els valors de les sensibilitats pels diferents ponts van ser:

Sensibilitat en la direcció z: $0.917\text{mV/V}\cdot\text{g}$

Sensibilitat en la direcció x: $0.169\text{mV/V}\cdot\text{g}$

Sensibilitat en la direcció y: $0.101\text{mV/V}\cdot\text{g}$

□ Disseny 2: Triaxial optimitzat.

Del treball anterior vam veure que el problema més important provenia de que els ponts laterals pateixen d'un esforç mecànic molt elevat per acceleracions en *z* i, per tant, la sensibilitat creuada per aquesta direcció podria arribar a ser molt elevada dificultant la mesura en els eixos *x* i *y*. Això és molt perjudicial pel comportament d'un sensor més si es té en compte les baixes sensibilitats dels ponts laterals. Fent ús del mòdul d'optimització, es va treballar en la millora de les dimensions geomètriques del component adreçada a la reducció de les sensibilitats creuades.

Les variables que més afecten al comportament de la sensibilitat dels ponts laterals són l'amplada i la llargària d'aquests ponts, així doncs, aquestes van ser utilitzades com variables de disseny en aquest procés d'optimització. Com a variable d'estudi es va emprar la raó entre els estressos longitudinals per les acceleracions en x e y i els provocats per acceleracions en z. Es tractava de maximitzar aquest número, bé fent l'estrès degut a z més petit o l'estrès degut a x, y més gran. Es va escollir l'estrès en la direcció longitudinal als ponts (direcció y) degut a que sempre és més important que el valor transversal. Les variables d'estat o condicions de contorn van tornar ser les mateixes que pel cas uniaxial, una deflexió màxima de la massa de $2\mu\text{m}$ i una mida màxima de xip.

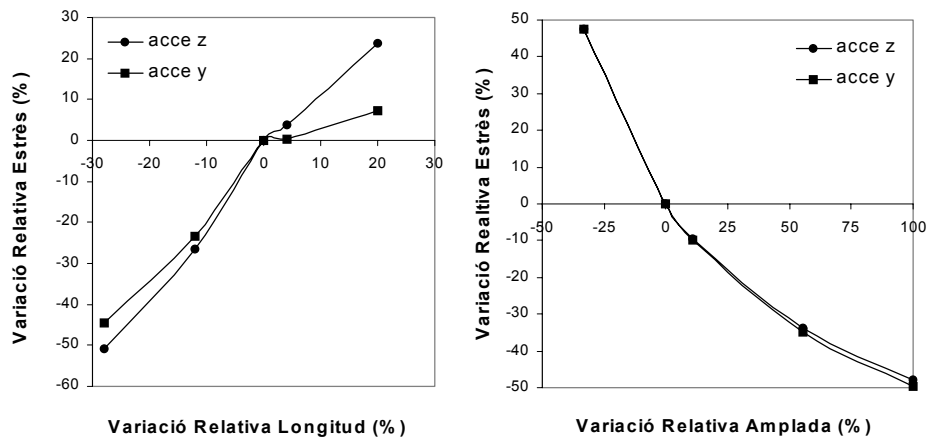


Figura 3.12: Variació relativa dels esforços longitudinals per les acceleracions en z i y respecte la longitud i l'amplada dels ponts laterals.

El procés d'optimització en aquest cas no va resultar tant satisfactori doncs encara que sí que es van aconseguir dissenys amb uns valors de sensibilitat creuada menors, aquests s'aconseguien reduint els valors absoluts dels esforços mecànics, cosa que fa reduir la sensibilitat global del dispositiu. A la Figura 3.12 es veu el comportament dels estressos longitudinals quan es fa variar la longitud i l'amplada dels ponts laterals. Es mostren només els resultats de les acceleracions en z i en y perquè els valors per l'acceleració en y són els més baixos i, per tant, els que interessa més augmentar. Modificar l'amplada dels ponts no produïa cap resultat beneficiós doncs tant els estressos per l'acceleració en z com per la direcció en y varien d'igual forma i, per tant, la relació entre ells es manté. En canvi, la variació de la longitud del pont sí que fa variar els estressos de forma diferent. Quan es disminueix la longitud els estressos, per l'acceleració en z disminueixen més que no els de la direcció y arribant a una diferència del 18% per una reducció de la longitud del 28%. Es va decidir que hi havia un valor mínim de sensibilitat que es podia detectar (al voltant de 0.1MPa) i per tant el disseny va quedar modificat només en una reducció de la llargària dels ponts laterals. Aquests van passar de $1250\mu\text{m}$ a $800\mu\text{m}$. L'amplada dels ponts es va mantenir a $150\mu\text{m}$. En aquest disseny els ponts de *Wheatstone* implementats han estat els mateixos que en el cas del disseny triaxial. Els desplaçaments de la massa per aquest disseny obtinguts amb les simulacions es mostren a la Figura 3.13.

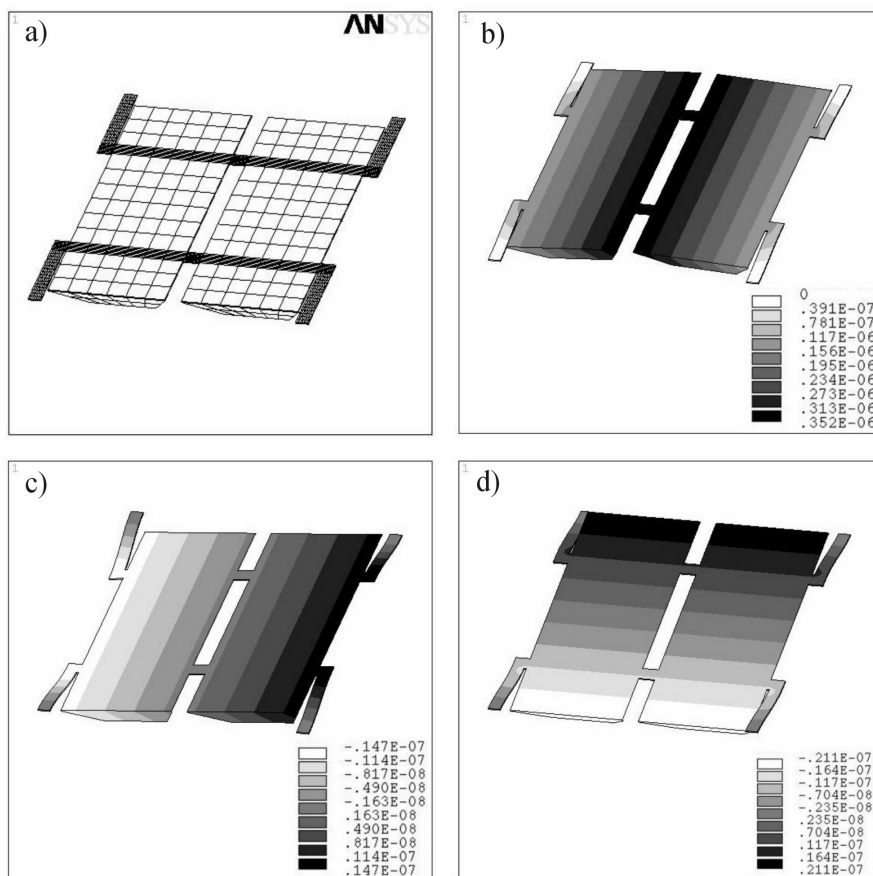


Figura 3.13: Resultats de la simulació mecànica pel disseny triaxial optimitzat. a) Mallat de l'estructura, b), c), d) Desplaçaments en l'eix z de la massa, en metres, quan sotmesa acceleracions en els eixos z, x i y, respectivament.

Pel disseny triaxial optimitzat, les sensibilitats obtingudes són les que es mostren a continuació. El valor per la direcció z, s'ha mantingut gairebé igual, només amb una petita reducció, mentre que els valors per les direccions x i y han disminuït considerablement.

Sensibilitat en la direcció z: $0.917\text{mV/V}\cdot\text{g}$

Sensibilitat en la direcció x: $0.095\text{mV/V}\cdot\text{g}$

Sensibilitat en la direcció y: $0.069\text{mV/V}\cdot\text{g}$

□ Disseny 3: Triaxial_8res.

De l'estudi dels estressos als ponts laterals pel Disseny 1 i 2 es va observar que la distribució dels estressos permetia la col·locació d'altres quatre piezoresistències per implementar un tercer pont de *Wheatstone*. Un estudi previ indicava que hi havia diferents llocs adequats per la col·locació de les piezoresistències. Es tractava, doncs, de decidir quin era el millor lloc per col·locar les piezoresistències i quina configuració era l'adequada per cadascuna de les components de l'acceleració en el pla. La geometria d'aquests dissenys es va escollir igual a la del disseny Triaxial del qual ja havíem realitzat les simulacions mecàniques. La Figura 3.14 ens mostra la distribució de l'estrès longitudinal (S_y) sobre un dels ponts laterals per l'acció de les acceleracions en, z, x i y, respectivament.

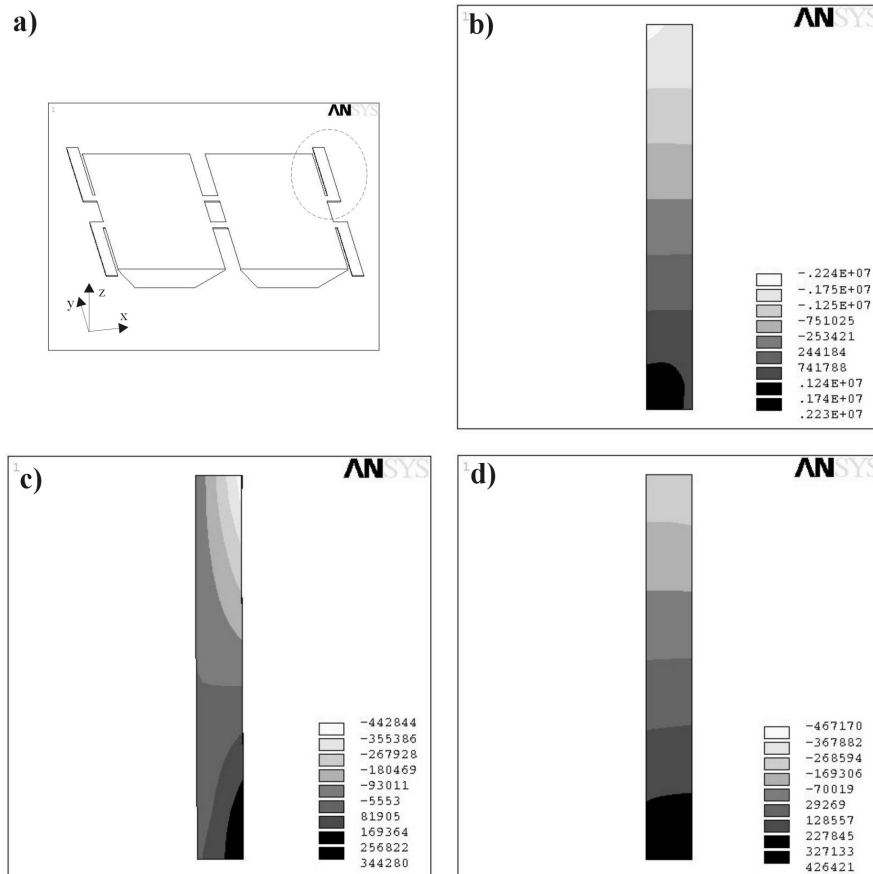


Figura 3.14: b), c) i d): Distribució dels esforços longitudinals (al llarg de l'eix y), en Pascals, sobre un dels ponts laterals de l'estructura triaxial per les acceleracions en z, x i y, respectivament.

A les Figura 3.14b), c) i d) es pot veure que els esforços en el pont lateral, quan aquest és sotmès a una acceleració en l'eix z, són molt més importants (fins a 2.2MPa) que per les acceleracions en els eixos x i y (0.4MPa). A més la distribució del esforços és simètrica al llarg del pont disminuint ràpidament des dels extrems. Per acceleracions en l'eix x, en canvi, els estressos no són tan uniformes. Es podrien descriure com a radials a partir dels extrems més exteriors del pont. Per l'acceleració en y tornem a tenir un gradient al llarg del pont amb un màxim al punt d'unió a la massa de 0.42MPa i al punt d'ancoratge un valor de 0.22MPa. Per poder realitzar un estudi comparatiu quantitatiu es van escollir sis punts concrets als ponts laterals i es va extreure el seu valor d'esforços mecànics. Els punts d'estudi es mostren a la Figura 3.15 amb les distàncies respecte als extrems d'aquest.

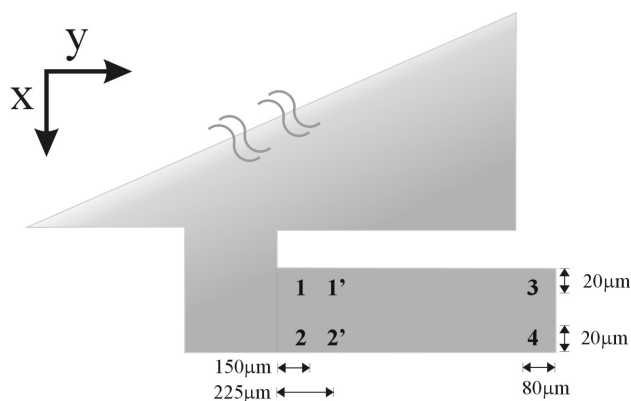


Figura 3.15: Posició dels punts d'estudi sobre un pont lateral de l'acceleròmetre triaxial.

Els valors dels esforços longitudinals (més importants que els transversals) per a les tres diferents acceleracions es recullen a la Taula 3.9. Les diferències en alguns valors d'aquesta taula corresponents a punts en la mateixa posició, són degudes a que les mesures s'han realitzat node a node i per tant pot haver-hi alguna diferència degut al mallat.

Punt	Estrès acc. z (MPa)	Estrès acc. y (MPa)	Estrès acc. x (MPa)
1	1.20	0.247	0.036
2	1.17	0.251	0.202
3	-1.67	-0.202	-0.005
4	-1.51	-0.202	-0.325
1'	0.98	0.212	0.030
2'	0.99	0.221	0.163

Taula 3.9: Valors dels estressos longitudinals pels sis punts d'estudi situats als ponts laterals per a les tres components de l'acceleració.

A partir de la Taula 3.9 s'extreu perquè pel disseny Triaxial el pont de *Wheatstone* per la detecció de x i y dóna una sensibilitat més baixa en la direcció y. En aquest disseny les piezoresistències estan situades a la posició 4. Per aquest punt el nivell d'esforços per l'acceleració x és lleugerament superior que per la direcció y. En canvi els esforços en la direcció y són més importants pels punts 1, 2, 1' i 2', malgrat que aquests estan més allunyats dels extrems. Aquest fet es nota també en els valors dels esforços per l'eix z, més petits conforme ens allunyem dels extrems. Així doncs, els punts 1 i 2 eren tots dos molt vàlids per a la detecció de l'acceleració en y amb un valor de sensibilitat creuada molt semblant. Al final es va decidir escollir la posició 1 per a la detecció en y, perquè aquest punt mostrava uns valors de sensibilitat més baixos per a l'acceleració en x. La posició més adequada per a la detecció de l'acceleració en l'eix x seguia essent la 4. D'aquesta selecció es va treure la distribució de les piezoresistències que s'il·lustra a la Figura 3.9. La seva configuració en tres ponts diferents és la que s'indica a la Figura 3.16.

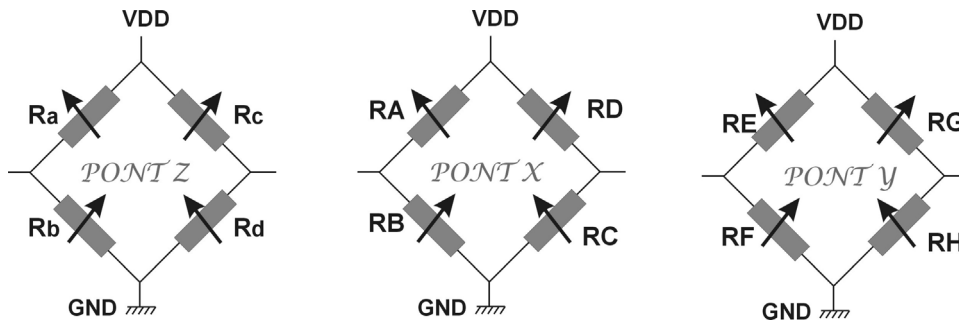


Figura 3.16: Configuració de les piezoresistències en ponts de *Wheatstone* per a la detecció de les tres components de l'acceleració en el Disseny Triaxial_8res.

Aquest disseny amb tres ponts de *Wheatstone* requereix d'un nombre elevat de pistes d'interconnexió. Aquestes pistes recorren els ponts i el marc del dispositiu i poden afegir estressos al sensor. A més resulta impossible l'interconnexionat a nivell de dau amb un únic nivell de metall. Aquest disseny no s'havia implementat fins ara degut a la dificultat de treballar amb tantes sortides. Amb l'aproximació MCM l'interconnexionat d'aquests ponts es realitza a nivell del substrat MCM. La variació de cadascuna de les piezoresistències segons la direcció de l'acceleració queda com s'indica a la Taula 3.10.

	Pont z				Pont x				Pont y			
	Ra	Rb	Rc	Rd	RA	RB	RC	RD	RE	RF	RG	RH
Acceleració z	+++	---	---	+++	---	---	---	---	+++	+++	+++	+++
Acceleració x					--	++	--	++	++	--	++	--
Acceleració y					--	++	++	--	++	--	--	++

Taula 3.10: Variació de les piezoresistències implementades al disseny Triaxial_8res en presència de les tres components de l'acceleració. Les caselles buides indiquen que la variació és molt petita.

Els valors de les sensibilitats obtingudes per aquest disseny i segons la configuració en tres ponts de la Figura 3.16 són els següents:

- Sensibilitat en la direcció z:** 0.959mV/V·g
- Sensibilitat en la direcció x:** 0.169mV/V·g
- Sensibilitat en la direcció y:** 0.124mV/V·g

La Taula 3.11 resumeix els valors de sensibilitat esperades segons els resultats de les simulacions FEM per a cadascun dels tres dissenys.

Acceleració	Sensibilitat [mV/V·g]		
	Disseny 1	Disseny 2	Disseny 3
Eix z	0.959	0.917	0.959
Eix x	0.169	0.095	0.169
Eix y	0.101	0.069	0.124

Taula 3.11: Resum del valors de sensibilitat pels diferents dissenys d'acceleròmetre triaxial.

L'estudi modal també es va dur a terme amb el disseny triaxial. La Taula 3.12 recull els valors obtinguts pels tres dissenys d'acceleròmetres triaxials. Recordem que els dissenys Triaxial i Triaxial_8res tenen la mateixa geometria i per tant presenten els mateixos valors de freqüències de ressonància.

Freqüència [Hz]	Triaxial	Triaxial_opt	Triaxial_8res
Mode 1	674	988	674
Mode 2	1012	2202	1012
Mode 3	1405	2567	1405

Taula 3.12: Valors de freqüència pels tres primers modes de vibració dels acceleròmetres triaxials.

3.2.4 Layout dels acceleròmetres.

Un cop s'ha realitzat el disseny dels sensors pròpiament, encara queda per realitzar el disseny del xip que encabirà les estructures descrites als apartats anteriors. Amb això, ens estem referint al connexionat del xip, el nombre i disposició dels pads de sortida, les dimensions d'aquest, etc. El disseny d'aquests elements, ve regit per la funcionalitat del xip i per les regles de disseny de la tecnologia. A continuació descrivim el disseny del *layout* del xip.

□ Interconnexionat.

Utilitzant el metall disponible al sensor es van fer totes les connexions possibles per tancar els ponts de *Wheatstone*. Com hem dit, en general, resulta impossible tancar els ponts completament per la existència de creuaments i es fa necessari un altre nivell de metall. Aquest altre nivell de metall està disponible als substrats MCM i, per tant, es va decidir deixar els ponts tancats en la mesura del possible a nivell de sensor i realitzar la resta de les connexions a nivell de substrat. A la Figura 3.17 es pot veure l'esquema elèctric finalment implementat als acceleròmetres triaxial i triaxial optimitzat a nivell de xip.

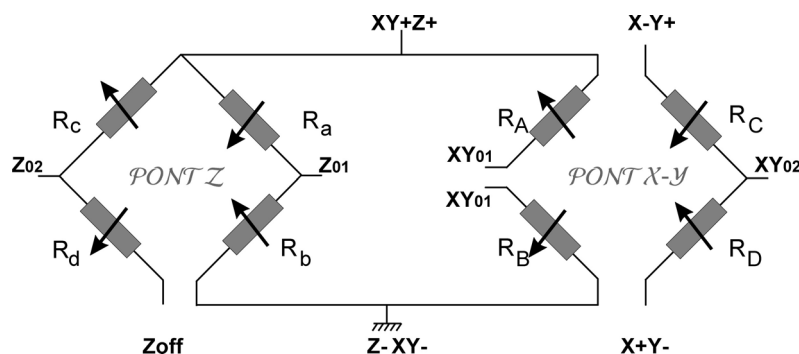


Figura 3.17: Esquema elèctric a nivell de dau pels dissenys triaxial i triaxial optimitzat.

La branca formada per les piezoresistències C i D va quedar oberta per poder realitzar la mesura simultània de les acceleracions en x i y només bescanviant l'alimentació de la branca. Quan el punt $X+Y-$ està alimentat a V_{DD} obtindrem a la sortida la mesura de l'acceleració x,

quan el mateix punt estigui connectat a GND i X-Y+ a alimentació, llavors la mesura correspondrà a la direcció y.

La Figura 3.18 mostra la configuració elèctrica dels tres ponts de *Wheatstone* implementats al Disseny 3. La complexitat del disseny no ha permès de tancar la major part de les connexions les quals es realitzaran al substrat MCM.

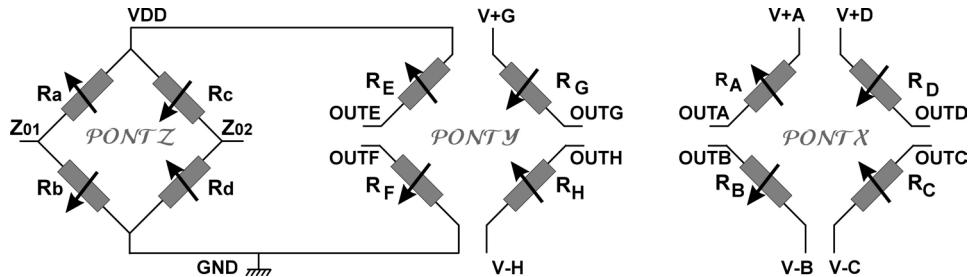


Figura 3.18: Esquema elèctric a nivell de dau pel disseny Triaxial_8res.

□ *Layout dels bump pads i del marc tancat.*

Com hem comentat anteriorment, en les etapes inicials de disseny es va establir la mida màxima de xip per a tots els dissenys la qual es va fixar en $5.5 \times 5.5 \text{mm}^2$. Aquesta mida inclou tant el sensor com el marc del dispositiu. Sobre el marc del xip es dissenyen les sortides *flip-chip*, o *bump pads*, i el marc tancat definitos tots dos amb un metall soldable. Un cop realitzat l'interconnexió del pont, les diferents sortides es dirigeixen cap a una matriu de *bump pads*. Els *bump pads* es disposen en forma de matriu perquè a més de proporcionar contacte elèctric també proporcionen el suport mecànic adient, és a dir, han de suportar el pes del xip. En general, no tots els *bump pads* de la matriu tenen connexió elèctrica. El pitch entre pads és de $400 \mu\text{m}$ i ve dictat per la fiabilitat del procés de dipòsit de la pasta; *screen-printing*. Al disseny triaxial es va implementar una matriu de 8×8 sense files interiors, o sigui un total de 32 sortides, mentre que als dissenys uniaxials per manca d'espai al marc del disseny D2U-10g els *bump pads* es van disposar en dues fileres als costats de 8 pads cadascuna, tal i com es pot veure a la Figura 3.19. El disseny del marc tancat es va realitzar com un quadrat exterior als *bump pads* de $150 \mu\text{m}$ d'ample i amb una separació respecte els pads de $250 \mu\text{m}$. El quadrat no es va tancar completament sinó que es van deixar dues obertures de $150 \mu\text{m}$ als costats, per tal que la cavitat de pasta de soldadura no es tanqués completament durant el procés de refosa i permetés la sortida dels gasos que es produeixen en aquesta etapa. Així doncs la cavitat que es forma al final del procés no és totalment hermètica, si bé les obertures no permeten l'entrada de *underfill* que es dispensa a l'exterior d'aquests.