



Desenvolupament de microgeneradors inercials electromagnètics en tecnologia de micro sistemes per a la recuperació d'energia mecànica residual de l'ambient

Núria Fondevilla Sala

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT DE BARCELONA

Facultat de Física

Departament d'Electrònica

DESENVOLUPAMENT DE
MICROGENERADORS INERCIALS ELECTROMAGNÈTICS
EN TECNOLOGIA DE MICROSISTEMES PER A LA RECUPERACIÓ
D'ENERGIA MECÀNICA RESIDUAL DE L'AMBIENT

Núria Fondevilla Sala

Director tesis:

Dr.Christophe Serre

Barcelona, Maig 2012

MICROGENERADOR INERCIAL ELECTROMAGNÈTIC

II.1. Introducció

L'objectiu de tots els generadors inercials és convertir l'energia mecànica en energia elèctrica. Actualment els generadors que proporcionen energia per aplicacions de baixa potència són principalment de tipus electroquímic. El seu cost és baix i la seva densitat específica d'energia és de 1000-400Whr/Kg. No obstant, per a les aplicacions sense cables o a llocs de difícil accés tenen el gran desavantatge de ser fonts d'energia finita. Durant l'última dècada per solucionar-ho s'ha investigat la creació de dispositius generadors de potència basats en imants. El seu volum varia entre l'ordre dels mil·límetres cúbics i uns pocs centímetres cúbics i són capaços de generar energies des de μW fins a desenes de W. En l'actualitat ja es comencen a implementar en sistemes reals. Els generadors electromagnètics permeten obtenir un acoblament electromecànic elevat mitjançant l'ús de dissenys relativament senzills donant lloc a densitats de potència elevades [1]. Un altre avantatge dels generadors magnètics amb imants permanents és la escalabilitat del flux. En aquest capítol s'estudiaran dos tipus de generadors inercials electromagnètics: els vibracionals i els híbrids, tant si es troben a nivell d'investigació com si ja s'han comercialitzat. Els generadors híbrids són dispositius inercials que converteixen moviments lineals en rotacionals gràcies a un rotor excèntric.

Per últim, s'analitzaran els problemes associats a la miniaturització i les conseqüències en la densitat de potència.

II.2. Estat de l'art. Tipus de generadors inercials

Els generadors inercials electromagnètics es poden classificar en els dos grups de generadors mostrats en la Fig.II.1: vibracionals i híbrids (component vibracional més una altra rotacional).

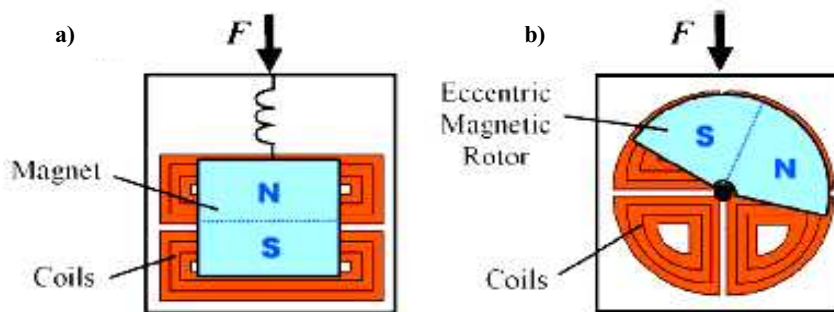


Fig.II.1 Tipus de generadors inercials amb un imant permanent: a)Vibracional, b)Híbrid [1].

II.2.1. Generadors vibracionals

Els dispositius electromagnètics ressonants són els que aprofiten l'energia residual d'una vibració externa. Es caracteritzen per operar a baixes freqüències i, per tant, acostumen a generar densitats de potència baixes. El seu funcionament es basa en els petits moviments relatius d'un imant respecte a una bobina, com a conseqüència d'una vibració externa. Degut a aquest moviment relatiu, es produeix una variació del flux magnètic amb el temps que travessa la bobina induint-n'hi un voltatge de sortida d'acord amb la llei de Faraday. El corrent induït en la bobina genera una força electromecànica que contribueix a esmoreir el moviment que el produeix. La potència generada és màxima quan la vibració externa coincideix amb la freqüència de ressonància del dispositiu.

Degut a que les estructures ressonants estan caracteritzades per una amplada de banda estreta, les vibracions de freqüència ben coneguda per exemple, la generada per motors en funcionament, són les més adequades com a font d'energia.

II.2.1.a. Dispositius a nivell d'investigació

Existeixen diferents grups d'investigació en el camp del desenvolupament de generadors inercials electromagnètics vibracionals que utilitzen macrocomponents entre els que destaquen [2-5]. Aquests dispositius estan basats en la implementació d'un ressonador esmorteït, presenten uns volums típics d'uns quants cm^3 i permeten generar potències entre el rang dels centenars de μW i els mW .

En alguns casos [2-6], ja s'ha pogut demostrar la viabilitat d'aquests dispositius en el funcionament autònom de sistemes simples. Aquests consten bàsicament d'un dispositiu sensor i un transmissor (emissor-receptor) de les dades per l'aire.

A nivell macro, un treball interessant és el del grup de la Universitat de Southampton [4-5]. El generador dissenyat i implementat està basat en una bobina convencional de Cu situada sobre una biga. Gràcies a les vibracions, aquesta biga es mou través del camp magnètic creat pels 4 imants de NdFeB fixes, *Fig.II.2*. Aquest moviment oscil·latori dona lloc a una variació de flux magnètic que travessa la superfície de la bobina, generant una potència de l'ordre dels 2.5mW per una amplitud de l'oscil·lació aplicada de Y_o de 0.4mm , a una freqüència de ressonància de 102Hz i amb una resistència de càrrega, R_L de 100Ω .

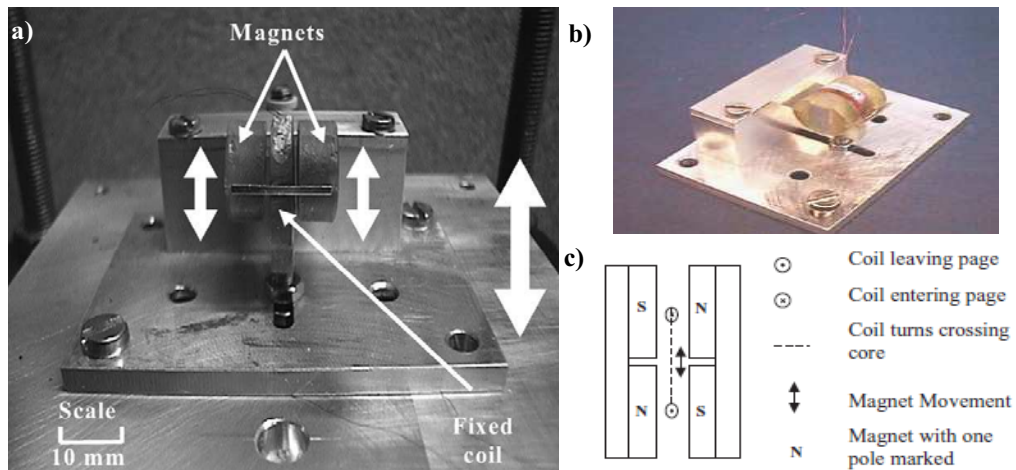


Fig.II.2 a) i b) Imatges fotogràfiques d'un dispositiu amb un imant mòbil c) Secció horitzontal de la representació esquemàtica del generador electromagnètic [4-5].

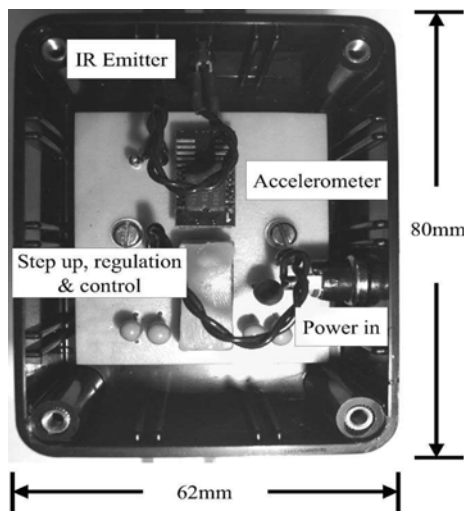


Fig.II.3 Acceleròmetre autoalimentat [4].

El prototip implementat, que inclou el generador anterior, s'ha situat en el motor d'un cotxe per proporcionar energia a un sistema format per un acceleròmetre i un emissor de infrarojos, que s'utilitza per a la transmissió continua de dades a una distància de fins a 6cm sense necessitat de cables (en substitució d'una pantalla LCD per reduir-ne la mida). A més a més, el prototip, mostrat en la *Fig.II.3*, consta d'un circuit multiplicador de voltatges, que és un mètode compacte per augmentar-lo i a la vegada rectificar-ne la sortida.

El dispositiu fabricat pel grup MIT [2] aprofita les vibracions de l'ambient per alimentar un sistema mecànic de segon ordre. Aquest generador utilitza una massa lligada a una bobina que oscil·la dins del camp magnètic d'un imant permanent fix. La massa del generador presenta un esmorteïment que correspon a les pèrdues mecàniques degudes a la fricció.

El dispositiu construït consta d'una massa, $m = 0.5\text{g}$, una molla amb una constant elàstica, $k = 174\text{N/m}$, amb una freqüència natural de 94Hz , i una resistència de càrrega, $R_L = 10\text{ohms}$, Fig.II.4a). La microbobina obtinguda del micròfon EAS2P20 de **Panasonic** consta de 200 espires amb un diàmetre d'espira de $80\mu\text{m}$ [7, 8]. El dispositiu amb un volum de 23.5cm^3 genera una potència pic a pic obtinguda en la sortida de $400\mu\text{W}$, el que correspon a un densitat de potència de $17\mu\text{W/cm}^3$. En canvi, el voltatge de sortida és de només $V_o = 180\text{mV}$, massa baix com per ser rectificat per un diode. Tot i que es podria utilitzar un diode de tensió llindar baixa, els corrents de fuga associats serien problemàtics. Una altra possibilitat seria emprar un rectificador síncron. Aquest substituiria els díodes per transistors MOSFET però es necessitaria una detecció de la sortida del generador i una commutació ràpida dels transistors si el voltatge generat també variés ràpidament. Per tant, l'opció més senzilla escollida pels autors ha estat l'ús d'un transformador per augmentar-ne el voltatge.

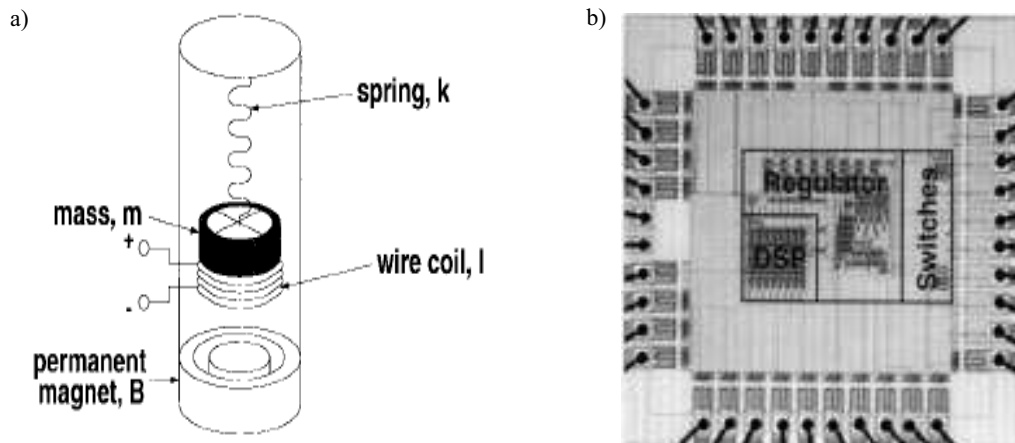


Fig.II.4 a) Esquemàtic del generador mecànic fabricat pel grup del MIT b) Xip format per un microprocessador digital dels senyals (DSP), un regulador del voltatge i uns interruptors de potència [2].

El prototip implementat, està format per aquest microgenerador mecànic, que alimenta un microprocessador del senyal digital, (DSP, Digital Signal Processor). El xip, mostrat en la Fig.II.4b), inclou el DSP, un regulador del voltatge i uns interruptors de potència (switches). Aquests últims són uns components elèctrics que permeten desviar o interrompre el corrent per augmentar l'eficiència del dispositiu.

Un altre treball a destacar, que demostra la viabilitat d'aquest tipus de microgenerador per a l'alimentació d'un sistema autònom, és el realitzat per un grup de la universitat Xina de Hong Kong [3,6]. Els seus autors han implementat un generador electromagnètic d'un volum aproximat de 1cm^3 . Com s'observa en la Fig.II.5, aquest dispositiu consta d'un imant de NdFeB lligat a una molla micromecanitzada de Cu de $110\mu\text{m}$ de gruix, que es mou de forma elàstica respecte a una bobina de Cu fixa impresa en la PCB, amb pistes d'unes $50\mu\text{m}$ de diàmetre [9]. El Cu és millor que el Si en termes de fiabilitat i de potència generada per la molla, malgrat no ser-ho en termes d'estrès. L'estructura ressonant espiral de Cu s'ha micromecanitzat emprant un làser de tipus Q-switch Nd:YAG (Electrox Scriba II D40, UK) amb una longitud d'ona de $1.06\mu\text{m}$ i una potència màxima de 40W .

Aquest dispositiu es troba connectat a una resistència de càrrega de $1K\Omega$ i presenta una freqüència de treball de 110Hz. Quan se li apliquen vibracions d'una amplitud, $Y_o = 200\mu\text{m}$, genera un pic de voltatge de 2.2V i una potència màxima de sortida de $830\mu\text{W}$, corresponent a una densitat de potència de $830\mu\text{W}/\text{cm}^3$ i a una normalitzada de $8.8\mu\text{W}/\text{cm}^3 \cdot \text{g}^2$.

Malgrat generar una densitat de potència molt baixa, s'ha demostrat que pot alimentar adequadament un transmissor d'infrarojos (IR, InfraRed) per enviar un tren de polsos de 140ms cada minut. El transmissor IR alimentat ha estat construït amb el xip comercial SM5021 de **Nippon Precision Circuits Inc**, que requereix un voltatge de 1.8V. La seva alimentació es realitza mitjançant una capacitat, $C = 1.16\text{mF}$ que emmagatzema la càrrega generada.

El sistema sensor de temperatures sense cables consta del microcontrolador SX28 de **Parallax Inc.**, el sensor de temperatura DS1620 de **MAXIM-Dallas Semiconductor** i el transmissor de dades TX3 (UHF-FM) a una freqüència de 914.5MHz, de **Radiometrix**.

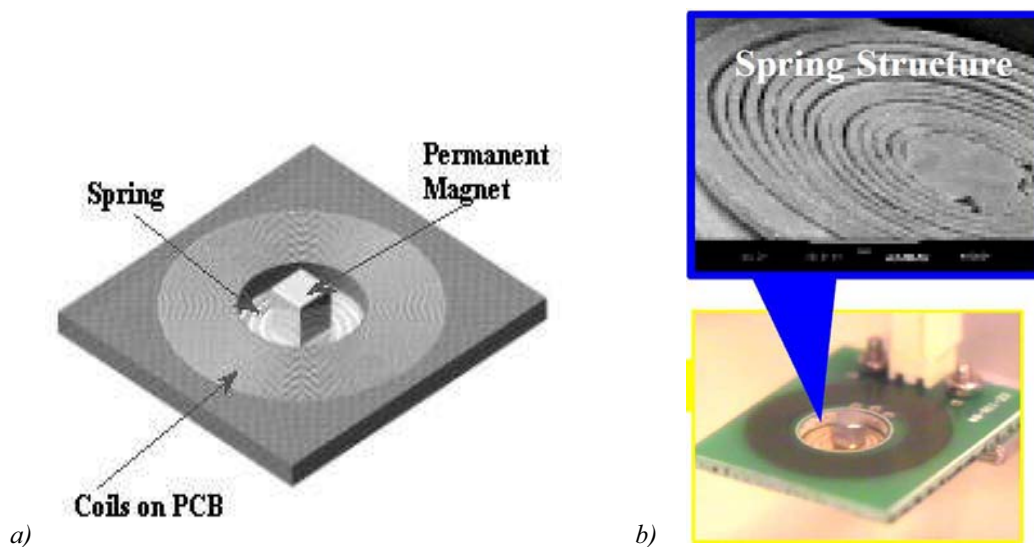


Fig.II.5 a) Representació esquemàtica del generador proposat pel grup de la universitat de Hong Kong b) Imatges fotogràfiques de l'estructura de la molla de Cu i del generador [3, 6].

D'altra banda, hi ha una altra sèrie de grups que estan treballant per integrar aquests dispositius en tecnologies de microsistemes [10-18]. La utilització d'aquestes tecnologies ha implicat millores importants, a nivell de reproductibilitat i de fiabilitat, enfront dels processos a macroescala. Existeixen dues possibles configuracions en el disseny del generador electromagnètic en funció de quina sigui la part mòbil del ressonador (imant o bobina).

Imant fix i bobina mòbil:

Una de les possibles configuracions és aquella en la que les bobines estan col·locades sobre les microbigues o "microcantilevers", facilitant-ne l'apilament per tal d'augmentar la potència de sortida.

El dispositiu dissenyat per Mizuno [11] està format per moltes petites bigues amb les seves corresponents bobines que comparteixen el camp magnètic d'un imant més gran. Primerament, es va construir un dispositiu d'escala intermèdia, mostrat en la Fig.II.6a), formada per una única biga mecanitzada en una membrana de vidre de 25mm de longitud, 10mm d'amplada i 1mm de gruix. A sobre i mitjançant evaporació, s'ha fabricat una bobina d'Au, que consta de 4 espires d'1mm d'amplada de pista i $50\mu\text{m}$ de gruix, amb una resistència total de 128Ω connectada a una resistència de càrrega de 128Ω . Per a una amplitud d'excitació aplicada Y_o de $0.64\mu\text{m}$ i una freqüència de

ressonància de 700Hz, la tensió generada és de 0.32mV i la potència de sortida obtinguda és de 0.4nW. Si el volum total del dispositiu (format pel conjunt biga-imant) és de 2cm³, la densitat de potència obtinguda val 0.2nW/cm³ i la normalitzada a l'acceleració és de 0.13nW/cm³·g².

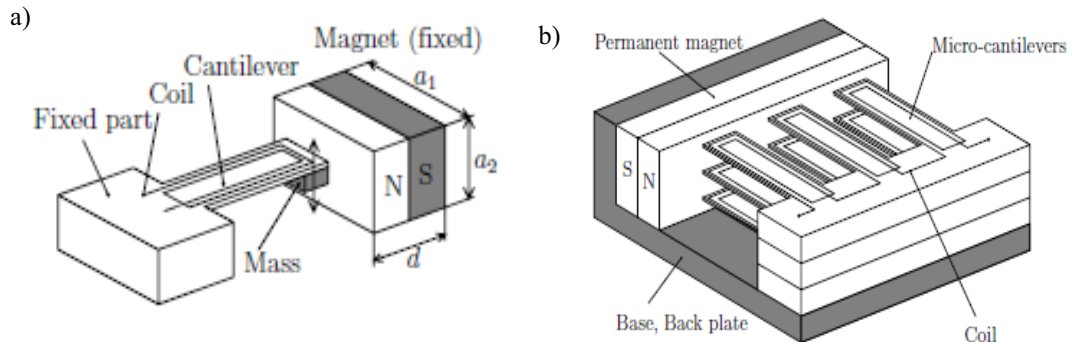


Fig.II.6 a) Representació esquemàtica d'un microgenerador en que la bobina està situada a sobre una biga amb un imant permanent fix en el seu extrem b) Dispositiu format per un conjunt de bigues, distribuïdes en files i columnes, que comparteixen un únic imant [11].

No obstant, per a qualsevol combinació de paràmetres de la geometria, el model prediu un voltatge massa baix per poder-lo rectificar. Una millora en la potència generada s'aconseguiria utilitzant un sistema multibiga, com el mostrat en la Fig.II.6b), però presentaria dificultats en ajustar la ressonància de cada una de les bigues. Per tant, aquest disseny no és una via recomanable per a aplicacions electromagnètiques.

Una millora en la idea de la construcció de grups de bigues l'ha realitzat un grup de treball de la universitat de Michigan [12]. Com que les vibracions mecàniques de l'ambient més abundants són de baixa freqüència, l'energia a extreure serà molt baixa. Per solucionar-ho, han dissenyat el prototip de la Fig.II.7a) i b), que transforma les baixes freqüències ambientals a l'induir una altra més alta en les bigues, "frequency up conversion" (FupC). El dispositiu consta d'un imant de NdFeB dissenyat per entrar en ressonància a freqüències baixes i al moure's, agafa i deixa anar de forma magnètica les puntes de les petites bigues, excitant-les a una freqüència de ressonància més alta. Una vegada les bigues comencen a oscil·lar, les bobines situades a sobre comencen a generar corrent. Primerament per poder demostrar-ne la viabilitat i la factibilitat del model proposat s'ha dissenyat i fabricat una versió a macroescala del prototip amb una única biga, mostrada a les Fig.II.7c) i d). La biga, realitzada amb estirè, té una mida de 50x15x0.4mm³. A sobre s'hi ha situat una bobina amb 3 espises de Cu. Aquest dispositiu s'ha dissenyat per a augmentar la freqüència de ressonància de 1Hz de l'imant a una de 25Hz de la biga. La potència generada és de 120nW i la tensió de 6mV. Al ser el volum del dispositiu de 2.3cm³ la densitat de potència corresponent és de 50nW/cm³. Posteriorment, s'han realitzat simulacions a nivell de microescala d'aquest generador, que es fabricaria mitjançant mètodes de microfabricació, amb un imant de NdFeB de 1x1x1mm³ de volum, una biga de 500x400x15µm³ i una bobina de Cu de 12 espises situada a sobre. Aquestes simulacions indiquen la generació d'una potència de sortida màxima de 4µW i un pic de voltatge de 76mV. Si es considera un volum total del dispositiu de 1mm³, que és la suma dels volums de la biga i de l'imant, la densitat de potència obtinguda valdria 4mW/cm³.

Un altre microdispositiu simulat seria el format per una biga de perillè de 400x300x10µm³ i un imant de NdFeB de 2x2x1mm³, a sobre del qual hi hauria una microbobina amb 37 espises s'esperaria obtenir una tensió de 150mV i una potència de 2.5µW al augmentar la freqüència de 10Hz a 11.4kHz.

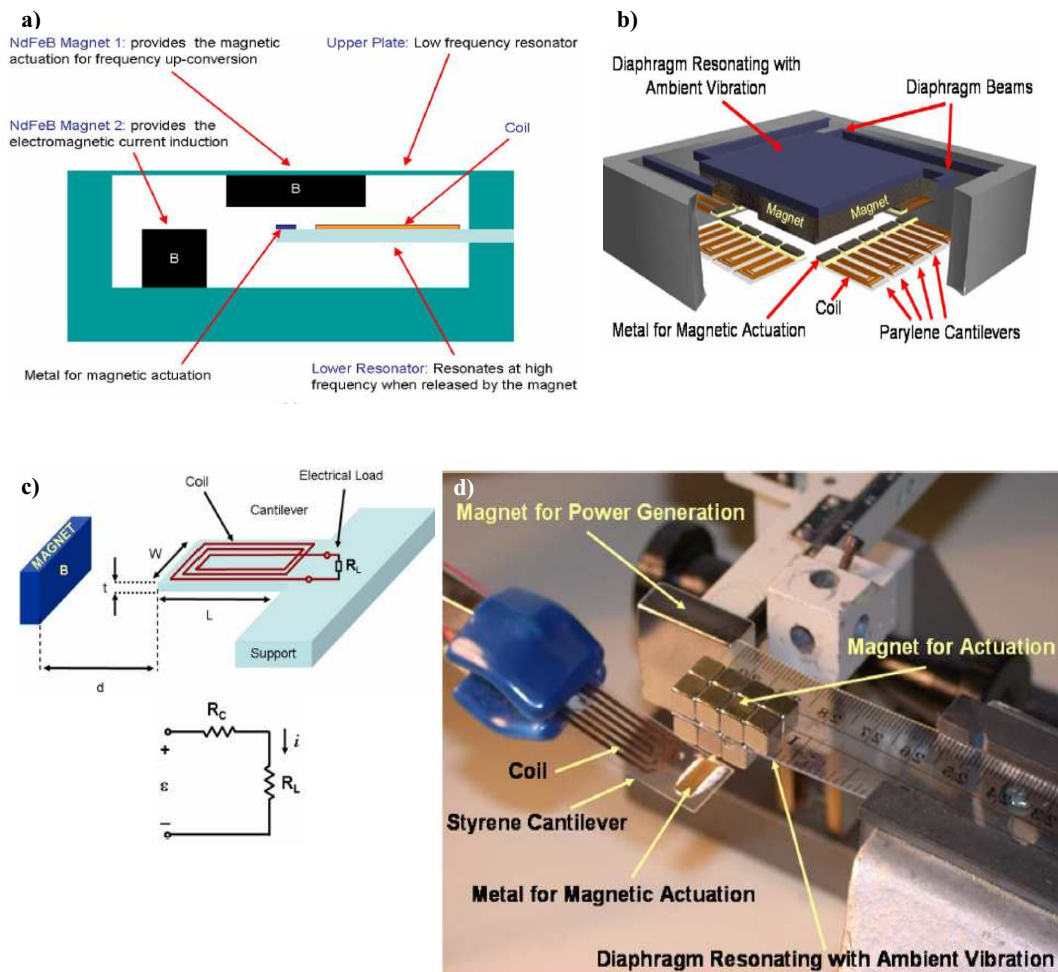


Fig.II.7 a) Secció transversal simplificada de l'estructura proposada d'un microgenerador amb dues estructures ressonants b) Representació 3D del disseny proposat per a una implementació a microescala c) Model elèctric bàsic de la bobina de la única biga amb una resistència de càrrega d) Imatge fotogràfica del generador a macroescala i del muntatge per realitzar les mesures experimentals [12, 18].

Posteriorment, un grup de la universitat de Southampton ha presentat un generador electromagnètic, basat en el sistema microelectromecànic anterior, per extreure energia de les vibracions externes de baixa freqüència [19]. Les dimensions totals del microgenerador, amb un total de 20 bigues connectades per multiplicar el voltatge i la potència, són de $8.5 \times 7 \times 2.5 \text{ mm}^3$. La imatge de la Fig.II.8, mostra el disseny proposat per augmentar-ne l'eficiència, proporcional a la freqüència d'excitació. El generador converteix les vibracions de baixa freqüència, entre els 70-150 Hz, en altres de més altes, entre els 95Hz i 2kHz, mitjançant una tècnica de (FupC). Aquest dispositiu permet generar, en cada biga, un voltatge de 0.57mV i una potència de 0.25nW, similars als valors estimats mitjançant les simulacions, que prediuen una densitat de potència de 45 nW/cm^3 . Malgrat que experimentalment la potència generada per una biga d'aquest tipus és molt superior a una de convencional, les sortides de diverses bigues no són compatibles amb les d'una única biga degut a la diferència en les freqüències naturals de les bigues i al seu alliberament asíncron.

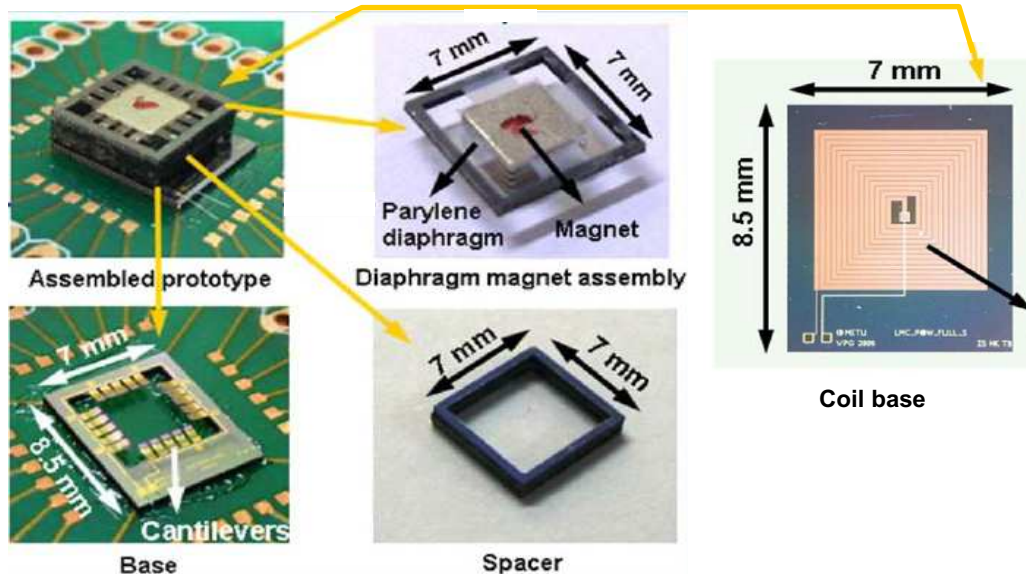


Fig.II.8 Imatges fotogràfiques d'un prototip assemblet FupC (Frequency up Conversion) i dels seus components: Base, assemblatge del imant, separador i bobina [19].

Una alternativa més senzilla seria la proposada per un altre grup de la universitat de Southampton en col·laboració amb un grup de l'Institut Nacional de Tyndall [20-21]. El dispositiu mostrat en les Fig.II.9a) i b), consta d'una pala de Si amb una bobina enganxada a sobre, que pot oscil·lar de forma planar entre els quatre imants (dos per sobre i dos per sota, Fig.II.9c)). Es va començar fabricant uns primers prototips de 0.1cm^3 de volum, amb una bobina convencional que vibrava entre els imants de NdFeB, Fig.II.9.d). Les freqüències de treball d'aquests dissenys són de 1.6 i 9.5kHz i generen unes potències de $0.1\mu\text{W}$ i $0.12\mu\text{W}$ respectivament [20]. Aquest últim li correspon una densitat de potència de $1.2\mu\text{W}/\text{cm}^3$ i una normalitzada a l'acceleració de $7.5\mu\text{W}/\text{cm}^3\text{g}^2$. La separació d'uns 0.5mm entre la bobina i els imants s'hauria de minimitzar per optimitzar el seu funcionament.

Posteriorment, aquest mateix grup ha dissenyat i simulat un parell de dispositius d'uns 30mm^3 de volum cada un que es fabricarien de forma totalment micromecanitzada. S'ha electrodepositat una bobina de Cu de $10\mu\text{m}$ de gruix a sobre d'una bobina inferior de Cu de $2\mu\text{m}$ de gruix que ha estat dipositada per *sputtering* sobre la pala de Si de 0.5mm de gruix. Els microimants s'han fabricat mitjançant un electrodipòsit de $150\mu\text{m}$ de gruix de CoPt, i es troben a una distància d'uns $150\mu\text{m}$ de la bobina, Fig.9.e) [21]. En ambdós microgeneradors la freqüència aplicada és de 7.4kHz i l'acceleració és de $1.1\text{m}/\text{s}^2$. En el primer disseny, les microbobines de Cu estan situades a sobre una pala de Si que vibra entre dos conjunts d'imants electrodepositats amb polaritats oposades de $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}$, generen un voltatge i una potència màxima de 55mV i $70\mu\text{W}$, Fig.9.f). En canvi en el segon disseny, per tal de concentrar les línies de camp magnètic s'hi han electrodepositat uns imants de $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$ addicionals, que actuen com a capa de baixa magnetització per sota dels de magnetització elevada Fig.9.g). Aquest segon microgenerador permet obtenir un pic de voltatge de 950mV i una potència màxima de $85\mu\text{W}$.

Pel que fa referència a l'efecte de l'esmoreïment de l'aire, segons Zhang [22], esdevé significatiu quan el dispositiu es reescala cap a dimensions petites (μm) i la freqüència de treball es troba en el rang dels MHz i GHz. Per tant, en aquest cas l'efecte de l'esmoreïment de l'aire és petit, el que concorda amb l'estudi realitzat per Newell dels ressonadors de Si [23]. No obstant, els autors suggereixen que seria aconsellable encapsular-lo al buit per minimitzar-lo encara més.

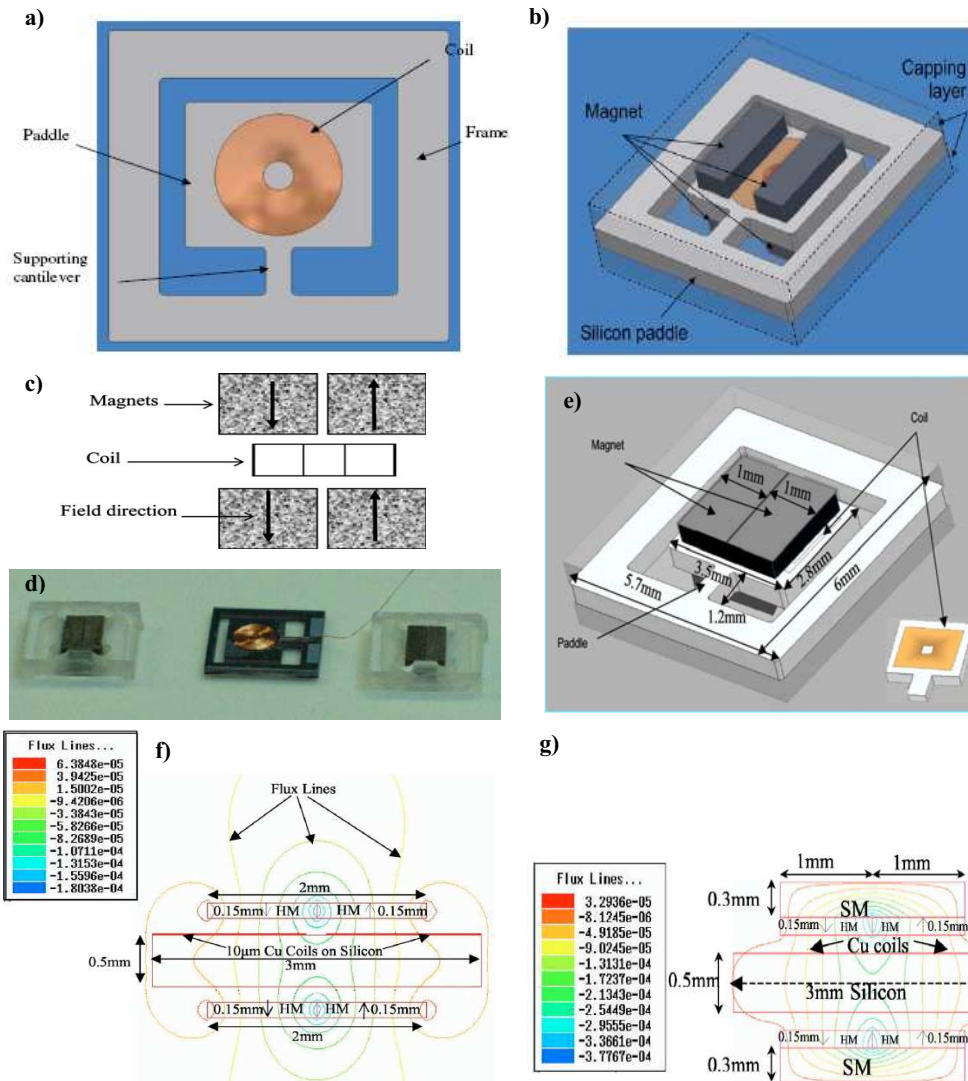


Fig.II.9a) Representació esquemàtica de la vista superior d'una pala de Si fabricada per DRIE, a on hi ha situada la bobina b) Vista 3D del generador de Si c) Configuració dels imants d) Imatge fotogràfica del prototip fabricat amb una bobina convencional [20] e) Esquema 3D del generador micromecanitzat de Si f) Línies de flux del primer generador totalment micromecanitzat realitzat amb imants amb elevada magnetització g) Línies de flux del segon generador totalment micromecanitzat realitzat amb imants d'elevada i de baixa magnetització [21].

Un altre possible mecanisme per extreure energia de les vibracions externes de baixa freqüència a nivell macro és el dispositiu fabricat per un grup de la universitat Middle East Technical de Turquia [24]. L'estructura, mostrada en les imatges de les Fig.II.10a) i b), consisteix en un imant situat sobre un suport i una bobina convencional en una biga de poliestirè. Per augmentar l'eficiència del sistema, s'ha fabricat una barrera mecànica que transforma les vibracions de freqüència baixa a unes altres de freqüència més elevada. Una característica d'aquest prototip es poder treballar no únicament a la freqüència de ressonància, sinó a un rang ampli de freqüències gràcies al principi de "FupC", sempre i quan l'amplitud de la vibració externa sigui la necessària per alliberar la biga del diafragma.

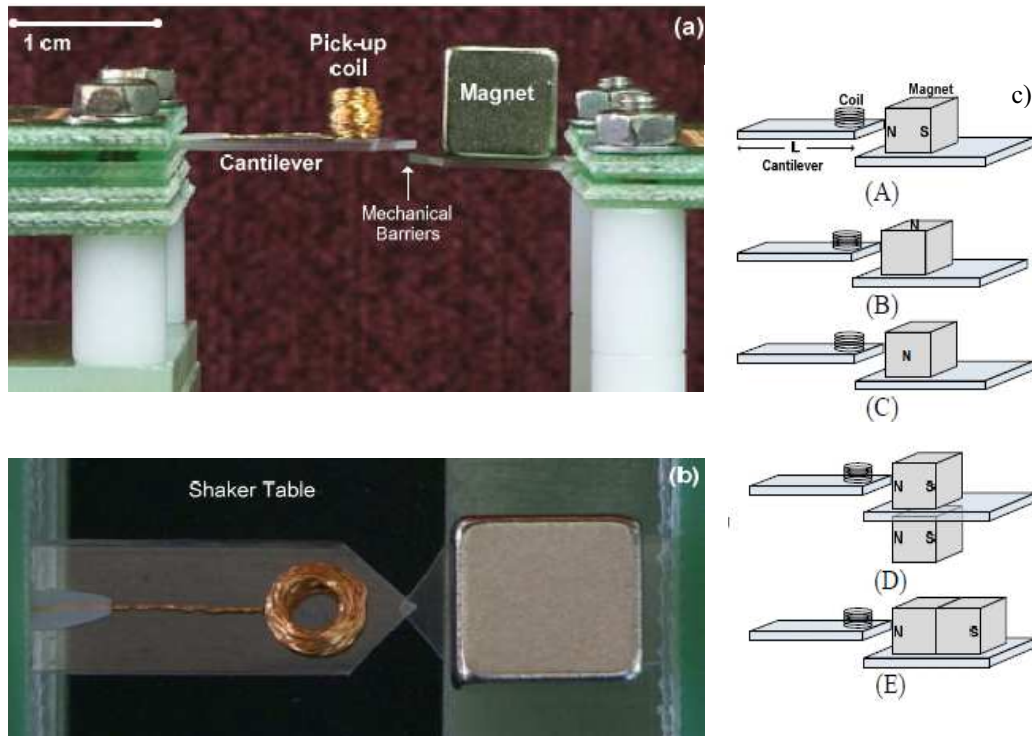


Fig.II.10 Imatges fotogràfiques de les vistes del dispositiu realitzat en la universitat de Middle East Technical de Turquia: a)lateral i b)superior del prototip generador construït c)representacions esquemàtiques dels prototips amb diferents configuracions testejats [24].

Per optimitzar la potència del generador es realitzen tests de prototips amb els diferents números i configuracions d'imants i longituds de bigues mostrats en la Fig.II.10c). La configuració (E), que presenta el millor funcionament, està formada per dos imants situats horitzontalment sobre la biga. Els resultats dels tests realitzats en aquesta configuració òptima indiquen que genera una tensió de 8.6mV i una potència de sortida de 544.7 μ W (RMS, Root Mean Square) al convertir una vibració externa de 10Hz a una altra de 394Hz. Com que el volum del dispositiu és de 2.96cm³ la densitat de potència generada valdrà 184 μ W/cm³ [25].

Imant mòbil i bobina fixa:

El principal avantatge d'aquest tipus de configuració és facilitar les connexions elèctriques de les bobines.

Un dispositiu a destacar seria el desenvolupat per uns investigadors del Swiss Federal Institute of Technology (ETH) [26]. El generador no ressonant consta de diversos imants permanents, de NdFeB, en forma de discs amb magnetitzacions oposades, units a un suport flexible que possibilita un desplaçament a l'interior de la bobina convencional, cilíndrica i fixa de Cu. El prototip, observat en la Fig.II.11, està optimitzat per generar energia al caminar (al col·locar-lo en el genoll) obtenint una potència de 35 μ W. La rectificació podrà ser convencional perquè el voltatge generat és superior a 1V. L'elevat volum total del dispositiu de 30cm³, dels quals només 0.5cm³ corresponen a la bobina i l'imant implica que la densitat de potència obtinguda sigui únicament de 1.2 μ W/cm³. No obstant, si només es considera el volum del propi element generador la densitat de potència seria de 70 μ W/cm³.

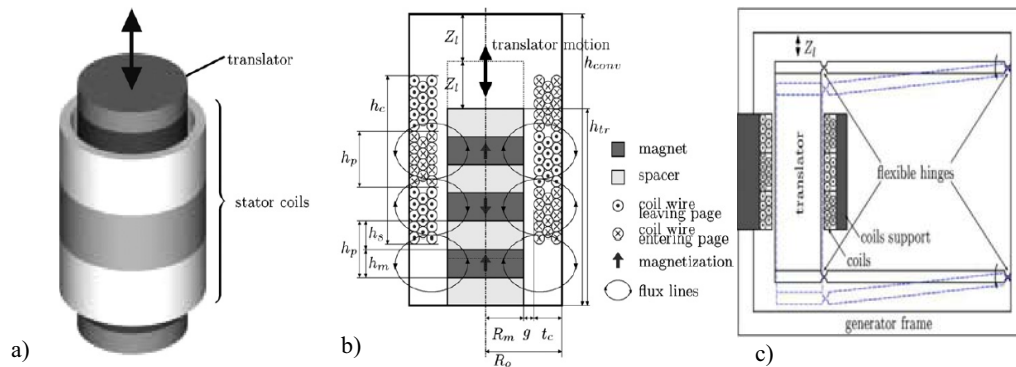


Fig.II.11 Esquema de l'arquitectura d'un generador no ressonant amb bobina fixa i iman que es desplaça en el seu interior: a) Model 3D b) Secció del microgenerador amb l'iman situat en el límit inferior del recorregut corresponent a un desplaçament Z_1 respecte posició centrada c) Representació de la secció del suport flexible que subjecta l'iman respecte el marc del generador [26].

Un altre disseny totalment diferent a destacar és el proposat per un grup de la universitat de Southampton dins del projecte europeu VIBES [10, 27]. El generador desenvolupat està format per 4 imants permanents de NbFeB situats a l'extrem lliure d'una biga juntament amb unes masses de tungstè que, amb les vibracions de l'entorn, es mouen respecte a la base fixa, on es troba situada una bobina convencional de Cu. Els elements de tungstè han estat fabricats utilitzant l'aliatge HE 395 de **Wolfmet**, caracteritzat per presentar una elevada densitat i no ser magnètic. Aquest aliatge al 95% de tungstè, a diferència del tungstè pur, en permet la mecanització.

Aquest dispositiu, observat en la Fig.II.12, genera una potència de $2.85\mu\text{W}$ a 357Hz , i un voltatge de només 16.9mV , quedant molt lluny del mínim per ser rectificat per un diode. Al presentar un volum de 60mm^3 , la densitat de potència generada serà de $48\mu\text{W}/\text{cm}^3$ i la normalitzada a l'acceleració valdrà $260\mu\text{W}/\text{cm}^3\cdot\text{g}^2$.

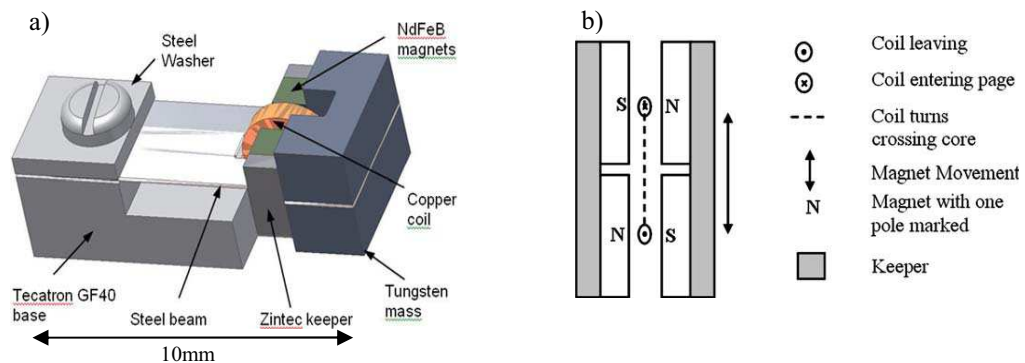


Fig.II.12 a) Microgenerador format per una biga i 4 imants b) Representació esquemàtica de la secció amb els 4 imants i la bobina [10].

Una primera miniaturització del prototip anterior seria el realitzat per un grup de col·laboració entre la universitat de Southampton i el Tyndall National Institute [28]. El nou prototip construït està format per dos imants de NbFeB ($3\times 1\times 1.5\text{mm}^3$) i una biga de Cu-Be ($9\times 3\times 0.055\text{mm}^3$). Un dels imants està situat sobre la biga i l'altre, amb polaritat oposada, a sota (com s'observa en la Fig.II.13). Les bobines són de Cu electrodepositat i estan situades en cada un dels costats dels imants i de la biga. El número d'espires de cada bobina és 65 i la resistència mesurada és de 55Ω . La potència generada és de 584nW en un volum de 150mm^3 per a una freqüència de treball de 60Hz . Per tant, la densitat de potència generada correspondrà a $3.9\mu\text{W}/\text{cm}^3$ i la normalitzada a l'acceleració valdrà $4.8\mu\text{W}/\text{cm}^3\cdot\text{g}^2$.

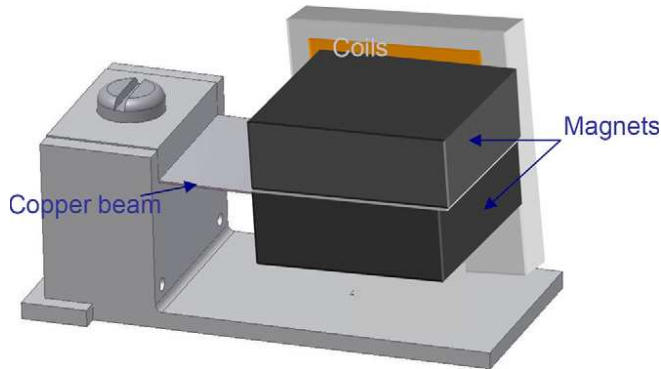


Fig.II.13 Representació esquemàtica del prototip electromagnètic realitzat per la universitat de Southampton amb el Tyndall National Institute [28].

Un altre dispositiu micromecanitzat, basat en una membrana enlloc de la biga, ha estat dissenyat per un grup de la universitat de Sheffield [14-17]. Aquest microgenerador, mostrat en la Fig.II.14, està format per un imant permanent de SmCo, amb un volum de 3mm^3 i una massa de 2.4mg , enganxat al dors d'una membrana polimèrica de 2.5mm de diàmetre, que s'estén en la cavitat gravada en l'oblea de GaAs, i una microbobina planar fixa d'au, en la cara posterior del dispositiu fabricada en una altra oblea per metal·lització i *lift-off*. La bobina d'au, amb una resistència de 31Ω , consta de 13 espires de $2.5\mu\text{m}$ de gruix, amb una amplada de pista de $20\mu\text{m}$ i una separació de $5\mu\text{m}$. Aquest prototip genera una pic de potència de $0.3\mu\text{W}$ per vibracions de $0.5\mu\text{m}$ d'amplitud i a una freqüència de 4.4kHz . Les potències mesurades són compatibles amb les esperades segons el model proposat pels autors a baixes amplituds d'excitació. No obstant, per amplituds elevades, hi ha un augment en la rigidesa de la membrana que produeix un canvi en la seva freqüència de ressonància i comporta una sortida inferior a la prevista. Si es considera que el volum total del prototip és de 25mm^3 , la densitat de potència val $12\mu\text{W}/\text{cm}^3$ i la densitat de potència normalitzada a l'acceleració correspon a $7.9\text{nW}/\text{cm}^3\cdot\text{g}^2$, (bastant inferior en comparació a l'obtingut amb el prototip desenvolupat en aquesta tesi).

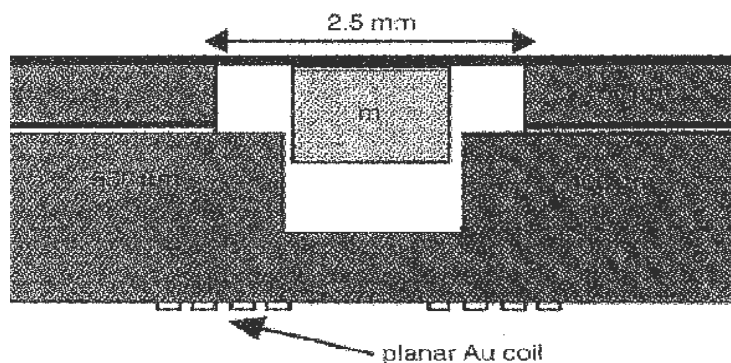


Fig.II.14 Representació esquemàtica del generador electromagnètic de la universitat de Sheffield amb una bobina planar fixa [16].

Un exemple de dispositiu totalment micromecanitzat és el desenvolupat pel grup de la universitat National Sun Yat-Sen de Taiwan [29]. Aquest microgenerador consta de la unió a baixa temperatura d'una microbobina planar de Cu electrodepositat sobre Si i un imant permanent de FePt dipositat per *sputtering* sobre la cara superior d'una estructura espiral elàstica, Fig.II.15. El disseny de l'espiral té $100\mu\text{m}$ d'amplada, $40\mu\text{m}$ de gruix i $100\mu\text{m}$ de forat. La bobina està formada per 50 espires de $15\mu\text{m}$ de gruix i $30\mu\text{m}$ de distància d'interespira. Aquest prototip pot generar un pic de voltatge de 40mV i una potència de sortida de $100\mu\text{W}$ a una freqüència de vibració de 60Hz . Si es considera que

el volum total del dispositiu és de 0.45cm^3 , la densitat de potència generada serà de $220\mu\text{W}/\text{cm}^3$. No obstant, aquests resultats són força sorprenents pels elevats valors de tensió i potència obtinguts malgrat que l'imant utilitzat és de capa prima i ha estat dipositat per "sputtering" en forma d'espiral. Com que el gruix màxim permès amb aquest mètode és únicament d'unes poques micres, el volum magnètic és reduït, es troba situat a una certa distància de la bobina i a més a més, la freqüència de la vibració és tan sols de 60Hz.

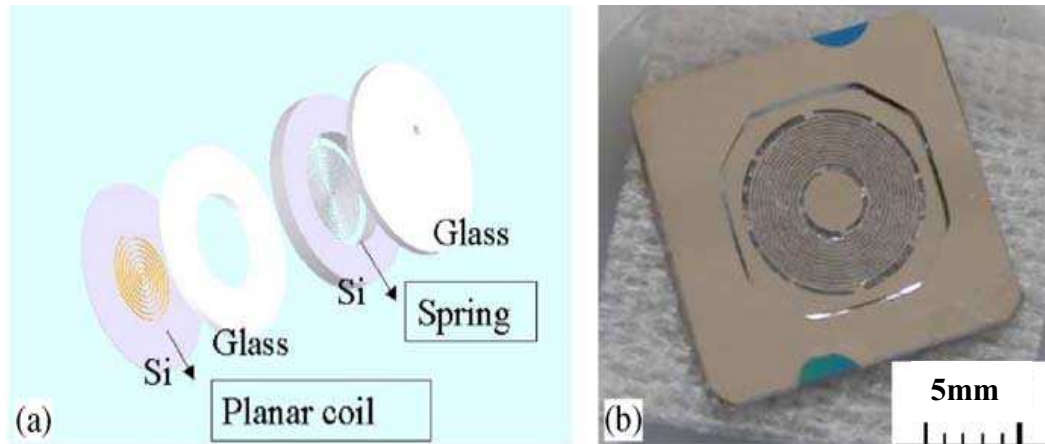


Fig.II.15 a)Representació esquemàtica del microgenerador magnètic desenvolupat per la universitat de National Sun Yun Yat-Sen de Taiwan b)Estructura d'una microbobina basada en el Si amb una membrana magnètica de FePt [29].

II.2.1.b. Dispositius comercials

Actualment ja es comercialitzen diversos dispositius que utilitzen la potència generada per sistemes magnètics inercials. Tots ells són a escala macro i empen bobines de tipus convencional.

Un dels dispositius més estesos comercialment són les llanternes [30, 31]. Estan basades en el moviment no ressonant d'una massa magnètica a través d'una bobina de fil de Cu que rebota en uns topes de goma situats en cada un dels extrems del recorregut. Un dispositiu típic és el de la imatge de la Fig.II.16. Aquest generador, amb un pes de 150gr, produeix 200mW gràcies a un moviment constant a la seva freqüència mecànica òptima d'aproximadament 200 cicles/minut.

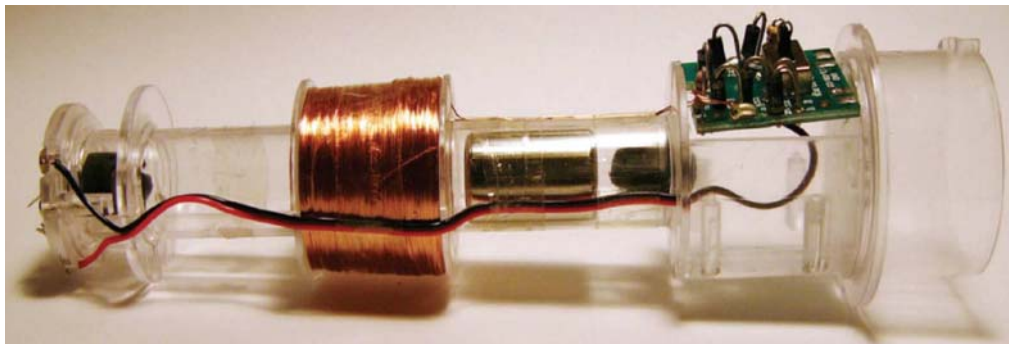


Fig.II.16 Generador solenoide inercial d'una llanterna comercial de diode de llum sacsejada [30, 31].

Un altre tipus de generador comercial, més innovador, que permet alimentar una xarxa de sensors sense fils, és el fabricat per Perpetuum, una empresa del Regne Unit "spin-off" de la universitat de Southampton. Segons les especificacions del fabricant, els generadors de la sèrie PMG, amb uns 130cm^3 de volum i una freqüència de treball entre els 100 i 120Hz, generen una potència de 3.5mW per un nivell de vibració operatiu de

0.1g (RMS) i 40mW per vibracions de 1g (RMS), essent g l'acceleració de la gravetat [32].

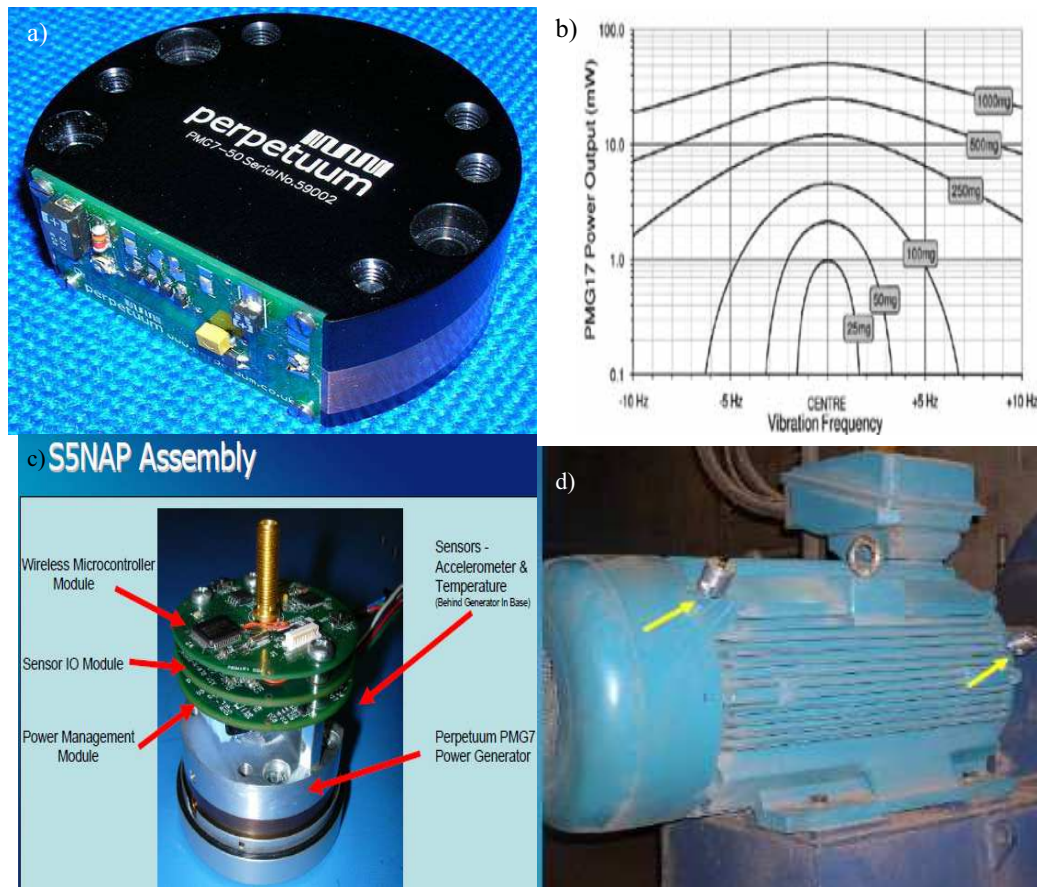


Fig.II.17 a) Imatge fotogràfica del generador Perpetuum PMG7 b) Potència de sortida del dispositiu PMG17 en funció de la freqüència de vibració per diferents nivells de vibració c) Imatge del assemblador S5NAP (consta d'un sistema sensor sense fils autoalimentat) d) Aplicació en el monitoratge sense fils de maquinària per disminuir-ne els costos de manteniment [32].

El macrogenerador comercial de la Fig.II.17 està dissenyat per a què per una freqüència de ressonància de 50Hz generi una potència d'uns 3mW en corrent altern, (AC, Altern Current), amb una acceleració de 0.5 m/s^2 RMS. El generador està format per una massa activa de 85g. amb un volum de 41.3 cm^3 , que a la vegada és la massa magnètica, i una bobina fixa per facilitar les connexions elèctriques

Aquest generador s'utilitza en sistemes sense cables per al monitoratge de la resistència d'eixos. Permet obtenir una informació a temps real valuosa en els casos de maquinàries, Fig.II.17d), vagons de mercaderies i trens de passatgers. L'objectiu és detectar a temps i solucionar problemes, per realitzar-ne el manteniment, abans que la seguretat es pugui veure afectada.

Uns altres generadors vibracionals similars són els comercialitzats per l'empresa Ferro Solutions, ubicada a U.S.A. [33]. El dispositiu VEH-460, mostrat en la Fig.II.18, produeix una potència de 5.2mW per vibracions de 0.1g a una freqüència de 60Hz. Si el volum del generador és de 170 cm^3 , la densitat de potència corresponent valdrà $31 \mu\text{W/cm}^3$.

Aquesta empresa també comercialitza un altre generador més eficient i de menor volum (75 cm^3), que per a unes vibracions de 0.1g a una freqüència de 21Hz, genera 9.3mW, que correspon a una densitat de potència de $120 \mu\text{W/cm}^3$ [1].

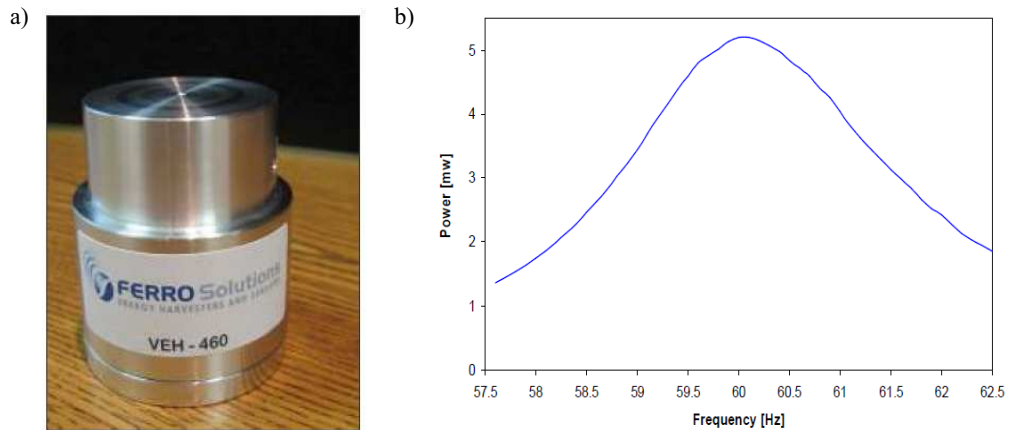


Fig.II.18 a) Imatge del dispositiu VEH-46 de FerroSolutions b) Potència rectificada DC amb una resistència de càrrega, $R_L=50K\Omega$ en funció de la freqüència [33].

L'empresa Lumedyne's V-Power technology [34] fabrica uns altres dispositius comercials que transformen vibracions en electricitat, Fig.II.19. Aquestes vibracions poden provenir de qualsevol tipus de font des de la vibració d'un motor fins el so d'una persona parlant. La tecnologia de V-Power permet generar energia AC RMS de les vibracions de fins a $22mW/cm^3$ per g d'acceleració. Segons el fabricant, en el futur aquests generadors seran capaços d'aprofitar vibracions de baix nivell (de fins a $10^{-3}g$).



Fig.II.19 Generador vibracional de Lumedyne [34].

Una altra empresa que té com a objectiu l'aprofitament de l'energia residual inercial en diferents camps és Tremont Electric [35], dedicada al desenvolupament i comercialització de generadors amb un ampli rang d'usos. L'obtenció d'aquesta energia renovable amb els dispositius dissenyats s'ha patentat com la generació d'energia cinètica nPower® technology [36].

Per a ús personal s'ha fabricat el *Personal Energy Generator* (PEG) mostrat en la Fig.II.20. Funciona amb el moviment humà i s'utilitza per carregar dispositius electrònics portàtils com ara: telèfons mòbils reproductors de MP3, càmeres... El seu pes és únicament d'uns 310g. L'emmagatzematge d'energia es realitza amb una bateria de Polímer de Li, amb una capacitat de 1000mAh (5V).

Malgrat que el fabricant no proporciona cap indicació tècnica sobre el funcionament del generador, especifica que a nivell pràctic, per 1 min de funcionament d'un iPod Nano es requereix caminar també 1min. En canvi, si es vol parlar 1min per un mòbil 2G es necessiten 11 minuts caminant però augmentaran a 26 min si el mòbil és 3G.

L'ús biomèdic el proporciona el *Biomedical Implantable Generator* (BIG). Permet alimentar marcapassos i desfibril·ladors automàtics.

En canvi, per a una utilització comercial s'empra el *Wave Energy Converter* (WEC), que genera quantitats comercials d'energia que pot ser subministrada a la xarxa elèctrica. S'ha demostrat que aquesta tecnologia permet augmentar la mida fins a gran escala i en

estar totalment segellat s'evita la corrosió marina, augmentant el temps de vida i minimitzant el manteniment.



Fig.II.20 Generador d'energia personal, (PEG) a)Imatge fotogràfica b)Representació esquemàtica [35, 36].

Tots els prototips comercials consten d'un imant mòbil i són a mida macro a diferència de l'objectiu d'aquesta tesi que seria fabricar un microgenerador vibracional.

II.2.2. Generadors híbrids

Els generadors híbrids són dispositius de tipus vibracional que poden generar energia gràcies a màquines rotacionals. La seva funció és ampliar el rang de freqüències de treball dels generadors vibracionals.

Els dispositius desenvolupats, reportats en la literatura, normalment estan basats en la implementació de dissenys que inclouen un rotor magnètic excèntric i una bobina fixa. Això permet obtenir una rotació de l'imant a partir de desplaçaments a baixa freqüència. Per tant, aquests sistemes són adequats per a l'aprofitament de l'energia associada als moviments amb freqüències en el rang dels Hz i d'amplitud gran, com els induïts per les onades.

Els dissenys permeten assolir densitats de potència en un rang entre els $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ i els mW/cm^3 . Cal destacar-ne els sistemes desenvolupats en grups de Seiko [37-40], la companyia suïssa ETA Autoquartz [30, 41, 42], la Universitat de Tokio [43-44] i HSG-IMIT en Alemanya [45] i, més recentment, el grup d'investigació del centre IMEC-NL en Holanda [46].

II.2.2.a. Dispositius a nivell d'investigació

Un dels treballs d'investigació a destacar és el realitzat per un grup de la Universitat de Tokyo [44], que presenta un generador híbrid a mida macro amb la intenció de produir una potència elevada. Es van construir diversos prototips amb parts intercanviables per explorar experimentalment la seva dinàmica, Fig.II.21.

Es va demostrar que s'ha d'excedir d'una amplitud de vibració crítica per induir una rotació contínua del rotor. Un cop el rotor ha assolit el mode de rotació autoexcitat, el promig del quadrat de la velocitat de rotació, que és proporcional a la potència de la sortida, serà uns deu cops la del moviment de balanceig.

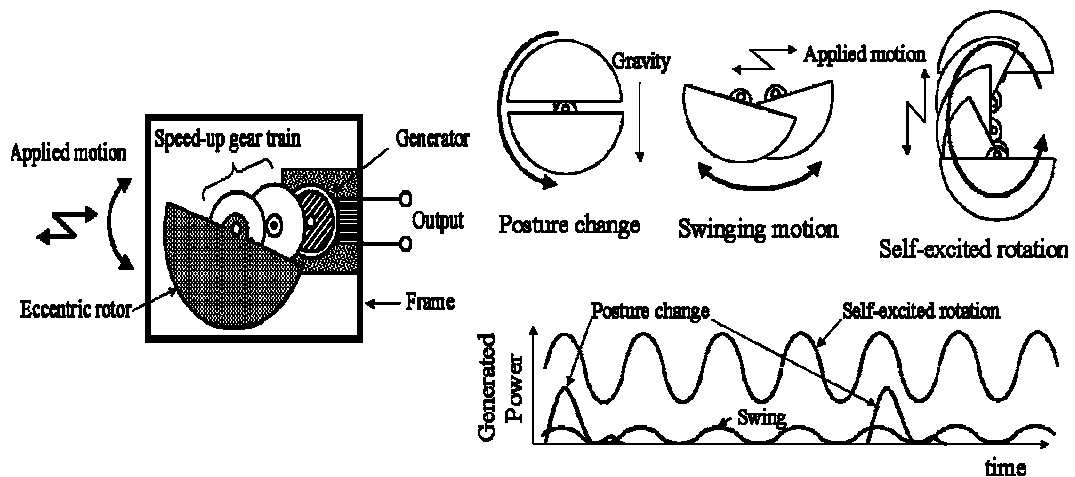


Fig.II.21 Representació esquemàtica dels diferents moviments d'un rotor excèntric [44].

En el cas d'aquest dispositiu generador, que consta d'un rotor excèntric amb un volum de 25cm^3 , la potència generada amb una freqüència d'excitació de 2Hz i 1cm d'amplitud és de 0.17mW . Per tant, la densitat de potència correspon a $6.8\mu\text{W}/\text{cm}^3$ i la normalitzada a l'acceleració val $0.27\text{mW}/\text{cm}^3 \cdot g^2$.

Posteriorment, en l'Institut HSG-IMIT d'Alemanya [45], han ideat un altre generador per convertir la vibració lineal en moviment de rotació, aprofitant el flux axial d'un imant permanent de forma similar al dispositiu desenvolupat per Holmes [47]. Aprofita que sota certes condicions inicials i geomètriques, l'excitació mecànica del dispositiu produeix una rotació caòtica del pèndol. Aquesta rotació fa que els imants encastats causin una variació del flux en les bobines de l'estator, tot induint un voltatge, Fig.II.22a). A diferència dels generadors no ressonants de la indústria rellotgera, aquest prototip emprava vibracions de petites amplituds enlloc dels moviments estocàstics de canell. Els principals avantatges d'aquest tipus de conversió són la utilització de baixes freqüències. A més, tenir 2 graus de llibertat permet generar energia amb una gran amplada de banda de freqüències.

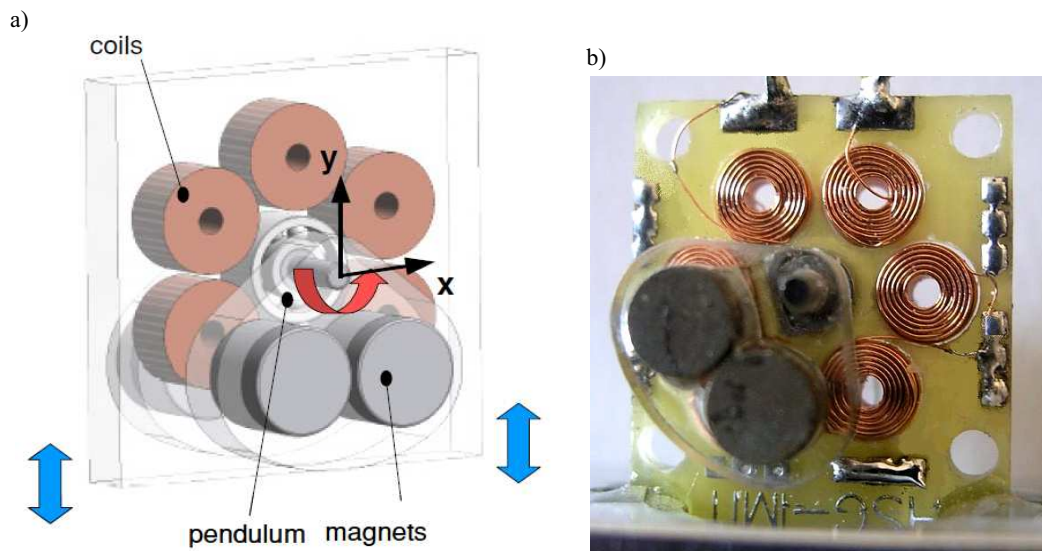


Fig.II.22 a) Representació esquemàtica del dispositiu generador no ressonant ideat per l'Institut HSG-IMIT d'Alemanya b) Imatge fotogràfica del prototip d'una vibració inductiva no ressonant [45].

S'ha simulat la resposta d'aquest tipus de dispositius a escala mil·limètrica i micromètrica, per trobar quina és la rotació caòtica que podria ser induïda, quan l'amplitud de la vibració s'aproxima a la distància d'excentricitat del rotor. Per a baixes freqüències de vibració aplicades a dispositius MEMS es pot obtenir una velocitat de rotació promig superior als $200\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$. També s'estudia la influència d'una desviació de l'excitació harmònica. Per fer-ho s'analitza el valor promig de la rotació angular per a diferents formes de la vibració. S'ha de tenir en compte que la potència de sortida és proporcional al quadrat de la velocitat angular.

A més a més de les simulacions també s'ha fabricat el prototip de la Fig.II.22b), amb un volum de 1.5cm^3 , que consta d'unes bobines convencionals i imants de 2mm de diàmetre situats en el rotor. Al aplicar-li una excitació amb una amplitud de vibració de $75\mu\text{m}$ i una freqüència de 80Hz, corresponent a uns 2g, genera una potència de 3mW. La densitat de potència associada és $2\text{mW}/\text{cm}^3$ i la normalitzada a l'excitació és $550\mu\text{W}/\text{cm}^3\cdot\text{g}^2$.

Un altre tipus diferent de generador híbrid és el reportat per un grup d'investigació del centre IMEC-NL a Holanda [46]. El generador electromagnètic desenvolupat està basat en la utilització d'imants circulars, que es desplacen sobre un marc on s'ha integrat una distribució de bobines planars. Aquest dispositiu consta d'un imant permanent que actua com a massa sísmica i es pot moure lliurement al llarg de l'eix del dispositiu, en el que hi ha una fila de microbobines electrodepositades amb dos topes magnètics als extrems, Fig.II.23a). Cada vegada que l'imat passa per sobre una bobina s'indueix un voltatge. El prototip fabricat de la Fig.II.23b), amb un volum d'uns quants cm^3 , utilitza bobines convencionals connectades a una resistència de càrrega de 500Ω . Al sacsejar-lo amb una freqüència de 5Hz i 20mm d'amplitud, es genera un voltatge de 500mV i una potència de $100\mu\text{W}$. En el futur, es preveu reduir la mida substituint les bobines convencionals per electrodepositades i emprant imants en miniatura, amb diàmetres de 1mm.

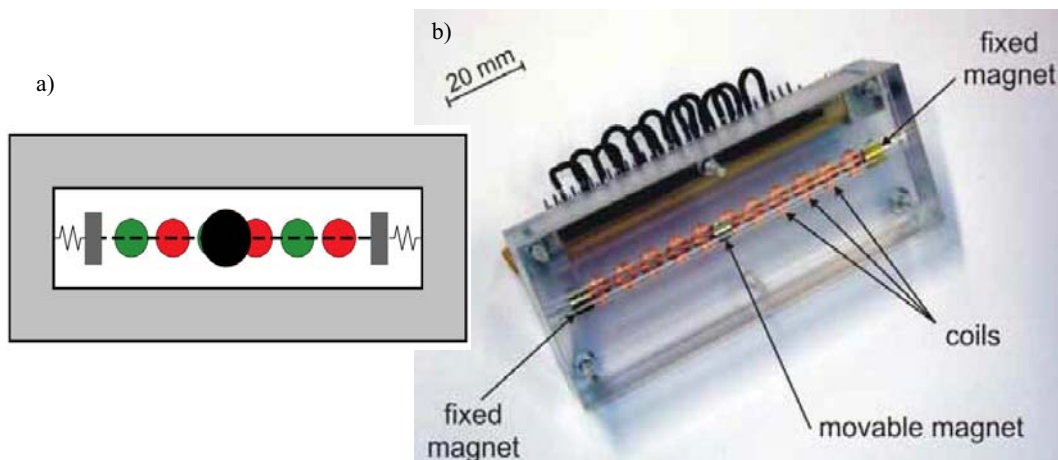


Fig.II.23 a) Representació esquemàtica del dispositiu proposat per l'IMEC-NL b) Imatge del prototip [46].

II.2.2.b. Dispositius comercials

Els principals dispositius comercials estan basats en rellotges d'autocàrrega, que aprofiten el moviment de la persona que el porta, per carregar el seus mecanismes. Els rellotges de polsera moderns contenen una massa de prova d'uns 2g muntada fora del centre de l'eix, per afavorir el gir tot carregant el mecanisme amb el moviment.

Els rellotges de quars com el Swatch Autoquartz i l'ETA-204, observat en la Fig.II.24, utilitzen com a font d'energia el sistema *kinetic*. Aquest sistema microgenerador que converteix el moviment humà en energia elèctrica, desenvolupat per Kinetron, consta d'una massa excèntrica que tensa una molla mitjançant un rectificador mecànic. Aquesta

molla és la que fa funcionar el microgenerador kinetron (MG204 o MG205) [42]. La molla es destensarà quan la torsió sigui més elevada que el límit necessari per moure el rotor del microgenerador. El microgenerador assoleix una velocitat entre els 5 i 15krpm i genera una energia d'uns $10\mu\text{W}$ que s'emmagatzema en una bateria de Li-ion recarregable. Si el seu volum correspon a uns 2.1cm^3 , la densitat de potència associada és $4.8\mu\text{W}/\text{cm}^3$ i la normalitzada a l'excitació és $190\mu\text{W}/\text{cm}^3\cdot\text{g}^2$.

Aquest microgenerador, optimitzat per ser col·locat en el canell, únicament requereix una inclinació de 25° per generar energia. Per tant, només el fet de dur-lo posat generarà energia suficient per fer-lo funcionar. El total d'energia generada per dia és d'uns 400mJ.

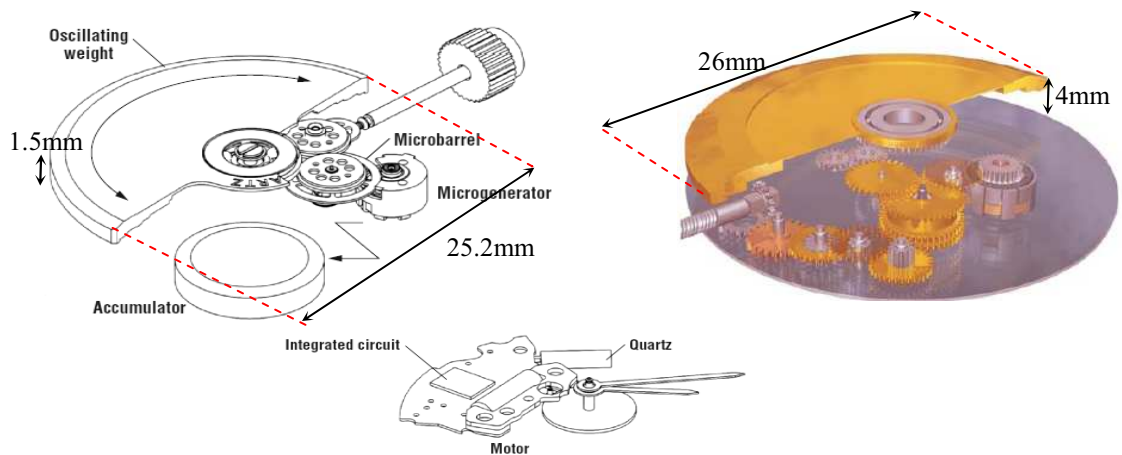


Fig.II.24 Disseny d'ETA Autoquartz [42].

Un altre disseny comercial de rellotge és el proposat per Seiko. El seu disseny, mostrat en l'esquema de la Fig.II.25, també consta d'una massa de prova asimètrica que rota lliurement al voltant d'un punt a una certa distància del centre de massa i està lligada al generador elèctric a través d'una relació de transmissió alta (factor 100) [37-40]. El corrent generat carrega un condensador, que alimenta els circuits del rellotge.

Les principals diferències d'aquest rellotge respecte al disseny anterior són l'omissió de la molla intermèdia i la generació d'una energia promig de $5\mu\text{W}$ mentre es duu posat i 1mW quan es sacseja. No obstant, els pics de potència generada són similars als obtinguts amb l'Autoquartz.

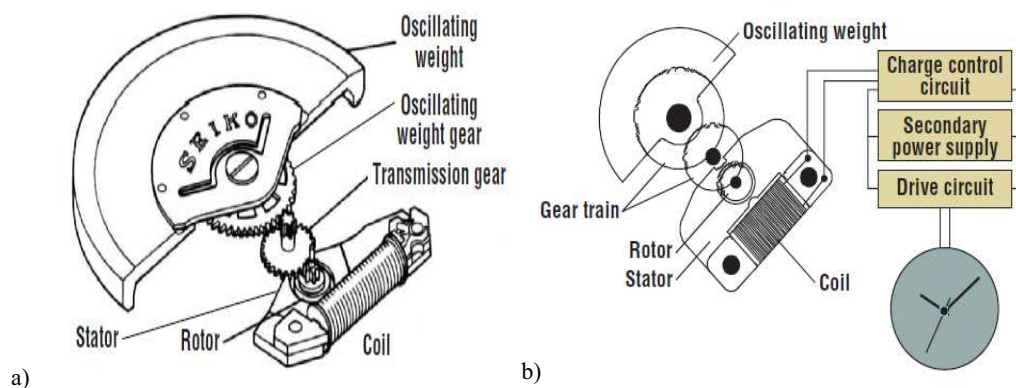


Fig.II.25 Representació esquemàtica del Seiko AGS (Automatic Generation System) [37-40].

En general, aquests generadors híbrids presenten una densitat de potències equivalents a la dels vibracionals amb avantatges com una amplada de banda de freqüència de la resposta i la sensibilitat en dos eixos enlloc d'un. No obstant, va lligada a una major complexitat tecnològica que suposa un alt cost i, fins ara, no s'han desenvolupat per ser integrables en MEMS (Microelectromechanics Systems).

II.3. Problemàtica en la miniaturització i conseqüències en la densitat de potència

Per estudiar la problemàtica de la miniaturització dels generadors electromagnètics en el seu funcionament s'analitza com influeix la mida en els diferents paràmetres: camps magnètics, esmorteïments paràsit i electromagnètic.

Si es vol comparar l'energia generada pels diferents generadors vibracionals s'hauria de normalitzar la potència obtinguda al volum del dispositiu i a una mateixa acceleració.

En els articles de Beeby [48, 49], per comparar les potències es normalitzen a l'acceleració de 3m/s^2 , emprada per testejar la microbiga. Experimentalment segons els generadors analitzats pels autors, els fabricats a escala macro mostren una densitat de potència de fins als 2.6mW/cm^3 [50], molt superior en comparació a la màxima de $47\mu\text{W/cm}^3$ que podrien donar els microgeneradors [20]. Per tant, a nivell experimental s'observa que una miniaturització dels generadors inercials electromagnètics vibracionals comportaria una disminució dràstica en la densitat de potència generada i seria interessant fer un estudi de les causes.

Els macrogeneradors mostren una alta densitat de potència deguda a l'ús d'imants en l'escala dels mil·límetres, que produeixen una densitat de flux elevada, i a una major velocitat de l'imant, encara que les acceleracions siguin menors.

En canvi, els microgeneradors patiran una reducció de l'acoblament electromagnètic entre la bobina i els imants, marcat pels coeficients d'esmorteïment electromagnètic, ζ_g , i paràsit, ζ_p . Aquesta reducció de l'acoblament electromagnètic es deguda a l'augment de la resistència de la bobina al reduir les seves mides. Això implicarà que, a escala micromètrica, no tindrà lloc la condició de potència òptima generada dels macrogeneradors, en què l'esmorteïment paràsit ha de ser igual al electromagnètic, $\zeta_p = \zeta_g$. Això és corroborat pel fet que la resistència de càrrega òptima, R_L , sigui molt propera a la resistència en sèrie de la bobina, R_c , condició que succeeix quan $\zeta_p \gg \zeta_g$.

En l'article [51], s'estudien de forma més detallada els efectes de l'escalat en els camps magnètics, en els paràmetres de les bobines i en l'esmorteïment electromagnètic. L'anàlisi es realitza tant amb la tecnologia de bobinat amb fil convencional com amb la de microfabricació de bobines. L'estructura del generador electromagnètic, emprada en les simulacions, està formada per una bobina fixa situada entre imants mòbils, com s'observa en la Fig.II.26.

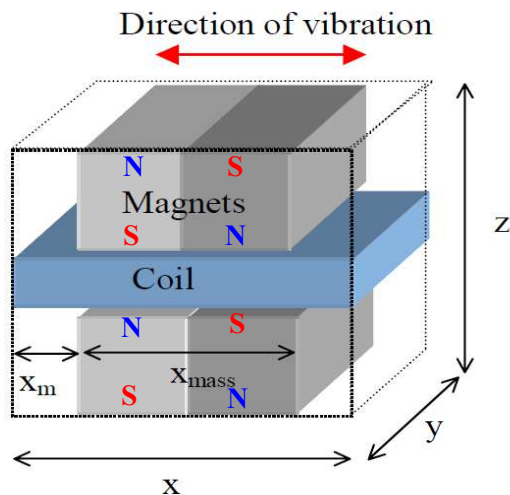


Fig.II.26 Representació esquemàtica d'un generador electromagnètic vibracional. La vibració dels imants respecte a la bobina fixa es produeix en la direcció x [51].

Tant els imants superiors com els inferiors, estan formats per un parell d'imants polaritzats de forma oposada. Aquest tipus de polaritat crea un gradient de flux en la bobina segons la direcció del moviment. Les equacions del moviment que regeixen aquest sistema ressonant esmorteït són les deduïdes en l'article de Mitcheson [52].

En l'anàlisi de l'escalat s'assumeix que, si una de les dimensions es redueix, les altres dimensions relatives es mantenen constants. Per trobar la dependència del valor de la potència de ressonància, P_{res} , amb la dimensió es necessita conèixer el valor de l'esmorteïment electromagnètic, D_g .

$$P_{res} = \frac{D_g F_0^2}{2(D_p + D_g)^2} \quad (\text{II.1})$$

on F_0 és la força d'excitació externa i D_p és l'esmorteïment paràsit. Els valors dels esmorteïments electromagnètic i paràsit normalitzats s'expressen com:

$$\zeta_g = \frac{D_g}{2m\omega_n} \quad (\text{II.2})$$

$$\zeta_p = \frac{D_p}{2m\omega_n} \quad (\text{II.3})$$

essent ω_n la freqüència de ressonància angular i m la massa de l'imant. Per tant, els paràmetres a estudiar en el generador són la resistència de la bobina i els esmorteïments electromagnètic i paràsit.

Camps magnètics

En l'estudi dels camps magnètics el paràmetre clau és el gradient de flux de la bobina (depèn de la seva àrea). Segons [51], l'esmorteïment electromagnètic, D_g , es pot expressar com:

$$D_g = N^2 \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 \frac{1}{(R_c + R_L + j\omega L_c)} \quad (\text{II.4})$$

essent N el número d'espines, $d\Phi/dx$ el gradient de flux promig en l'àrea d'una espira de la bobina, R_c la resistència en sèrie d'una bobina, L_c la inductància d'una bobina i R_L la resistència de càrrega. Aquesta equació mostra com maximitzar el gradient de flux implica maximitzar l'esmorteïment electromagnètic. Seria d'esperar que el camp magnètic es mantingués constant al reduir l'escala i el gradient del flux augmentés. No obstant, el paràmetre clau és el gradient de flux en la superfície de la bobina. Per tant, si es redueix cada una de les dimensions del generador en un factor "a", el gradient de la densitat de flux augmentarà en el mateix factor "a" i l'àrea de la bobina decreixerà en un factor "a²". Aleshores, l'efecte total de l'escalat cap a una dimensió més petita, en el gradient de flux en la bobina, serà decreixer un factor "a".

Aquesta reducció ha estat verificada amb l'anàlisi per elements finits (FEA). La gràfica de la Fig.II.27 mostra la dependència lineal del gradient de flux en l'àrea de la bobina amb la dimensió del generador.

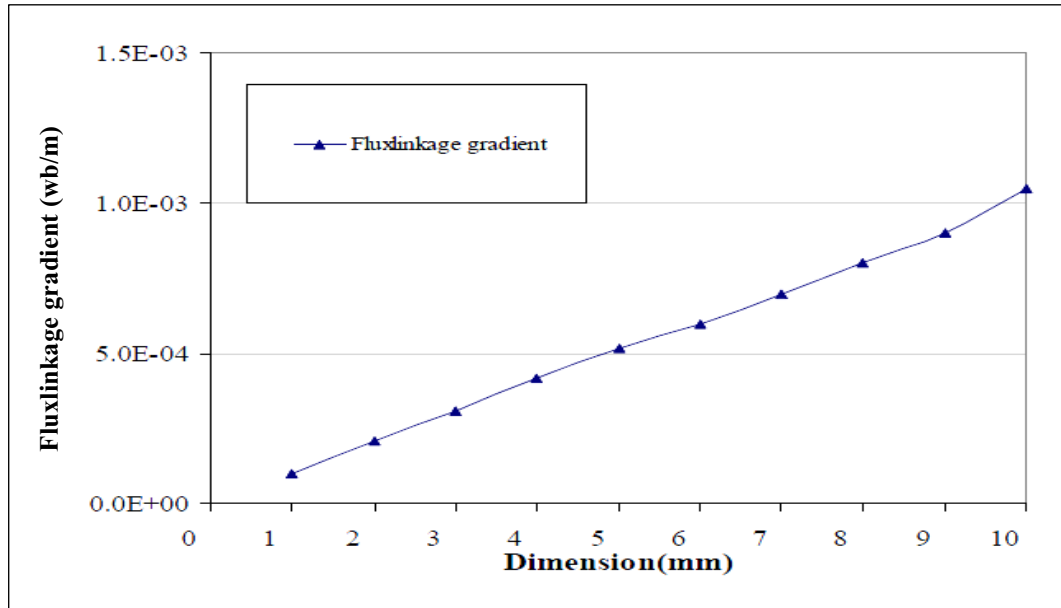


Fig.II.27 Gradient de flux de la bobina $d\Phi/dx$ amb la mida del generador [51].

Resistència de la bobina

Els paràmetres d'una bobina, com ara el número d'espores, la resistència i la inductància no són independents. Si es fixa el volum de la bobina, aleshores la resistència i la inductància dependran del número d'espores. A més, aquesta dependència variarà en funció del mètode utilitzat en la fabricació de bobines. Les dues principals tècniques de fabricació són la utilització d'un bobinat convencional de fil conductor i la microfabricació de bobines planars.

En el cas d'un bobinat convencional, assumint una bobina circular multicapa amb fil de Cu amb un radi interior, r_i i un radi extern, r_o , la resistència de la bobina, R_c , es pot expressar com :

$$R_c = \frac{\rho_{Cu} N L_{MT}}{A_{wire}} \quad (II.5)$$

on ρ_{Cu} és la resistivitat del conductor (Cu), L_{MT} és la longitud mitja de les espores, A_{wire} és l'àrea de la secció transversal assumint un factor d'ompliment de Cu, k_{Cu} . Aquest factor depèn de les característiques del fil de la bobina i varia entre 0.5 i 0.6 [53].

$$A_{wire} = \frac{k_{Cu} A_{coil} t}{N} \quad (II.6)$$

essent t , el gruix de la bobina i A_{coil} , l'àrea ocupada per la bobina:

$$A_{coil} = \pi (r_o - r_i)^2 \quad (II.7)$$

i expressant la longitud mitja de les espores com:

$$L_{MT} = \pi (r_o + r_i) \quad (II.8)$$

Substituint (II.6) i (II.8) en (II.5) i tenint en compte els radis de la bobina, s'obté:

$$R_c = \frac{\rho_{Cu} N^2 (r_o + r_i)}{k_{cu} (r_o - r_i)^2 t} \quad (II.9)$$

La inductància de la bobina també es pot expressar en funció del número d'espores i de la seva geometria. No obstant, en el rang de freqüències en les que treballen aquest tipus de dispositius (de l'ordre del 1kHz), es pot considerar-la negligible en comparació amb la seva resistència. Aleshores, segons l'equació (II.9), per a un número d'espores constant i

suposant k_{Cu} constant, la resistència d'una bobina convencional és proporcional a la inversa del factor d'escalat.

En canvi, per al cas de les bobines microfabricades la resistència s'expressa en termes de l'amplada de la bobina, w , l'espai entre pistes, s , el gruix de les pistes, t , i les dimensions externa i interna de la bobina, d_o i d_i , respectivament. Prenent $w = s = t$, la resistència per a una única capa resulta ser:

$$R_c = \frac{8\rho_{Cu}(d_o + d_i)}{(d_o - d_i)^2} (4N^3 - 4N^2 + N) \quad (\text{II.10})$$

Per a valors elevats de N la dependència de la resistència amb N és aproximadament cúbica. En aquest cas, per a un número constant d'espines, la resistència de la bobina serà també inversament proporcional al factor d'escalat.

El número d'espines en una àrea augmenta en funció del que permet la tecnologia emprada. Si en les bobines convencionals el diàmetre mínim és de $12\mu\text{m}$, en les microbobines utilitzant processos avançats es pot arribar fins a la micra d'amplada de pista (límit de la fotolitografia estàndard). Per tant, els efectes del reescalat seran molt més importants que en les bobines convencionals.

Esmorteïment electromagnètic:

Les equacions (II.9) i (II.10) mostren com la resistència de la bobina és inversament proporcional al factor d'escalat. Això suggereix que l'esmoreïment electromagnètic presenta una dependència cúbica amb aquest factor. No obstant, es pot compensar fins a un cert punt gràcies a la dependència amb l'esmoreïment electromagnètic, incrementant el número d'espines i disminuint la resistència en sèrie, (II.4). Malgrat tot, el grau en què es pot fer, depèn de la relació entre la resistència de la bobina i el número d'espines.

En el cas d'un bobinat convencional l'esmoreïment electromagnètic augmentarà amb el número d'espines perquè la resistència de la bobina augmenta amb N^2 .

En canvi, per al cas d'una bobina microfabricada la resistència de la bobina creix de forma proporcional a N^3 . Per tant, en aquest cas, un increment en el número d'espines reduiria l'esmoreïment electromagnètic.

Esmorteïment paràsit:

El factor de qualitat és un paràmetre adimensional utilitzat per descriure l'esmoreïment:

$$Q = \frac{f_o}{\Delta f} \quad (\text{II.11})$$

on f_o és la freqüència de ressonància i Δf correspon a l'amplada de banda [54]. Si l'esmoreïment és petit, el factor de qualitat és elevat i la corba de ressonància es aguda.

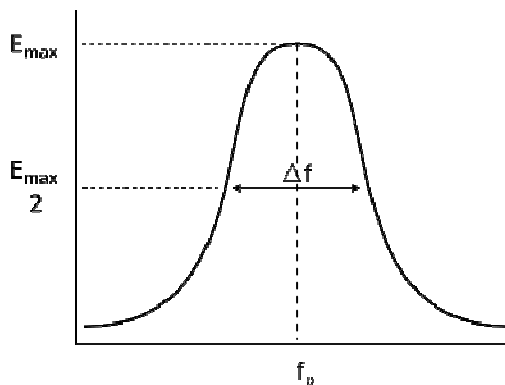


Fig.II.28 Energia d'una vibració, E , en funció de la freqüència f_o [54].

L'escorment paràsit és degut a efectes com són els escorments de l'aire, de compressió deguda a la membrana, al fregament per la subjecció de la biga i a l'escorment termoelàstic. Malgrat els esforços realitzats per trobar expressions analítiques dels diferents mecanismes d'escorment dels dispositius ressonadors MEMS basats en el Si [55] i [56], no s'han pogut estimar sense definir les dimensions de la biga i el material.

En absència d'escorment electromagnètic, es necessiten factors de qualitat de 10000 per obtenir l'energia màxima d'estructures basades en bigues de Si [57]. En canvi, els generadors fabricats presenten uns factors de qualitat de només uns quants centenars [49]. Per tant, per a la seva optimització és important un estudi en profunditat dels mecanismes d'escorment paràsit.

Anàlisi dels efectes de l'escalat

L'estudi dels efectes de l'escalat en la potència generada per un generador electromagnètic es realitza prenent una vibració amb una freqüència de 1kHz i una acceleració de 9.81m/s^2 . Els imants són de NdFeB. Segons [52], l'equació de la potència màxima, P_{max} , depèn del quadrat de la massa.

$$P_{max} = \frac{D_g (ma)^2}{2(D_p + D_g)^2} \quad (\text{II.12})$$

essent a l'acceleració.

Existeixen dues estratègies per maximitzar la potència obtinguda pel generador. Si D_p és comparable a D_g , la potència es maximitza al igualar-se, escollint la R_L i el número d'espines adequats:

$$P_{max} = \frac{(ma)^2}{8D_g} = \frac{(ma)^2}{8D_p} \quad (\text{II.13})$$

Emprant la relació d'escorment, $\zeta_p = D_p / (2m\omega_n)$ i el factor de qualitat del sistema en circuit obert, $Q_{oc} = 1 / 2\zeta_p$ s'obté:

$$P_{max} = \frac{ma^2}{8\omega_n} Q_{oc} \quad (\text{II.14})$$

En canvi si l'escorment paràsit és elevat, l'escorment electromagnètic no podrà igualar-lo, $D_p \gg D_g$. Aleshores, la manera de maximitzar la potència és igualar la resistència de càrrega, R_L , amb la de la bobina, R_c . L'expressió de la potència màxima resultant s'expressa com:

$$P_{max} = \frac{D_g (ma)^2}{2D_p^2} \quad (\text{II.15})$$

En la gràfica de la *Fig.II.29*, es mostra la variació de la potència màxima, P_{max} , i la de càrrega, $P_L = P \frac{R_L}{R_L + R_c}$ (fracció de potència aplicada a la càrrega resistiva) en funció de les dimensions del generador (entre 1mm i 10mm) tant en bobines convencionals com en bobines microfabricades.

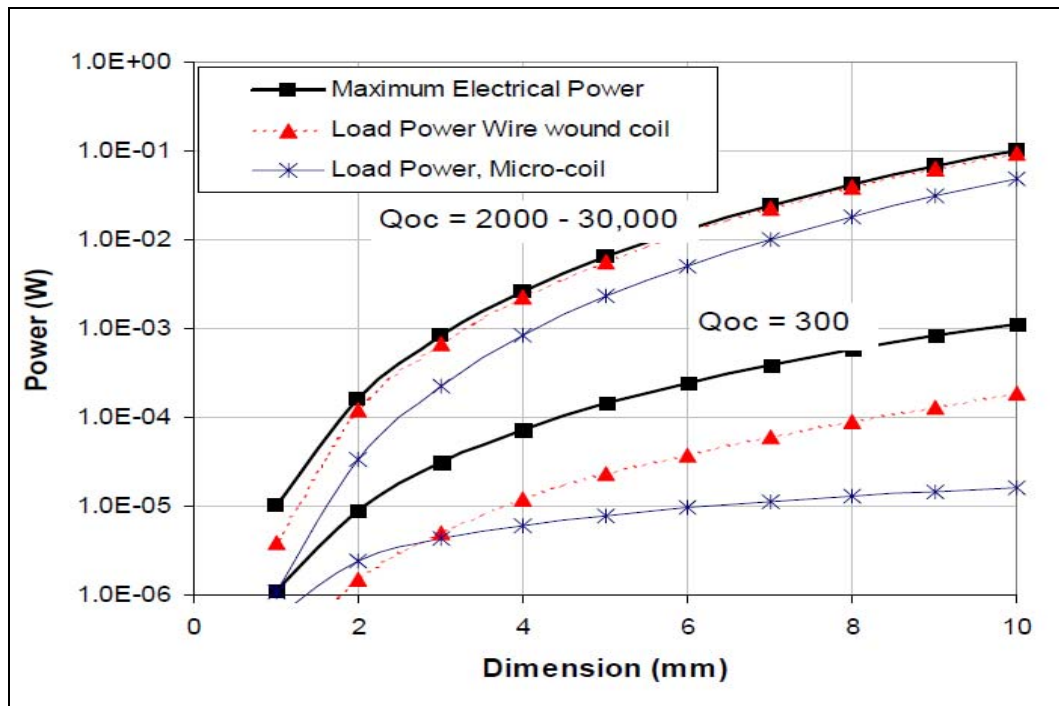


Fig.II.29 Potència màxima, P_{max} i potència entregada a la resistència de càrrega, P_L , per un generador amb dimensions entre 1mm i 10mm [51], comparant els resultats de generadors amb diferents factors de qualitat Q_{oc} .

Les corbes representades amb valors de factors de qualitat Q elevats (entre els 2000 i 30000), permeten un desplaçament màxim 2 vegades superior a l'obtingut per un factor de qualitat $Q=300$ (valor mesurat típic dels generadors actuals).

Per a valors del factor Q elevats les característiques de les bobines convencionals permeten obtenir un esmorteïment electromagnètic igual al paràsit. No obstant, per a dimensions petites, el número d'espores està limitat pel diàmetre mínim de l'espira (s'agafa $12\mu\text{m}$). En el cas de les microbobines, degut a l'alta resistència, l'esmorteïment electromagnètic serà sempre inferior al paràsit.

Si el factor Q és de 300, l'esmorteïment paràsit és un ordre de magnitud més elevat que el màxim esmorteïment electromagnètic que es podria assolir inclús amb una bobina convencional. En aquesta situació, el desplaçament és molt menor que el màxim permès i es troba limitat per l'esmorteïment paràsit. Per tant, els canvis en l'esmorteïment electromagnètic no influiran en el desplaçament. En aquest cas, s'escollirà una resistència de càrrega igual a la resistència de la bobina, per maximitzar l'energia generada en la càrrega.

La gràfica de la Fig.II.29 mostra que per a factors Q elevats la potència teòrica màxima s'obté emprant un generador amb una bobina convencional. La causa és que les bobines convencionals presenten un esmorteïment electromagnètic elevat i perden poca potència degut a la seva baixa resistència. No obstant, només una fracció de l'energia teòrica màxima es podrà extreure emprant una microbobina perquè una resistència elevada en limitaria l'esmorteïment electromagnètic i també n'augmentaria les pèrdues.

No obstant, per a algunes dimensions la potència obtinguda per una microbobina pot ser superior a la d'una convencional, degut a les limitacions en el diàmetre mínim del fil. La mateixa tendència s'observa en les tensions, com es pot veure en la Fig.II.30.

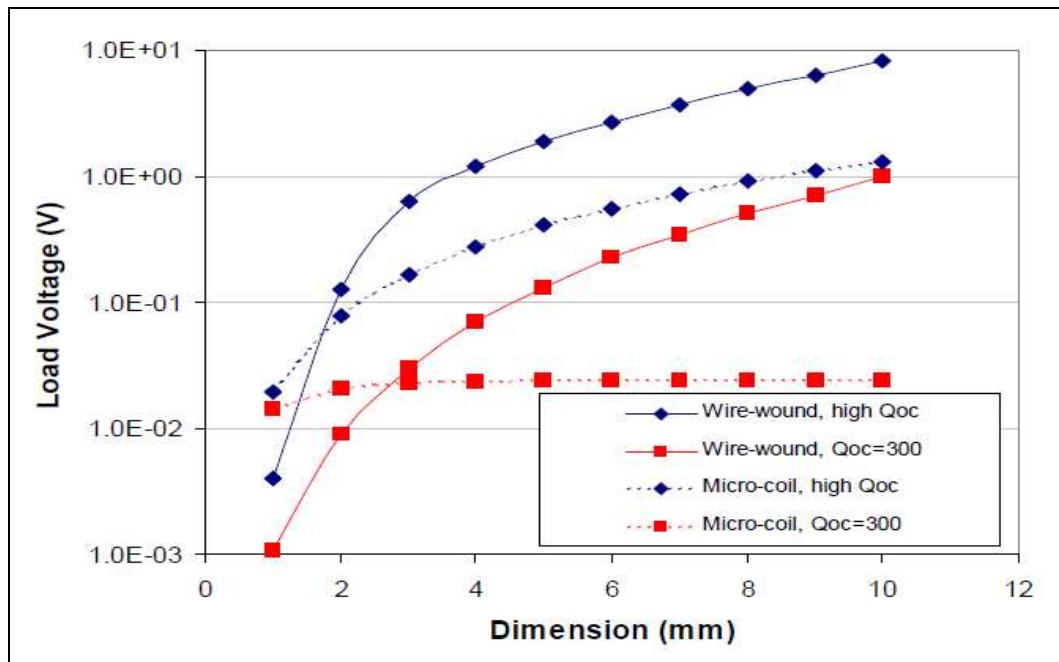


Fig. II.30 Voltatge de càrrega per un generador amb dimensions entre 1mm i 10mm [51].

Les simulacions d'aquesta gràfica mostren com els voltatges de càrrega obtinguts amb les microbobines són massa baixos, per a una rectificació convencional del senyal, si el factor de qualitat és baix.

II.4. Conclusions

L'objectiu d'aquesta tesi és el disseny i fabricació d'un microgenerador inercial electromagnètic. L'escalabilitat del flux és una característica d'aquests generadors que en permetria la seva miniaturització. Dels diferents generadors electromagnètics de la literatura analitzats s'ha observat que els vibracionals, amb un disseny generalment més simple que el dels generadors híbrids, serien els més adequats. Aquesta simplicitat en el disseny podria facilitar la seva miniaturització. No obstant, els generadors vibracionals operen a una freqüència de ressonància molt ben definida. En aquest cas, com l'objectiu seria aprofitar les vibracions d'un motor, únicament implicaria dissenyar el ressonador perquè la seva freqüència de ressonància coincidís amb la d'excitació.

Després s'optaria per un disseny amb la bobina fixa, per facilitar-ne les connexions elèctriques, i s'aprofitaria l'imant mòbil com a massa inercial. Posteriorment, entre aquest tipus de dispositius s'escollirien els de disseny més simple i es descartarien els dissenys amb bigues perquè podrien implicar una major fragilitat del dispositiu. Per tant, el disseny que podria ser més adient, tant a nivell de robustesa com en les possibilitats de miniaturitzar-lo per ser integrat en tecnologia MEMS, seria el d'una membrana ressonant amb un imant mòbil situat a sobre i una bobina fixa en el marc de la membrana.

De les simulacions realitzades per al cas de generadors vibracionals es pot deduir que per a un factor de qualitat suficientment alt el seu funcionament no estarà limitat si la bobina emprada és de tipus convencional. En aquest cas, la potència és proporcional a la dimensió elevada a un factor 4. No obstant, l'ús de bobines microfabricades tendeix a limitar el funcionament del microgenerador degut a la elevada resistència. Malgrat tot, les bobines microfabricades podrien tenir millor funcionament que les convencionals per a mides petites degut a les limitacions del diàmetre mínim del fil. Les mesures del factor de qualitat dels microgeneradors fabricats el mostren com una limitació i per tant, es requerirà de nous estudis per augmentar-lo.

Bibliografia:

- [1].-D.P.Arnold, "Review of Microscale Magnetic Power Generation", IEEE Transaction on Magnetics 43 (2007) 3940-3951
- [2].-R.Amirtharajah and A.Chandrakasan, "Self-Powered Signal Processing Using Vibration-Based Power Generation,"IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 33, No. 5, May 1998, pp. 687-695.
- [3].-Neil N.H.Ching, H.Y.Wong, Wen J.Li, Philip H.W.Leong and Zhiyu Wen, "A laser-micromachined multi-modal resonating power transducer for wireless sensing systems", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 97-98, pp.685-690, 2002
- [4].-E.P.James, M.J.Tudor, S.P.Beeby, N.R.Harris, P.Glynne-Jones, J.N.Ross, and N.M.White. "An investigation of self-powered systems for condition monitoring applications" Sensors and Actuators A: Physical, 110:171-176, February 2004
- [5].-Glynne-Jones P., Tudor M.J, Beeby S.P. and White N.M. 2004, "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems" Sensors Actuators A 110 344-49
- [6].-Neil N.H.Ching, Gordon M.H. Chan, Wen J.Li, Hiu Yung Wong, and Philip H. W. Leong, "PCB-integrated Micro-generator Arrays for Wireless Systems", Proceedings of the International Symposium on Smart Structures and Microsystems, Oct. 19-21, 2000, Hong Kong.
- [7].-R.Amirtharajah, "Design of low power VLSI systems powered by ambient mechanical vibration," Ph.D. dissertation, Massachusetts Inst.Technol., Cambridge, Jun. 1999.
- [8].- Panasonic, **EAS2P20** Datasheet: Micro Speaker.
- [9].-W.J.Li, Z.Wen, P.K.Wong, G.M.H.Chan, and P.H.W.Leong, "A micromachined vibration-induced power generator for low power sensors of robotic systems", In Proceedings of the World Automation Congress: 8th International Symposium on Robotics with Applications, 2000.
- [10].-S.P.Beeby, M.J.Tudor, E.Koukharenko, N.M.White, T.O'Donnell, C.Saha, S.Kulkarni and S.Roy, (2005) ,"Design and performance of a microelectromagnetic vibration-powered generator", The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, June 5-9th, Seoul, Korea. Pp. 780-783.
- [11].-M.Mizuno and D.G.Chetwynd, "Investigation of a resonance microgenerator," J. Micromech. Microeng., vol. 13, no. 2, pp. 209-216, Mar. 2003.
- [12].-H.Kulah and K.Najafi, "An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations", in Proc. 17th Int. Conf. MEMS (MEMS 2004), Maastricht, The Netherlands, Jan. 2004, pp.237-240.
- [13].-W.S.Huang, K.E.Tzeng, M.C.Cheng, and R.S.Huang, "Design and fabrication of a vibrational micro-generator for wearable MEMS", Proceedings of Eurosensors XVII, 2003, Guimaraes, Portugal 695-697
- [14].-C.B.Williams and R.B.Yates, "Analysis of a micro-electric generator for Microsystems", Proc. Transducers'95/Eurosensors IX, vol. 1, pp.369-372, Jun. 1995.
- [15].-C.B.Williams and R.B.Yates, "Analysis of a micro-electric generator for Microsystems", Sens. Actuators A, vol. 52, no. 1, pp. 8-11, Mar.1996.
- [16].-C.Shearwood and R.B.Yates, "Development of an electromagnetic microgenerator", Electron. Lett., vol. 33, no. 22, pp. 1883-1884, Oct.1997.

- [17].-C.B.Williams, C.Shearwood, M.A.Harradine, P.H.Mellor, T.S.Birch, and R.B.Yates, "Development of an electromagnetic micro-generator", IEE Proc. Circuits, Devices Syst., vol. 148, no. 6, pp. 337–342, Dec. 2001.
- [18].-H.Kulah and K.Najafi, "Energy Scavenging From Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications", in IEEE Sensors Journal, Vol. 8, no. 3, pp.261–268, March 2008.
- [19].-I.Sari, T.Balkan, H.Kulah, "An Electromagnetic Micro Power Generator for Low-Frequency Environmental Vibrations Based on the Frequency Upconversion Technique", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.19, No.1, Feb.2010
- [20].-E.Koukharenko, S.P.Beeby, M.J.Tudor, N.M.White, T.O'Donnell, C. Saha, S. Kulkarni, and S.Roy, "Microelectromechanical systems vibration powered electromagnetic generator for wireless sensor applications", Microsyst. Technol., vol. 12, no. 10–11, Sep. 2006.
- [21].-S.Kulkarni, S.Roy, T.O'Donnell, S.P.Beeby, and M.J.Tudor, "Vibration based electromagnetic micropower generator on silicon". J. Appl. Phys., vol. 99, no. 8, p. 08P511, 2006.
- [22].-C.Zhang, G.Xu, Q.Jiang, "Analysis of the air-damping effect on a micromachined beam resonator," Math.Mech. Solids, vol. 8, pp. 315-325, 2003.
- [23].-Newell, "Miniaturization of Tuning Forks", Science September 1968: Vol.161, pp. 1320-1326.
- [24].-O.Zorlu, E.T.Topal, H.Kulah, "A mechanical frequency up-conversion mechanism for vibration based energy harvesters", IEEE Sensors, pp.: 1366-1369, (2009)
- [25].-O.Zorlu, E.T.Topal, H.Kulah, "Vibration-Based Electromagnetic Energy Harvester Using Mechanical Frequency Up-Conversion Method", IEEE Sensors Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 481-488, February 2011.
- [26].-T.von Büren, G.Tröster, "Design and optimization of a linear vibration-driven electromagnetic micro-power generator", Sens. Actuators A, vol. 135, p.765 , 2007.
- [27].-S.P.Beeby, M.J.Tudor, R.N.Torah, S.Roberts, T.O'Donnell, and S. Roy, "Experimental comparison of macro and micro scale electromagnetic vibration powered generators", Microsyst. Technol., vol. 13, no. 11–12, pp. 1647–1653, Jul. 2007.
- [28].-S.Kulkarni, E.Koukharenko, R.Torah, J.Tudor, S.Beeby, T.O'Donnell, S.Roy, "Design, fabrication and test of integrated micro-scale vibration-based electromagnetic generator", Sensors and Actuators A 145–146 (2008) 336–342.
- [29].-C.T.Pan, Y.M.Hwang, H.L.Hu, and H.C.Liu, "Fabrication and analysis of a magnetic self-power microgenerator", J. Magn. Magn. Mater., vol. 304, no. 1, pp. e394–e396, Sep. 2006.
- [30].-J.A.Paradiso and T.Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," Pervasive Comput., vol. 4, no. 1, pp. 18–27, Jan.–Mar. 2005.
- [31].-S.R.Vetorino, "Renewable EnergyFlashlight", US patent 6,220,719, to Applied Innovative Technologies, Inc., Patent and Trademark Office, 2001.
- [32].-Perpetuum PMG17-100 Data Sheet [Online]. Available: <http://www.perpetuum.co.uk>
- [33].-Ferro Solutions Energy Harvester Data Sheet [Online]. Available: <http://www.ferrosi.com>
- [34].- <http://www.lumedynetechnologies.com/EnergyHarvester.html>
- [35].-<http://www.tremontelectric.com/>

- [36].-<http://www.npowerpeg.com/index.php>
- [37].-Seiko AGS Quartz Watch Product Literature [Online]. Available: http://www.epson.co.jp/e/company/milestones/19_ags.pdf
- [38].-M.Kayakawa, "Electronic Wristwatch with Generator", U.S. Patent 5 001 685, Mar. 19, 1991.
- [39].-J.Kitahara, "Development of small AGS (automatic power-generator for wrist-watch)", (in Japanese) Horolog. Inst. Jpn., no. 157, pp. 33–42, 1996.
- [40].-K.Matsuzawa and M.Saka, "Seiko human powered quartz watch", in Proc. Prospector IX: Human Powered Systems Technologies, M. F. Rose, Ed. Auburn, AL: Space Powered Institute, Auburn University, 1997, pp. 359–384.
- [41].-B.Gilomen and P.Schmidli, "Mouvement á quartz dame dont l'énergie est fournie par une génératrice, calibre ETA 204.911", in Congrès Européen de Chronométrie, Geneva, Sept. 2000.
- [42].- Kinetron MGS Watch Data Sheet [Online]. Available: <http://www.kinetron.nl/>
- [43].-J.Okazaki, Y.Osaki, H.Hosaka, K Sasaki, H.Yamakawa, and K. Itao, "Dynamic analysis and impedance control of automatic power generators using mechanical vibration", in Tech. Dig. 2002 Int. Workshop Power MEMS (Power MEMS 2002), Tsukuba, Japan, Nov. 2002, pp. 110–113.
- [44].-K.Sasaki, Y.Osaki, J.Okazaki, H.Hosaka, and K.Itao, "Vibration based automatic power-generation system", *Microsyst. Technol.*, vol.11, no. 8–10, Aug. 2005.
- [45].-D.Spreemann, Y.Manoli, B.Folkmer, D.Mintenbeck, "Non-resonant vibration conversion", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 16, no.9, S169-S173, Sept.2006
- [46].-D.Hohlfeld, R.Vullers, J.Boeck, "An electromagnetic energy harvester for low frequency excitation", *Integration Issues of Miniaturized Systems - MOMS, MOEMS, ICS and Electronic Components (SSI)*, 2008 2nd European Conference & Exhibition on , vol., no., pp.1-8, 9-10 April 2008
- [47].-A.S.Holmes, G.Hong, K.R.Pullen, "Axial-Flux Permanent Magnet Machines for Micropower Generation"
- [48].-S.P.Beeby, M.J.Tudor, R.N.Torah, S.Roberts, T.O'Donnell, S.Roy, "Experimental comparison of macro and micro scale electromagnetic vibration powered generators", *Microsystem Technologies*, 2007, Volume 13, Numbers 11-12, Pages 1647-1653
- [49].-S.P.Beeby, M.J.Tudor, R.N.Torah, E.Koukharenko1, S.Roberts, T.O'Donnell, C. Saha, "Macro and Micro Scale Electromagnetic Kinetic Energy Harvesting Generators", *Proc.DTIP 2006*, Stresa, Italy, April 26-28.
- [50].-Perpetuum PMG7 Data Sheet [Online]. Available: <http://www.perpetuum.co.uk>
- [51].-T.O'Donnell, C.Saha, S.P.Beeby, M.J.Tudor, "Scaling effects for electromagnetic vibrational power generators", *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, Stresa - Italy, 26-28 April 2006"
- [52].-P.D.Mitcheson, T.C.Green, E.M.Yeatman and A.S.Holmes "Architectures for Vibration-Driven MicropowerGenerators", *Journal of MEMS*, Vol. 13, No. 3, June 2004.
- [53].-Colonel W.T.McLyman, "Transformer and Inductor Design Handbook ", Second Edition, Marcel Dekker Inc.New York, 1988.
- [54].-Benjamin Crowell (2006) "Vibrations and Waves".

- [55].-H.Hosaka, K.Itao, S.Kuroda, "Evaluation of energy dissipation mechanisms in vibrational Microactuators", IEEE proceedings on MEMS workshop, page 193-198, 1994.
- [56].-X.Zhang and W. C.Tang, "Viscous air damping in laterally driven microresonators", IEEE proceedings on MEMS workshop, pp. 199-204, 1994.
- [57].-S.Pourkamali, A.Hashimura, R.Abdolvand, G.K.Ho, A.Erbil and F.Ayazi, "High-Q single crystal silicon HARPSS capacitive beam resonators with self aligned sub-100-nm transduction gaps", Journal of MEMS, Vol. 12, No. 1, August 2003.