

Energy Harvesting for Autonomous Biomedical Devices

INDICE:

Introduzione Generale

Capitolo 1:

Energy Harvesting

- 1.1 - Introduzione
- 1.2 - Energy Harvesting per la Medicina

Capitolo 2:

Temperatura Corporea: La più Sfruttata

- 2.1 - I Generatori Termoelettrici
- 2.2 - Rete Elettrica Completa
- 2.3 - Modello Semplificato
- 2.4 - Proprietà dei Materiali
- 2.5 - Realizzazione del Dispositivo
- 2.6 - Risultati
- 2.7 - Esempi di Termogeneratori

Capitolo 3:

Movimenti del Corpo Umano

- 3.1 - Un'occhiata Generale
- 3.2 - Modello di un Kinetic Energy Scavenger
- 3.3 - Dinamiche del Sistema
- 3.4 - Energy Scavenger per il Monitoraggio del Corpo Umano
 - 3.4.1 - Circuito di Avviamento
 - 3.4.2 - Dimensionamento
 - 3.4.3 - Operazioni di Raccolta
 - 3.4.4 - Circuito di Avviamento Veloce
 - 3.4.5 - Implementazione
 - 3.4.6 - Misurazioni

Capitolo 4:

Confronto fra Energy Harvesting

Conclusioni

Bibliografia

Introduzione Generale

Il presente lavoro ha l'intento di capire come realizzare due tipologie di dispositivi che generano energia elettrica da fonti di energia alternative per poi poterli mettere a confronto.

Da una parte si realizza un dispositivo che genera energia elettrica dalla differenza di temperatura interna al corpo umano, creano dei microgeneratori termoelettrici (TEGs) che con qualche grado centigrado come d.d.t. riescono a generare qualche microwatt di potenza elettrica. Viene realizzato un dispositivo BiCMOS usando materiali standard per mantenerne il costo ridotto. La bassa conduttività termica di questi materiali risulta essere il fattore principale per incrementare la potenza di uscita. I materiali usati sono il poly-Si e il poly-SiGe. I risultati sperimentali mostrano buona affinità con le simulazioni termiche.

Dall'altra parte si realizza un dispositivo piezoelettrico che trasforma l'energia cinetica di una massa libera di muoversi all'interno di un telaio rigido in energia elettrica dall'impatto di questa massa con le due estremità del telaio. Viene poi proposto un Energy Harvester cinetico per dispositivi indossabili o per nodi di sensori wireless usando una grossa capacità come immagazzinatore di carica utilizzata con una capacità più piccola per ridurre i tempi di avviamento del circuito.

I risultati sperimentali mostrano che questo tipo di approccio riduce di molto i tempi di start-up e permette di mantenere una certa efficienza anche con piccoli movimenti.

Viene presentata un'analisi accurata e approfondita dei dispositivi, con dimensionamento e tecniche di fabbricazione.

Infine vengono messi a confronto scegliendo due parametri principali: la potenza generata sul volume occupato, e il costo per Joule di energia prodotto intervistando alcune delle maggiori aziende produttrici nel settore.

Capitolo 1

Energy Harvesting

1.1 Introduzione

Energy Harvesting (anche conosciuto come Power Harvesting o Energy Scavenging) è il processo per cui l'energia, proveniente da sorgenti alternative, viene catturata e immagazzinata. Le cosiddette forme di energia alternative sono tutte quelle sorgenti comunemente disponibili nell'ambiente; tale processo le converte in energia elettrica direttamente utilizzabile.

L'interesse per questa tecnologia parte dal fatto che esistono fonti di energia inesauribili e libere da cui trarre vantaggio, come per esempio:

- Energia Meccanica: derivante da vibrazioni, tensione e sforzo meccanico.
- Energia Termica: energia sprecata da fornaci, riscaldatori e fonti d'attrito.
- Energia Luminosa: catturata dal sole o dalle luci.
- Energia Elettromagnetica: generata da induttori e trasformatori.
- Energia Naturale: dal vento, dalla caduta dell'acqua o da correnti oceaniche.
- Energia del Corpo Umano: una combinazione di energia meccanica e termica generata da bio-organismi o da azioni come camminare o correre.
- Altre Energie: da fonti chimiche e biologiche.

Per trasformare queste energie in energia elettrica serve un dispositivo particolare per ogni tipo di energia utilizzata, ad esempio sensori di movimento per l'energia meccanica, fotodiodi, fotosensori o pannelli solari per quella luminosa, sensori di temperatura per quella termica.

Una delle principali fonti di energia utilizzabile con il processo dell'Energy Harvesting sono le sorgenti piezoelettriche. Le vibrazioni a bassa frequenza, le vibrazioni meccaniche, il movimento umano o addirittura il rumore acustico (pensiamo all'inquinamento acustico delle grandi città) sono tutte forme di energia convertibili in energia elettrica.

Un'altra sorgente di energia è l'energia termica del corpo umano, che grazie a determinati elementi può essere convertita in energia elettrica.

In alcuni casi vengono sfruttate altre fonti, come la differenza del pH nelle diverse parti del corpo, le Radiofrequenze e gli Ultrasuoni per alimentare direttamente questi dispositivi.

Stiamo parlando di milliwatt, quindi fonti di energia elettrica molto limitate. Ma la tecnologia, nei processi produttivi in particolare, è orientata sempre di più al low-power e quindi sono nati componenti elettronici in grado di autoalimentarsi da queste minime energie e di gestirle, ad esempio accumulandole tramite dei condensatori e convertendole in varie tensioni, tramite convertitori step-up (o convertitori Boost, in grado di fornire una tensione di uscita superiore rispetto a quella di ingresso). Questo è sufficiente ad alimentare dispositivi portatili a microcontrollore, come sensori wireless e sistemi di monitoraggio remoti. Le case costruttrici di componenti elettronici attive in questo settore sono Linear Technology, Maxim Integrated Products, RTI International e Texas Instruments.

1.2 Energy Harvesting per la Medicina

In particolar modo, nell'ambito della medicina, questa tecnologia è molto interessante ed utile. Vengono utilizzati sensori interni per monitorare lo stato di un pazienze, oppure vengono impiantati pacemaker per salvarne la vita ecc.

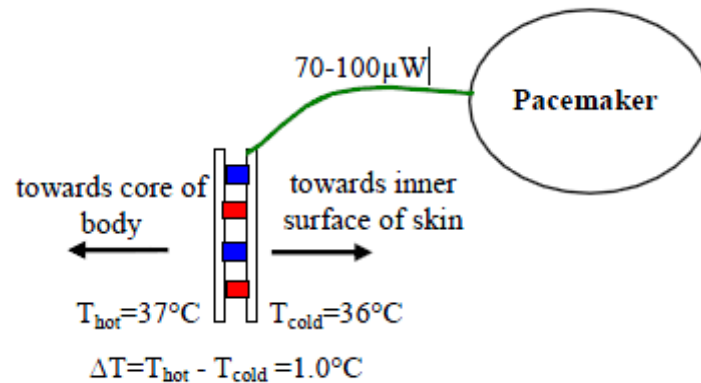


Figura 1.1: Un'esempio di Pacemaker alimentato tramite differenza di Temperatura.

Power consumption	70-100 μW
Voltage required	3-4V
Temperature differential available	0.3-1.7 $^{\circ}\text{C}$
Size	6.8cm ² and thickness < than 5mm

Figura 1.2: Specifiche dei defibrillatori/pacemaker impiantabili.

Il problema principale di questi dispositivi è dato dal fatto che funzionano a batteria e, anche se hanno molta longevità (anche fino a 10 anni per un pacemaker e dai 3 ai 5 per un neurostimolatore), dopo questo periodo di tempo la batteria dev'essere sostituita: il paziente deve recarsi in ospedale, sottoporsi ad un intervento chirurgico, con possibili complicazioni, con qualche giorno di degenza ecc.

E qui entra in gioco l'Energy Harvesting: riuscire a creare un dispositivo che si autoalimenta con l'energia prodotta dal corpo umano. In pratica questo eliminerebbe la necessità di un'intervento per la sostituzione della batteria.

Capitolo 2

Temperatura Corporea: La più Sfruttata

2.1 I Generatori Termoelettrici

Per le operazioni di piccoli dispositivi e sistemi elettronici, un'alimentazione di alcuni microwatts è sufficiente in vari casi. Se esiste un gradiente termico fra la posizioni del dispositivo e l'ambiente, le batterie del sistema possono essere rimpiazzate da generatori termoelettrici (TEGs). Solitamente esiste una differenza di temperatura di qualche grado fra la superficie del corpo umano e l'ambiente esterno. Sfruttando questo gradiente termico è possibile, per esempio, alimentare termoelettricamente degli orologi da polso.

L'obiettivo è di sviluppare un microgeneratore TEG che sia economico, piccolo e a basso consumo. Quindi sono stati presi in esame materiali come il poly-Si e poly-SiGe in configurazione BiCMOS, che sta per *Bipolar Complementar Metal Oxide Semiconductor*, ossia una tecnologia che integra CMOS e BJT sullo stesso chip semiconduttore. Il vantaggio di questo procedimento è il fatto che si avvale dei vantaggi dei dispositivi realizzabili nelle due diverse tecnologie: da un lato il MOS presenta basso consumo di potenza e ampi margini di rumore, dall'altro il bipolare presenta una maggiore capacità di pilotaggio di carichi elevati e alto guadagno. Un'altro importante vantaggio è che la capacità complessiva di una porta BiCMOS è quasi pari a quella del solo BJT, dunque bassa. Questo permette un notevole incremento delle prestazioni in frequenza del BiCMOS. Altro importante vantaggio è la possibilità di coniugare nello stesso integrato elettronica analogica e digitale, che risulta utile nel realizzare system-on-a-chip.

Gli svantaggi sono invece, da una parte l'elevato costo di produzione, dall'altra il consumo elevato di potenza (inferiore a quello di una porta logica TTL, ma maggiore di un dispositivo CMOS). Essendo che questi materiali sono compatibili con il processo di fabbricazione, i generatori possono essere facilmente integrati nei chip. Un generatore TEG consiste in coppie di gambe di tipo n e di tipo p di materiale termoelettrico. Queste gambe sono connesse elettricamente in serie tramite ponti metallici e sono disposte in modo da utilizzare al meglio l'area disponibile. Il layer del generatore è posizionato fra il substrato di silicio (sotto) e lo stabilizzatore di calore (sopra). Un gradiente termico fra l'estremità inferiore del dispositivo e l'ambiente all'estremità superiore creano un flusso di calore verticale, che può essere parzialmente convertito in energia elettrica dagli effetti della termoelettricità.

M. Strasser et al. /Sensors and Actuators A 97-98 (2002) 535-542

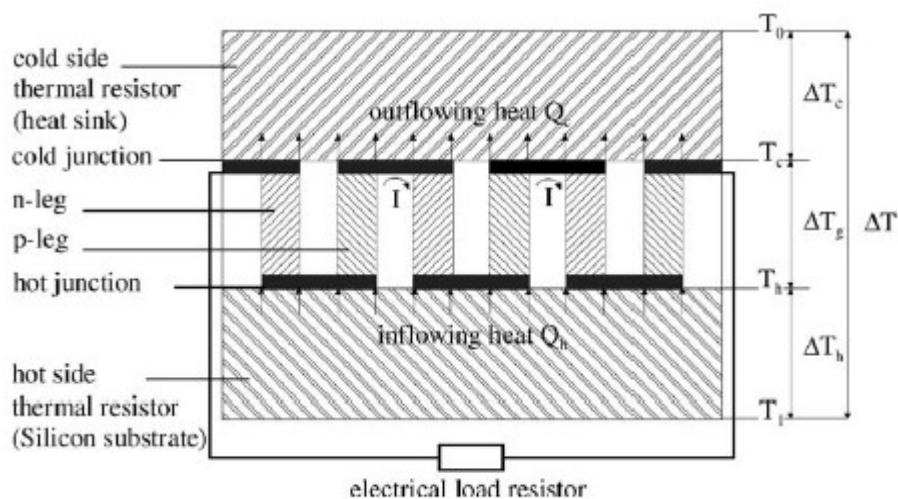


Figura 2.1: Schema di una sezione di un generatore con gambe termoelettriche drogate di tipo n e p.

Principio di Funzionamento

Questi dispositivi si basano su tre effetti principalmente: l'effetto Seebeck, l'effetto Peltier e l'effetto Pelle.

Effetto Seebeck:

L'effetto Seebeck è un effetto termoelettrico per cui in un circuito costituito da due diversi conduttori metallici, una differenza di temperatura tra le giunzioni genera differenza di potenziale e il passaggio di corrente fra le giunzioni stesse.

Quando un filo di metallo è connesso fra due diverse temperature, un numero elevato di elettroni è eccitato dall'energia più elevata della parte calda rispetto all'energia della parte fredda. Questo causa una deriva di elettroni dalla parte più calda a quella più fredda, creando una zona di carica positiva (maggior presenza di lacune) all'estremità più calda e una zona di carica negativa (maggior presenza di elettroni) all'estremità più fredda.

Questo accumulo di carica dà origine ad un EMF (Elettromagnetic Field) fra le due estremità del filo. Per un singolo filo la magnitudine del voltaggio dipende solo dalla differenza di temperatura. Per la stessa differenza di temperatura l'EMF è diverso da metallo a metallo.

Solo negli anni '50-60 a seguito della scoperta dei semiconduttori (materiali le cui proprietà stanno a metà tra quelle tipiche dei metalli e quelle degli isolanti) si è potuto aumentare in modo consistente l'efficienza dei dispositivi termoelettrici ad effetto Seebeck utilizzando la tecnica del drogaggio, cioè rimpiazzando degli atomi di un dato elemento con atomi di un'altro tipo: se si vuole avere più carica positiva si rimpiazzano gli atomi con atomi che hanno 1 elettrone in meno nel livello energetico più esterno dell'atomo di partenza (per esempio utilizzando il Boro), se si vuole avere più carica negativa si rimpiazzano gli atomi con atomi che hanno 1 elettrone in più nel livello energetico più esterno dell'atomo di partenza (per esempio utilizzando il Fosforo).

Effetto Peltier:

Effetto termoelettrico, scoperto da Jean Peltier nel 1834, consistente nel rilascio o nell'assorbimento di calore Q alla giunzione fra due materiali (metalli o semiconduttori drogati) differenti, a e b , quando nella giunzione viene fatta scorrere una corrente I . Si tratta di un processo reversibile e il segno del calore scambiato per unità di tempo dipende dal verso della corrente nella giunzione secondo la relazione:

$$\Delta Q/\Delta t = (P_\alpha - P_\beta)I$$

dove compare la differenza tra i coefficienti di Peltier P_α e P_β dei due materiali. Il coefficiente di Peltier misura la quantità di calore trasportato per unità di carica in un conduttore. L'effetto Peltier è l'opposto dell'effetto Seebeck.

Effetto Pelle:

Rappresenta la tendenza di una corrente alternata a distribuirsi dentro un conduttore in modo non uniforme: la sua densità è maggiore sulla superficie ed inferiore all'interno. Questo comporta un aumento della resistenza elettrica del conduttore in modo particolare alle alte frequenze. In altre parole, una parte del conduttore non viene utilizzata: è come se non esistesse. Questo comporta maggiore dissipazione di potenza a parità di corrente applicata o una minore corrente a parità di tensione applicata (legge di Ohm). Il fenomeno venne spiegato per la prima volta da Lord Kelvin (William Thomson) nel 1887, inoltre anche Nikola Tesla studiò il problema.

Per un dato coefficiente di Seebeck α dei due materiali termoelettrici utilizzati, la tensione a circuito aperto generata U_0 può essere espressa dal numero di coppie di gambe termoelettriche m e dalla differenza di temperatura ΔT_g fra la giunzione calda e quella fredda:

$$U_0 = m\alpha \Delta T_g \quad (1)$$

Visto che il circuito deve operare alla massima potenza di uscita P_{out} , si deve calcolare l'impedenza in modo tale da rendere uguali le impedenze del generatore e del carico:

$$P_{out} = U_{out}I = \frac{U_0^2}{4R_g} = \frac{m^2\alpha^2}{4R_g} (\Delta T_g)^2 \quad (2)$$

Dove U_{out} è la tensione di uscita col carico, I la corrente elettrica e R_g la resistenza del generatore. Per determinare ΔT_g , la rete viene risolta analizzando un circuito analogo dove viene tenuto conto di due resistenze in più, una dalla parte fredda e una dalla parte calda del generatore.

La figura di merito del generatore dipende solo dalle proprietà del materiale.

Per prima cosa, una rete termoelettrica completa viene realizzata prendendo in considerazione anche l'effetto Peltier e l'effetto Joule. Dopodichè, invece di dare direttamente la soluzione del problema, viene sviluppato un modello semplificato.

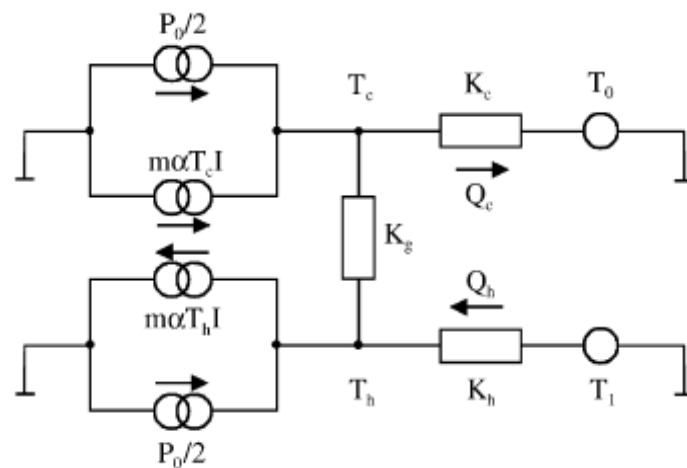


Figura 2.2: Schema di un microgeneratore TEG includendo l'effetto Peltier e l'effetto Joule.

2.2 Rete Termica Completa

Se il generatore è posto fra layers con resistenza termica K_c e K_h dalla parte fredda e da quella calda, la temperatura totale viene calcolata sommando anche i contributi delle correnti termiche Q_c e Q_h :

$$\Delta T = \Delta T_g + \Delta T_c + \Delta T_h = \Delta T_g + K_c Q_c + K_h Q_h \quad (3)$$

Partendo dal presupposto che il coefficiente di Seebeck α , la resistività elettrica ρ e la conducibilità termica λ sono indipendenti dalla temperatura, anche le correnti termiche possono essere considerate indipendenti. Il bilanciamento energetico della parte calda e di quella fredda deve includere anche i contributi dell'effetto Peltier e dell'effetto Joule nel generatore. L'effetto Joule presente nelle gambe può essere diviso in due parti, metà presente nella parte calda della gamba e metà presente nella parte fredda.

La somma delle correnti termiche Q_h entra nella giunzione calda alla temperatura T_h , inoltre il calore dell'effetto Joule $P_{out}/2$ è uguale alla somma del calore del generatore $\Delta T_g/K_g$ e del calore trasformato in energia elettrica dall'effetto Peltier nella zona calda della giunzione:

$$Q_h = \frac{\Delta T_g}{K_g} + m\alpha T_h I - \frac{P_{out}}{2} \quad (4)$$

dove K_g è la resistenza termica del generatore stesso. La corrente termica Q_c (della parte fredda alla temperatura T_c) è composta dal calore che attraversa il generatore $\Delta T_g/K_g$, dal calore dell'effetto Peltier e dall'effetto Joule della giunzione fredda:

$$Q_c = \frac{\Delta T_g}{K_g} + m\alpha T_c I + \frac{P_{out}}{2} \quad (5)$$

Sostituendo $U_0/2R_g$ per la corrente elettrica I nel caso di adattamento di impedenza, $T_l - K_h Q_h$ per T_h e $T_0 + K_c Q_c$ per T_c e risolvendo in funzione della corrente termica si ottiene:

$$Q_h = \frac{2R_g}{2R_g + m^2\alpha^2 K_h \Delta T_g} \left(\frac{\Delta T_g}{K_g} + \frac{m^2\alpha^2 T_l \Delta T_g}{2R_g} - \frac{P_{out}}{2} \right) \quad (6)$$

$$Q_c = \frac{2R_g}{2R_g - m^2\alpha^2 K_c \Delta T_g} \left(\frac{\Delta T_g}{K_g} + \frac{m^2\alpha^2 T_0 \Delta T_g}{2R_g} + \frac{P_{out}}{2} \right) \quad (7)$$

dove T_0 e T_l sono le temperature nell'estremità fredda e calda rispettivamente dell'intero dispositivo. Inserendo queste due equazioni nell'equazione (3) del paragrafo si ottiene un'equazione di terzo grado in ΔT_g con tre soluzioni reali. Due di queste implicano un valore negativo di temperatura T_c , quindi solo la terza soluzione resta valida. Quando questa soluzione è inserita nell'equazione di P_{out} , si ottiene un'equazione della massima potenza di uscita del generatore che dipende dalle temperature esterne T_0 e T_l , dalle proprietà del materiale e dalla geometria del dispositivo. Questo risultato rivela che un microgeneratore TEG opera in un regime diverso rispetto ad un convenzionale generatore TEG, vedi figura sotto. Per il suo complicato aspetto, l'equazione intera non viene riportata.

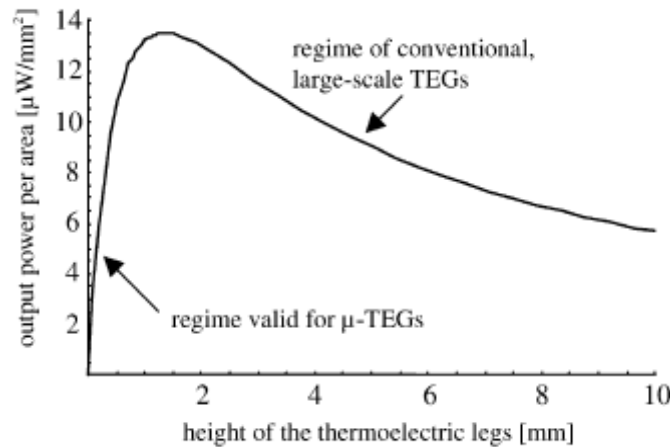


Figura 2.3: Potenza di uscita di un tipico generatore TEG in funzione dell'altezza t delle gambe termoelettriche. I microgeneratori TEG operano nel regime sulla sinistra.

2.3 Modello Semplificato

Se i contributi dell'effetto Peltier e dell'effetto Joule sono stati trascurati nell'Eqs. (4) e (5), l'Eq. (3) può essere risolta semplicemente per ΔT_g :

$$\Delta T_g = \frac{K_g}{K_g + K_c + K_h} \Delta T \quad (8)$$

Usando l'Eq. (2), si ottiene un'espressione della massima potenza elettrica di uscita:

$$P_{out} = \frac{m^2 \alpha^2}{4R_g} \left(\frac{K_g}{K_g + K_c + K_h} \Delta T \right)^2 \quad (9)$$

Visto che il microgeneratore TEG consiste in una serpentina di coppie termoelettriche (vedi Figura 2.4) e che il flusso termico è in direzione verticale, i suoi elementi sono termicamente connessi in parallelo.

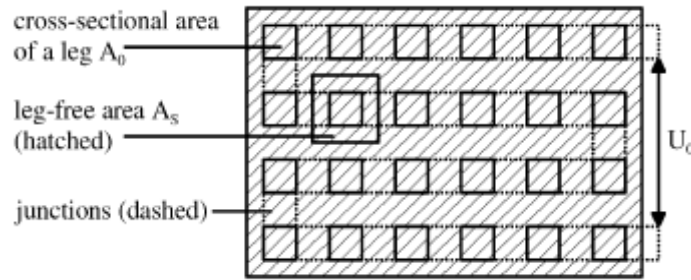


Figura 2.4: Vista schematica di un microgeneratore TEG creato a serpentina.

Se la maggior parte del flusso termico fluisce attraverso le gambe termoelettriche, la resistenza termica K_g del generatore si riduce a:

$$K_g = \frac{t}{2m\lambda A_0} \quad (10)$$

dove $\lambda = (\lambda_n + \lambda_p)/2$ è la conducibilità termica media delle termocoppie, t rappresenta lo spessore dei layers del generatore e A_0 è la sezione dell'area delle gambe termoelettriche.

Per layers sottili del generatore vale l'approssimazione $K_g \ll K_c + K_h$. In accordo con l'Eq. (2), con l'Eq. (10) e con $R_g = 2\rho mt/A_0$, la potenza di uscita P_{out} diventa:

$$P_{out} = \frac{1}{32} \frac{\alpha^2}{\lambda^2 \rho} \frac{t}{mA_0} \left(\frac{\Delta T}{K_c + K_h} \right)^2 \quad (11)$$

dove $\rho = (\rho_n + \rho_p)/2$ è la resistività elettrica media di una termocoppia.

Considerando che le resistenze termiche dipendono dall'area totale del generatore $A_g = 2m(A_0 + A_s)$, queste possono essere immaginate come delle resistenze termiche cubiche $K_c = t_c/(\lambda_c A_g)$ e $K_h = t_h/(\lambda_h A_g)$:

$$P_{out} = \frac{1}{16} \frac{\alpha^2}{\lambda^2 \rho} t \frac{A_0 + A_s}{A_0} \frac{\lambda_c^2 \lambda_h^2}{(t_c \lambda_h + t_h \lambda_c)^2} (\Delta T)^2 A_g \quad (12)$$

qui λ_c e λ_h sono le conduttività termiche e t_c e t_h lo spessore delle resistenze termiche dalla parte fredda e calda rispettivamente. A_s rappresente l'area libera fra gambe adiacenti in una cella. Questo risultato mostra che la potenza di uscita massima per area di un microgeneratore TEG è limitata dal coefficiente di Seebeck α , dalla resistenza termica ρ e dalla conduttività termica λ . P_{out} aumenta con la lunghezza t delle coppie termoelettriche e diminuisce con la sezione dell'area A_0 delle gambe.

La relazione sopra citata della massima potenza di uscita permette di definire anche una figura di merito, Z^* , che caratterizza le prestazioni di un microgeneratore TEG come:

$$Z^* = \frac{Z}{\lambda} = \frac{\alpha^2}{\lambda^2 \rho} \quad (13)$$

visto che la conduttività termica appare elevata al quadrato è evidente l'importanza di avere un'elevata resistività termica interna.

Per descrivere il sistema per valore non nulli di R_c (resistenza di contatto delle giunzioni metalliche) la resistenza interna di R_g va così ridefinita:

$$R_g = mR_{cell} = m(2R_{leg} + 4R_c) \quad (14)$$

da notare che tutte le termocoppie sono formate da 4 contatti metallici. Verrà discusso sotto il fatto che le resistenze di contatto possono rappresentare più della metà della resistenza elettrica totale.

2.4 Proprietà dei Materiali

L'effetto Seebeck α , la resistenza termica ρ e la conduttività termica λ sono state misurate per entrambi i materiali, poly-Si e poly-Si_{70%}Ge_{30%} (vedi tabella 1).

Table 1
Measured material properties for 400 nm thick poly-Si and poly-SiGe layers

Material	Doping concentration c (cm ⁻³) ($\times 10^{20}$)	Seebeck coefficient α (μ V/K)	Electrical resistivity ρ (m Ω cm)	Thermal conductivity λ (W/m K)	Figure of merit Z^* (μ m ² /W) ^a
n-Poly-Si	2.5	-57 \pm 9	0.813 \pm 0.001	31.5 \pm 3.7	0.4
p-Poly-Si	2.5	103 \pm 17	2.214 \pm 0.004	31.2 \pm 3.7	0.5
n/p-Poly-Si couples	2.5	160 \pm 19	1.514 \pm 0.004	31.4 \pm 5.2	1.7
n-Poly-SiGe	2.5	-77 \pm 7	2.37 \pm 0.04	9.4 \pm 2.0	2.8
p-Poly-SiGe	2.5	59 \pm 9	1.87 \pm 0.01	11.1 \pm 2.0	1.5
n/p-Poly-SiGe couples	2.5	136 \pm 11	2.12 \pm 0.04	10.3 \pm 2.8	8.2

^a Z^* is calculated according to Eq. (13).

Il coefficiente di Seebeck è stato calcolato con una struttura di test speciale. Il valore della resistività elettrica è stato determinato con il metodo di Van-der-Pauw delle croci greche. Un nuovo tipo di test è stato studiato per misurare la conduttività termica dei layers di poly-Si.

Per produrre questa struttura speciale, i layers di poly-Si sono stati creati su due set di fasci e connessi tramite un radiatore (vedi figura 2.5).

Lo strato sacrificiale di ossido sottostante al layer di poly-Si viene rimosso usando un'incisione HF (cioè un'incisione chimica usando il fluoruro d'idrogeno, o Acido Fluoridrico). Si forma così una cavità al di sotto del dispositivo.

Applicando una corrente elettrica al radiatore, la maggior parte del calore $P_{el} = UI$ è forzato a fluire nei fasci perpendicolarmente.

Come un calcolo analitico rivela, la potenza elettrica termica viene ridotta dal calore perso nelle connessioni del radiatore, modellando l'ammontare corretto del calore P_c che fluisce sui fasci:

$$P_c = \gamma P_{el}$$

$$\text{with } \gamma = \frac{2mw(n^2w^2 + 6nwq + 6q^2)}{2n^3w^3 + 12n^2w^2q + 6glq + 3nwg\ell + 12mwq^2}$$
(15)

dove l è la lunghezza dei fasci, n il numero dei fasci, w è lo spessore dei fasci e q e g sono la lunghezza e lo spessore della connessione con il radiatore di poly-Si rispettivamente.

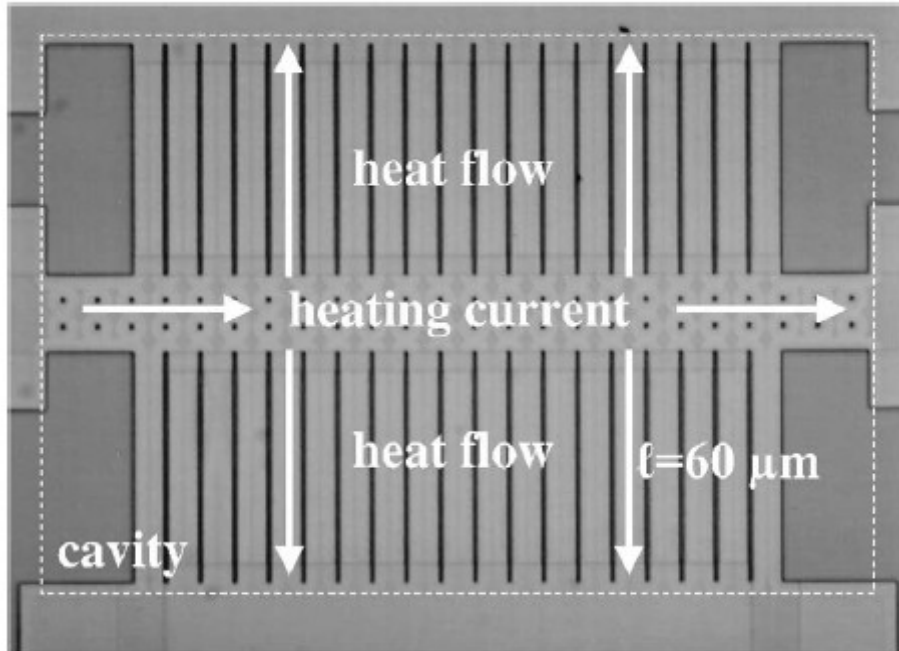


Figura 2.5: Micrografo di una struttura a doppio fascio per misurare la conducibilità termica dei layers di poly-Si. I bordi della cavità che connette il dispositivo sono indicati dalle linee tratteggiate.

In questo modo la conducibilità termica dei fasci e, quindi, la conducibilità del poly-Si stesso possono essere dedotte in accordo con la relazione (6):

$$\lambda = \frac{P_c R(T_0) \beta \ell}{mw \Delta R t}$$
(16)

dove $R(T_0)$ è la resistenza termica iniziale, β il coefficiente termico di resistenza, $\Delta R = R(T_0) \beta \Delta T$ è la variazione di resistenza e t lo spessore del layer.

Usando questa struttura, le conducibilità termiche del poly-Si e del poly-Si_{70%}Ge_{30%} sono state misurate (vedi tabella 1). Come ci si aspettava, i vantaggi del poly-SiGe sono basati sulla sua bassa conducibilità termica rispetto al poly-Si puro. Quindi il poly-SiGe risulta più indicato per essere usato nei microgeneratori TEG per la sua alta figura di merito. Tuttavia la resistenza elettrica del poly-SiGe drogato con fosforo risulta più elevata rispetto al poly-Si puro con drogaggio di tipo n.

Questo limita le prestazioni del poly-SiGe come materiale termoelettrico perchè porta ad una maggiore resistenza elettrica del generatore.

2.5 Realizzazione del Dispositivo

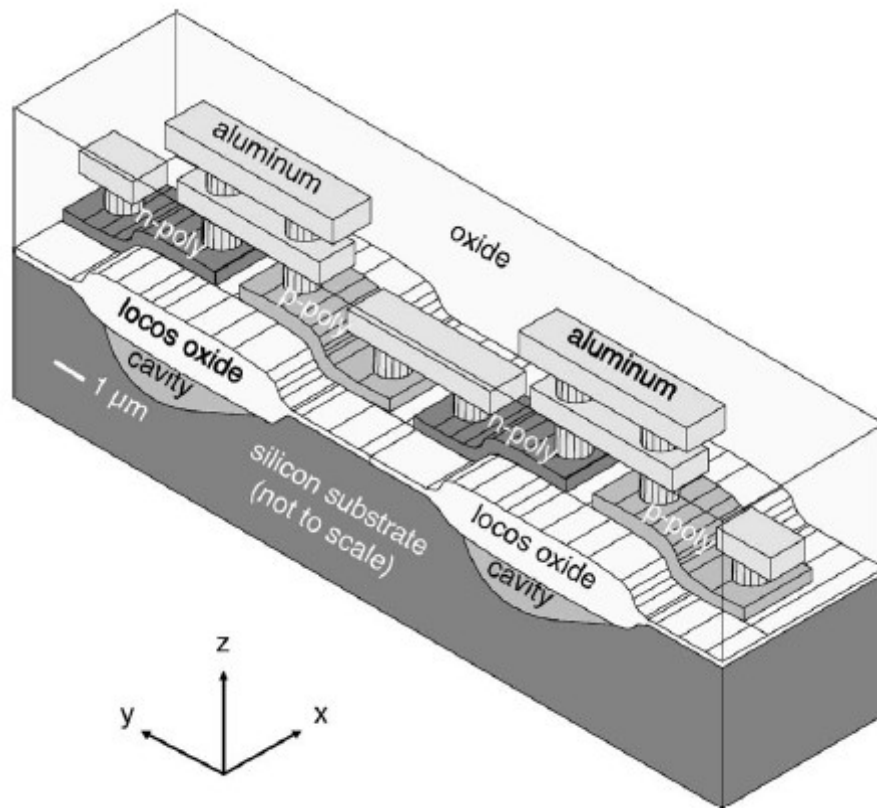


Figura 2.6: Vista schematica di due coppie termoelettriche realizzate tramite BiCMOS. Vengono mostrate anche le cavità che possono essere scavate dentro al substrato di Si.

Il termogeneratore viene realizzato in strutture che producono BiCMOS, dove ognuno consiste in 59'400 coppie integrate in un'area di 6 mm². Una vista schematica delle celle del generatore è mostrata nella figura 2.6. L'isolamento termico fra la parte calda e quella fredda delle gambe termoelettriche viene realizzato con una barriera di 1.6 µm di spessore di ossido LOCOS (Local Oxidation Of Silicon). Il layer di 400 nm di spessore di poly-Si viene parzialmente drogato con il fosforo con un'energia di 130 keV per realizzare le gambe di tipo n e parzialmente drogato con il boro con un'energia di 40 keV per realizzare le gambe di tipo p, usando entrambi una dose di agente drogante pari a 10¹⁶ cm⁻².

Lo strato di poly-SiGe viene creato con un reattore CVD (Chemical Vapor Deposition), usato normalmente per i depositi di poly-Si.

Per il deposito viene usata una mistura di disilano (Si₂H₆) e germano (1% GeH₄ in H₂). Il gas vettore è l'idrogeno. I layers di poly-SiGe sono fatti crescere ad una temperatura di 670°C e ad una pressione di 19 Torr (1 Torr = 133.322368 Pascal, 1 atmosfera = 760 Tor). Con questi parametri viene realizzato un deposito di 100 nm/min.

Per evitare grossi granuli, viene depositato un layer sottile di poly-Si dello spessore di circa 5 nm prima di depositare il poly-SiGe. I ponti di alluminio vengono usati per evitare le giunzioni n/p che altrimenti esisterebbero fra gambe termoelettriche adiacenti.

Un secondo ponte metallico viene aggiunto ad ogni altra giunzione per aumentare l'accoppiamento termico della superficie del dispositivo. Inoltre, per ottimizzare la direzione del flusso di calore nel generatore sono stati studiati due diversi passaggi:

In un primo tempo, la barriera di ossido al di sotto del poly-Si è stata rimossa attraverso la solita tecnica dell'incisione HF (vedi figura 2.7).

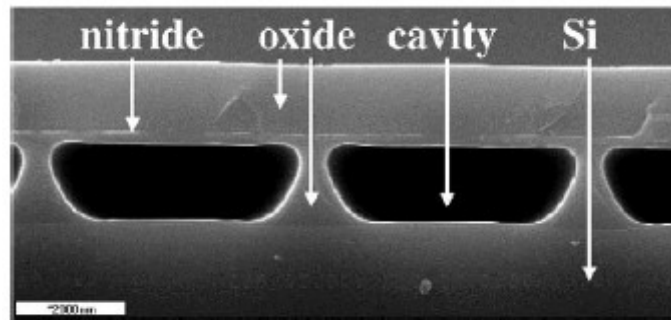


Figura 2.7: Cavità incise nella barriera di ossido usando un'incisione HF. I buchi nella maschera di nitruro vengono poi richiusi con l'ossido dopo l'incisione. Vista nella direzione y della figura 2.4.

Per definire le regioni da tagliare, lo strato di ossido sacrificale dev'essere coperto con una maschera di nitruro forata.

In un secondo tempo, le cavità sono state incise nel substrato di Si usando un'incisione a secco isotropica CF_4 , un'incisione tramite Tetrafluorometano (vedi figura 2.6 e 2.8).

Le gambe di poly-Si sono protette da una maschera di ossido durante l'incisione.

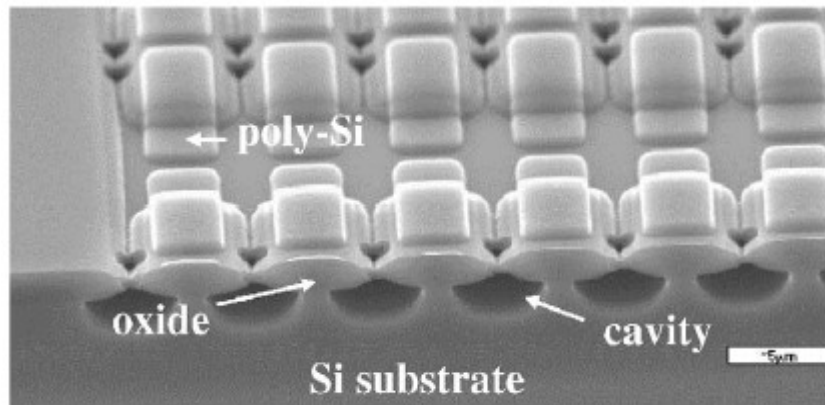


Figura 2.8: Micrografo che mostra le cavità incise nel substrato di Si usando un'incisione a secco CF_4 . Vista prima della metallizzazione lungo la direzione y come mostrato nella figura 2.4.

2.6 Risultati

L'uso del poly-SiGe combinato con l'incisione del substrato raddoppia la tensione di uscita a circuito aperto rispetto al dispositivo creato solo con poly-Si. Si può ottenere in questo modo un'efficienza di uscita di 100-200 mV/K. La tensione di uscita per unità d'area per ogni tipo di microgeneratore TEG è mostrata nella figura 2.9. La resistenza elettrica delle gambe termoelettriche, dei contatti e delle intere celle del generatore sono riportate nella tabella 2.

Table 2
Electrical resistances R_{leg} of a leg, R_c of a contact and R_{cell} of an entire cell of the poly-Si and poly-SiGe type TEG, respectively

Material	Electrical resistance		
	R_{leg} (Ω)	R_c (Ω)	R_{cell} (Ω)
Poly-Si	54 ± 1	23 ± 1	202 ± 5
Poly-SiGe	76 ± 1	119 ± 4	629 ± 19

Per il generatore in poly-Si, quasi la metà della resistenza di circa 10 MΩ proviene dai contatti. Nel caso del poly-SiGe, la resistenza dei contatti è ancora più dominante. Oltre a questo, la resistività elettrica del poly-SiGe drogato di tipo n è molto elevata. Sono in via di sviluppo degli esperimenti per cercare di risolvere questi problemi.

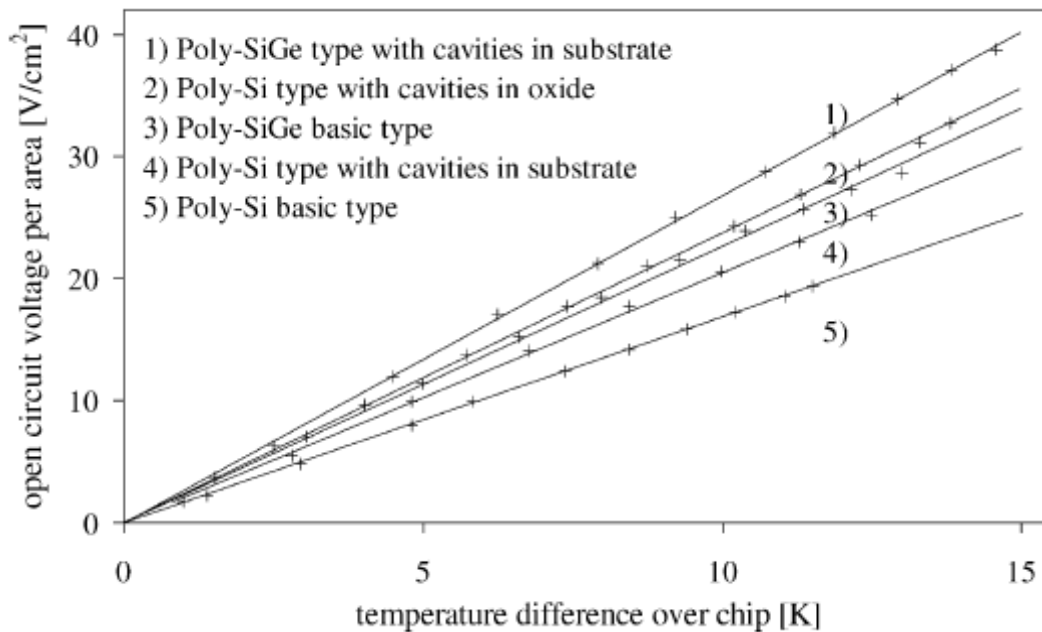


Figura 2.9: Tensione di uscita a circuito aperto per area con diversi tipi di generatori contro la differenza di temperatura fra la cima e il fondo dell'intero cip.

Ovviamente la potenza di uscita è limitata principalmente dalla resistenza del generatore. Quindi i generatori di poly-SiGe non possono superare i generatori di poly-Si.

Un grafico della potenza di uscita per area contro la differenza di temperatura è mostrato nella figura 2.10. Per fare un paragone viene visualizzato anche il risultato al quale si vorrebbe arrivare. L'obiettivo è quello di creare un generatore che fornisca 1 V con il carico collegato e 1 μW di potenza in uscita con una d.d.t. di 20 K in un'area non più grande di 25 mm².

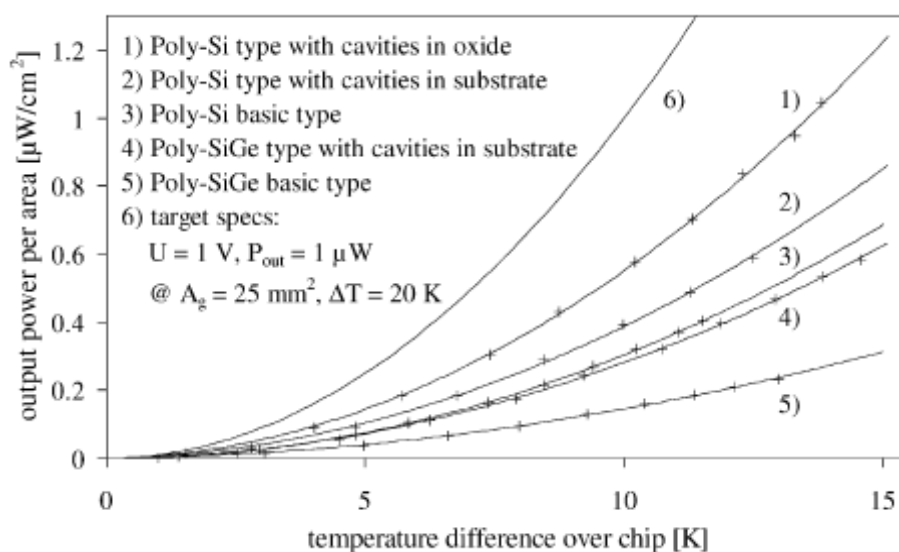


Figura 2.10: Potenza di uscita per area con diversi tipi di generatori contro la differenza di temperatura fra la cima e il fondo dell'intero cip.

2.7 Esempi di Termogeneratori

Module number	Epi	Contact size	Module size	ΔT (K)	P_{max} (mW)	V_{max} (mV)	Q_{in} (mW)	η (%)	V_{max}/Q_{in} (mV/W)	R_{therm} (K/W)
BCA-754	Bulk 660 μ m	p800x660 μ m n500x660 μ m	single couple	6.1	0.025	1.1	13.7	0.19	86.1	445
ICM-2797	Thin	150 μ m	2x3 (6 couples)	5.3	0.46	5.7	424	0.11	13.5	13
ICM-3028	Thick	150 μ m	4x4 (16 cples.)	5.8	0.83	16.3	628	0.13	26.0	9
ICM-3026	Thick	50 μ m	2x2 (4 couples)	6.0	0.05	6.3	23	0.20	271.2	258

La RTI International (Research Triangle Institute) produce array bidimensionali di moduli in superlattice formati da coppie n-p Bi_2Te_3 .

Questa tecnologia permette di creare moduli estremamente sottili e leggeri che sono facili da integrare in blocchi compatti con generatori ad impulsi e altri IMDs (Implantable Medical Devices). Nella tabella soprastante sono riportate 4 tipologie di dispositivi:

BCA-754: fabbricato con materiali sviluppati dal DARPA NMP (Defence Advanced Research Projects Agency NanoMaterials Program); rappresenta il tipico dispositivo termoelettrico con bassa differenza di temperatura.

ICM-2797: rappresenta la struttura standard in superlattice della RTI.

ICM-3028: fabbricato con un primo approccio per aumentare l'efficienza, ossia quello di creare le regioni p e n con spessore superiore (aumentare lo spessore porta alla riduzione delle perdite parassite dovute all'interfaccia termica delle coppie aumentandone la resistenza termica, cioè la difficoltà del calore ad attraversare i materiali, e quindi l'efficienza) e larghezza standard dei contatti di 150 μ m.

ICM-3026: rappresenta una combinazione di due sistemi per aumentare l'efficienza, cioè spessore superiore delle regioni n e p e contatti più piccoli (50 μ m). Questo riduce le perdite di calore di ogni coppia, aumentando però la resistenza termica.

I parametri più importanti per la tabella soprastante sono il rendimento η e l'efficienza della tensione d'uscita (V_{max}/Q_{in}). Questi parametri diventano critici quando si considerano operazioni con una bassa differenza di temperatura dove un modulo termoelettrico potrebbe non essere in grado di produrre una tensione d'uscita tale da alimentare dei dispositivi. In questo caso diventa necessario introdurre un convertitore Boost continua-continua (DC-DC); l'efficienza della conversione nella tabella è relativa solamente al dispositivo termoelettrico.

Come mostrato dalla tabella, già il dispositivo ICM-3028 mostra alcuni miglioramenti di efficienza e di tensione d'uscita confrontandolo con l'ICM-2797. L'ICM-3026 mostra invece un marcato guadagno in efficienza e un'aumento del rapporto V_{max}/Q_{in} rispetto all'ICM-3028. Confrontandolo con il BCA-754, l'ICM-3026 mostra solo un'aumento marginale di efficienza; tuttavia l'efficienza della tensione d'uscita aumenta di un fattore 3.

Qui si è mostrato che la qualità dei materiali termoelettrici viene mantenuta anche fabbricando una struttura che ha un'alto potenziale per le piccole differenze di temperatura, e che può fare la differenza nel convertire la tensione d'uscita in un livello utilizzabile (circa 3.3 V) rispetto a dispositivi che non possono alimentare un circuito elettronico.

Una piccola curiosità: questo orologio creato dalla Seiko si autoalimenta grazie alla differenza di temperatura fra il polso e l'aria, basandosi sull'effetto Seebeck. Quando allacciato al polso assorbe l'energia termica corporea e la dissipa dal fronte dell'orologio per generare potenza con il suo convertitore termico. Il problema si presenta quando la temperatura che assorbe dalla pelle è uguale alla temperatura esterna dell'aria, in quel caso non è in grado di generare energia.



Figura 10: Seiko Thermic Watch, un'esempio di orologio alimentato tramite un convertitore di energia termica.

Capitolo 3

Movimenti del Corpo Umano

3.1 Un'occhiata Generale

Le ricerche nel campo BAN (Body Area Network) e le loro applicazioni stanno riscontrando sempre maggiore interesse, soprattutto nel monitorare lo stato di salute del corpo umano, controllarne i movimenti e le sue attività. Sensori wireless indossabili rendono tutto questo possibile, collezionando informazioni sull'individuo singolo o sulla collettività, per arrivare ad anticipare le loro richieste prima che esse vengano espresse. Un'altra possibile applicazione è nell'ambito dell'AAL (Ambient-Assisted Living): collezionando informazioni fisiologiche in tempo reale è possibile calibrare meglio una terapia o prevenire eventi pericolosi come un'attacco cardiaco. Questi sensori però devono avere caratteristiche particolari: discrezione, cioè essere poco visibili, indossabilità, indossabili senza problemi, e di ampia autonomia in termini di durata della batteria. Ci sono 2 meccanismi diversi di conversione Vibrazioni-Energia Elettrica, cioè tramite 2 diversi principi:

Piezoelettricità:

Deriva dalla parola greca *πιέζειν* che significa premere, comprimere. E' la proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando sono soggetti ad una deformazione meccanica. Tale effetto è reversibile e si verifica su scale dell'ordine dei nanometri.

Il funzionamento di un cristallo piezoelettrico è abbastanza semplice: quando viene applicata una pressione (o decompressione) esterna, si posizionano, su facce opposte, cariche di segno opposto. Il cristallo così si comporta come un condensatore al quale è applicata una differenza di potenziale. Se le due facce vengono collegate tramite un circuito esterno, viene quindi generata una corrente elettrica detta corrente piezoelettrica. Al contrario, quando si applica una differenza di potenziale al cristallo, esso si espande o si contrae.

Elettromagnetismo:

Ovvero la presenza di un campo elettrico e un campo magnetico generati da cariche elettriche stazionarie, che sono in grado di creare una forza meccanica, detta forza di Lorentz. Questi tre fenomeni sono legati dalla Legge di Faraday-Lenz, che descrive il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, che si verifica quando il flusso del campo magnetico attraverso la superficie delimitata da un circuito elettrico è variabile nel tempo. La legge impone che nel circuito si generi una forza elettromotrice indotta pari all'opposto della variazione temporale del flusso.

La maggior parte dei micro e macro sistemi di generatori a vibrazione sono basati su sistemi di molle risonanti. Per una generazione di potenza ottimale la frequenza di risonanza dev'essere mantenuta ad una delle vibrazioni d'eccitazione. La Interuniversity Microelectronic Center ha fatto delle misurazioni sull'accelerazione delle braccia umane durante una passeggiata mettendo un'accelerometro e un data logger, ossia un dispositivo che misura e registra dati, nel polso di una persona. Da queste misurazioni sono giunti alla conclusione che il movimento di un braccio umano può essere approssimato da una sinusoide con una frequenza di 1 Hz e ampiezza di 10 cm. Collezionare queste piccole frequenze utilizzando un sistema di molle richiederebbe una massa elevata ($> 10^{-3}$ Kg), non utilizzabile in applicazioni per il corpo umano. In questa situazione i sistemi non risonanti sono un'interessante alternativa.

Un circuito non risonante è, per esempio, un semplice dispositivo formato da una massa libera di muoversi dentro un telaio rigido e da un'apposito trasduttore che trasformi l'energia cinetica dissipata dall'impatto della massa sul telaio in energia elettrica.

La potenza generata da questo sistema può essere valutata numericamente e comparata con quella di un circuito risonante.

Come si può vedere dal grafico sottostante, che riporta la potenza di uscita contro il massimo spazio disponibile per la massa, normalizzato all'ampiezza di eccitazione, la raccolta di energia dai movimenti è uno strumento interessante per le applicazioni sul corpo umano, dato che la potenza di uscita è sufficiente per alimentare dispositivi come sensori ecc.

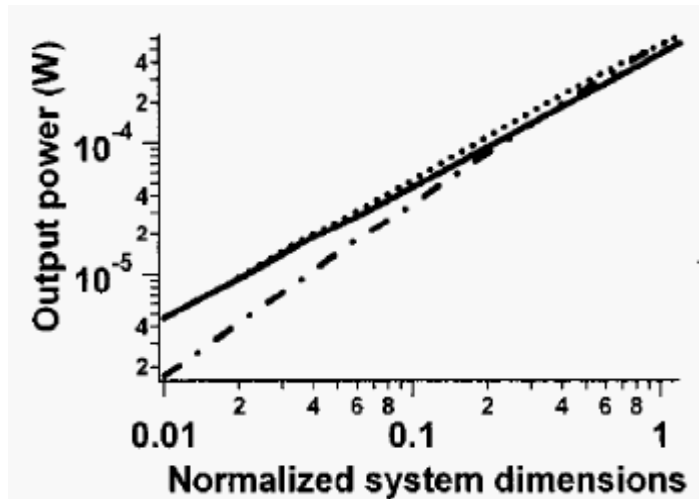


Figura 3.1: Potenza di uscita contro lo spazio disponibile per la massa, normalizzato all'ampiezza di eccitazione. Linea piena: sistema di molle risonante, linea con tratteggi e pallini: raccoglitore cinetico, linea a pallini: raccoglitore cinetico con forza frenante. Prestazioni calcolate con una massa di 750 mg, frequenza di 1 Hz e ampiezza del movimento di 10 cm. Le perdite dovute ad effetti parassiti sono state trascurate.

3.2 Modello di un Kinetic Energy Scavenger

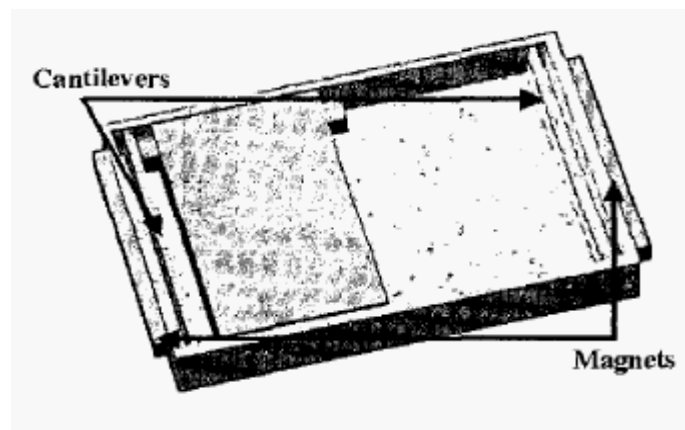


Figura 3.2: Un disegno di un Raccoglitore Cinetico con forza frenante (i due magneti).

Quello della figura 3.2 è un modello di un raccoglitore cinetico basato su un trasduttore piezoelettrico. L'energia cinetica accumulata dalla massa libera in movimento è trasferita dall'impatto con l'estremità del telaio (Cantilevers). Il telaio è costituito alle sue estremità da due capacità formate da due elettrodi e uno strato piezoelettrico come dielettrico. Se la capacità è collegata ad un carico resistivo, il telaio genera una corrente nel carico, la potenza viene dissipata e il movimento della massa viene attenuato.

I parametri chiave sono il peso della massa e il suo massimo spostamento interno, la rigidità del telaio e lo smorzamento meccanico dovuto alla potenza dissipata nella resistenza di carico. Quella seguente rappresenta l'espressione della forza agente su un telaio piezoelettrico vibrante connesso in serie a una resistenza. In termini di posizione x_b e di velocità x'_b , è data da:

$$F_b = k_b(x_b - x_{b0}) + R_L(K_e K_b)^2 x'_b$$

Il primo termine è semplicemente la forza elastica dovuta alla rigidità del telaio (x_{b0} è la posizione iniziale, k_b è la rigidità); il secondo termine rappresenta lo smorzamento meccanico effettivo, proporzionale alla velocità e alla resistenza di carico R_L . Le costanti K_e e K_b sono date da:

$$K_e = d_{31} E_{pz} W \text{ e } K_b = 0.75 * T/L$$

dove d_{31} è la costante di stress piezoelettrica, E_{pz} è il modulo di Young, cioè il coefficiente di elasticità di un solido, e W, T, L sono rispettivamente la larghezza, lo spessore e la lunghezza del telaio.

Questa espressione è valida solo se l'impedenza del carico R_L è più piccola dell'impedenza della capacità $1/\omega C_{pz}$. La potenza dissipata nel carico può essere calcolata integrando il lavoro svolto dalla forza smorzante nel periodo di eccitazione.

3.3 Dinamiche del Sistema

Il modello appena citato del telaio rigido può essere schematizzato come un problema non lineare, difficile da gestire analiticamente. Oltretutto, visto che l'ingresso del sistema è supposto sinusoidale, le equazioni che governano il sistema sono di natura trascendente, e non ammettono soluzioni per via analitica. Per riuscire ad integrare queste equazioni è stato usato un algoritmo basato su metodo di integrazione Kutta-Merson. Questo viene considerato una semplificazione nel nostro caso, prendendo come ipotesi il fatto che i corpi non sono deformabili e che l'urto sia perfettamente inelastico. La massa del telaio si assume sia molto più piccola della massa libera di muoversi; in questa situazione la perdita di energia dovuta all'impatto inelastico è trascurabile. L'algoritmo viene usato per risolvere i sistemi di equazioni sotto riportati:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x} = -m\ddot{y} \\ m_b \ddot{x}_b = -m_b \ddot{y} + F_b \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = x_b \\ (m_b + m)\ddot{x} = -(m_b + m)\ddot{y} + F_b \end{array} \right\}$$

dove y è la posizione del telaio, x la coordinata della massa mobile e x_b la posizione delle estremità del telaio.

Il primo sistema rappresenta la forza inerziale dovuta all'accelerazione della massa mobile, il secondo rappresenta la somma della forza inerziale e della forza data dall'espressione sopra riportata (F_b). Il primo sistema ha soluzioni finché $x = x_b$, a questo punto vale il secondo sistema di equazioni che viene risolto usando come condizioni iniziali le soluzioni del primo sistema.

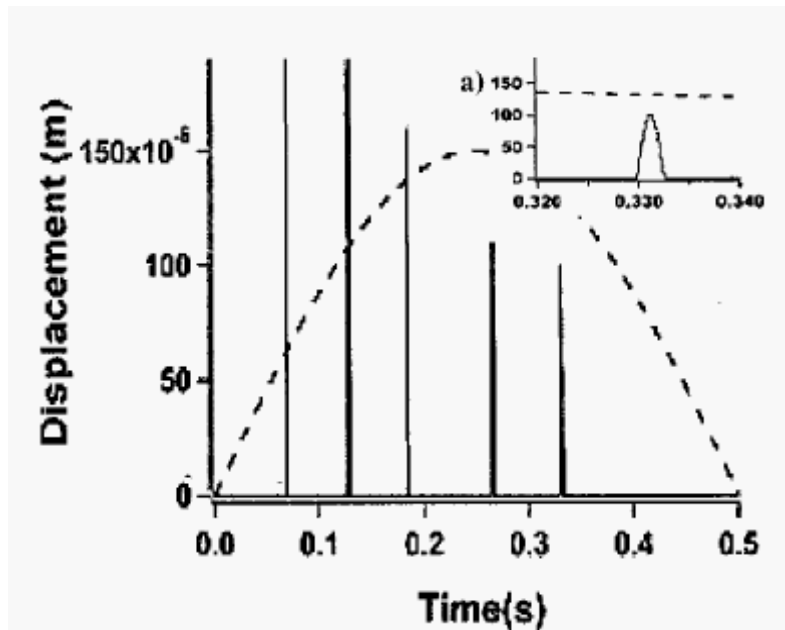


Figura 3.3: In linea continua è rappresentato lo spostamento delle estremità del telaio contro il tempo, in linea tratteggiata l'accelerazione delle estremità stesse. Da notare gli impatti multipli durante metà periodo dell'accelerazione delle estremità. La massa pesa 750 mg, la rigidità del telaio è 1000 N/m. Il prodotto $K_e K_b$ è posto a $3.6 \cdot 10^{-4}$ e $R_L = 385 \text{ k}\Omega$. La vibrazione ha un'ampiezza di 10 cm e una frequenza di 1 Hz. Il riquadro a) è un'ingrandimento del comportamento durante l'ultimo impatto.

La figura seguente è stata ottenuta assumendo che l'impedenza del condensatore piezoelettrico sia maggiore della resistenza di carico. Quando la resistenza di carico diventa troppo grande la corrente tende principalmente ad attraversare il condensatore, diminuendo la potenza dissipata nella resistenza stessa ad ogni ciclo. Questa potenza non viene persa, ma semplicemente consumata nel ciclo successivo.

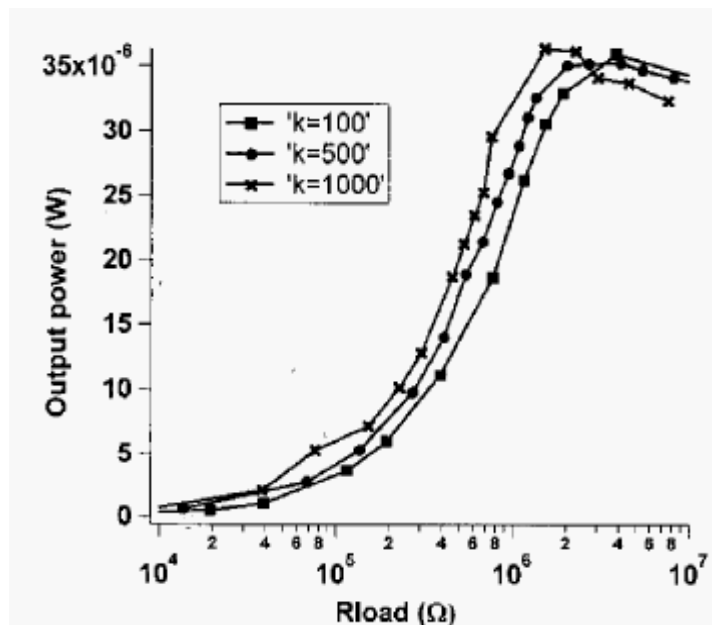


Figura 3.4: Potenza di uscita del dispositivo in funzione della resistenza di carico con valori diversi di rigidità del telaio.

Un dispositivo di questo tipo ha un volume di circa 1 cm^3 ed è capace di generare una potenza di circa $40 \text{ }\mu\text{W}$ quando posizionato sul polso di una persona che cammina. Viene utilizzato per applicazione in BAN (Body Area Network) nei casi in cui serve trasmettere delle semplici informazioni con un basso duty-cycle.

3.4 Energy Scavenger per il Monitoraggio del Corpo Umano

Un'idea interessante per un Energy Scavenger cinetico collegato ad un circuito di gestione e stoccaggio dell'energia elettrica, facile da indossare e di grandezza ridotta è presentato dall'orologio da polso al quarzo della Seiko Kinetic. Grazie al movimento, quest'orologio è in grado di autoricaricarsi trasferendo l'energia elettrica da una supercapacità interna dove viene immagazzinata, ad una capacità più piccola in modo da avere energia subito disponibile. Il circuito che sta dietro a tutto ciò è formato da centinaia di porte logiche integrate in un ASIC (Application Specific Integrated Circuit). La realizzazione non è molto semplice, con il rischio di ridurre le prestazioni se si prova a renderlo più piccolo, tuttavia è il punto di partenza per creare un Energy Scavenger cinetico con le stesse caratteristiche e gli stessi pregi dell'orologio della Seiko Kinetic.

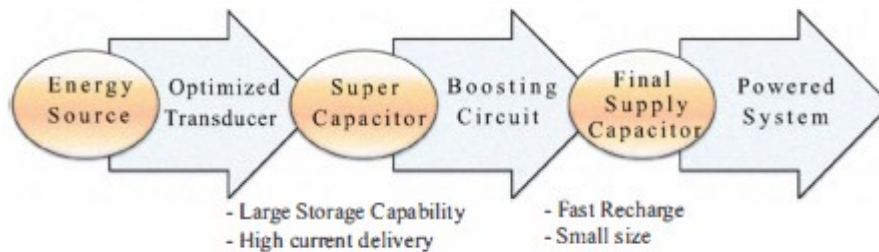


Figura 3.5: Architettura dell'Energy Scavenger cinetico.

L'obiettivo del sistema proposto è di immagazzinare la carica raccolta dall'Energy Scavenger in una supercapacità per poi trasferirla ad un piccolo accumulatore che può raggiungere velocemente un livello di potenza sufficiente per alimentare dei sensori (tempo di start-up), come mostrato nella figura soprastante.

L'accumulatore serve per diminuire i tempi di start-up; senza di esso questi tempi sarebbero molto maggiori (si parla anche di qualche minuto). Le supercapacità sono in grado di accumulare una grossa quantità di energia, però la loro costante di tempo $\tau = RC$ è estremamente alta, questo dovuto al fatto che il valore di C è molto elevato (che può arrivare anche a valori di 5 kF). Per questo motivo la tensione cresce molto lentamente quando sono caricati da valori molto bassi di corrente. Un livello di tensione utilizzabile viene raggiunto in tempi molto lunghi e questo è inaccettabile in molte applicazioni. Per questo motivo viene utilizzata la supercapacità come immagazzinatore di carica. Il sistema successivamente trasferisce parte della carica immagazzinata in una capacità più piccola, dove il livello di tensione cresce più velocemente, fornendo direttamente energia al carico. Questo riduce enormemente i tempi di start-up.

3.4.1 Circuito di Avviamento

Il cuore dell'Energy Scavenger è proprio il circuito di avviamento. Il suo scopo è di trasferire la carica immagazzinata nella supercapacità in una più piccola, detta capacità finale. Ci sono vari metodi per realizzare questa parte di circuito, in particolare viene preso in esame una soluzione in cui la supercapacità e la capacità finale sono utilizzate insieme con uno o più condensatori pilota, dove la moltiplicazione di tensione è ottenuta collegando queste capacità in diverse configurazioni.

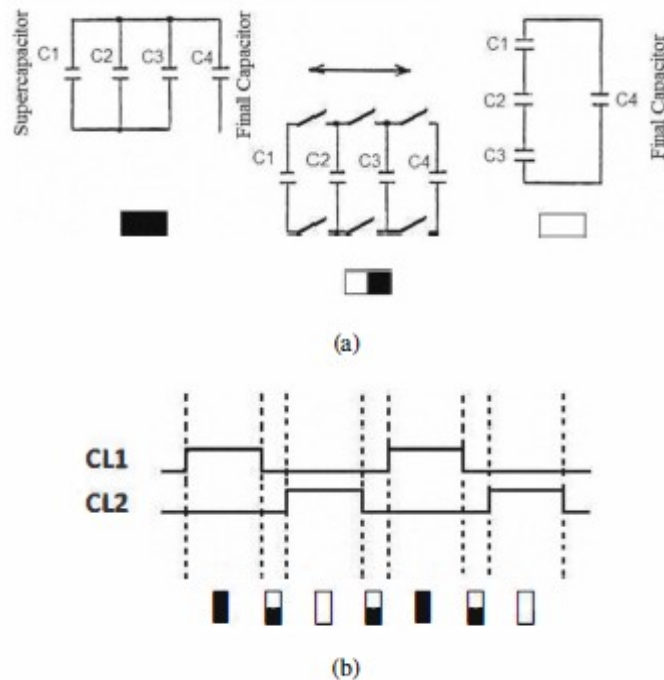


Figura 3.6: Schema di funzionamento del circuito di avviamento con un fattore moltiplicativo pari a 3.

La figura 3.6a mostra tutto questo: nella configurazione a sinistra, le capacità pilota C_2 e C_3 sono in parallelo con la supercapacità C_1 e sono caricate alla sua stessa tensione; nella configurazione a destra, la serie C_1 , C_2 e C_3 crea una caduta di tensione attorno alla capacità finale C_4 pari a 3 volte la tensione presente ai capi di C_1 . Saltando da una configurazione all'altra, ogni cambio accresce la tensione di C_4 di una quantità pari a δV , finché non viene raggiunta una tensione pari al triplo della tensione di C_1 , come mostrato nella figura 3.7. Il numero di δV e il loro valore dipende da molti parametri, come il valore delle capacità pilota, il valore della capacità finale, la frequenza di lavoro.

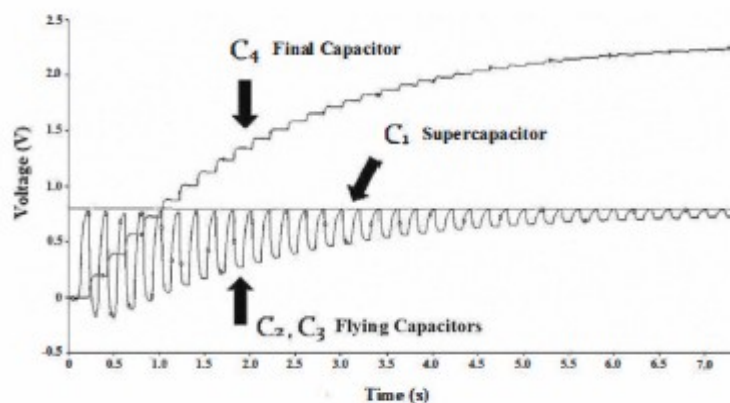


Figura 3.7: Tensione ai capi delle varie capacità del circuito di avviamento durante un ciclo di carica.

Le operazioni di scambio dei circuiti sono regolate dai segnali di clock CL_1 e CL_2 visibili nella figura 3.6b. I segnali sono in opposizione di fase, ma c'è un momento in cui sono entrambi bassi: questa precauzione serve per prevenire configurazioni indesiderate delle capacità, dovute a possibili alterazioni del segnale che possono compromettere il funzionamento del circuito di avviamento. Teoricamente, con il metodo descritto, usando n capacità pilota dello stesso valore, il fattore moltiplicativo può essere così ottenuto:

$$\overline{M}_n = \left\{ 1; 1 + \frac{k}{j}; \overline{M}_{n-1} + 1 \right\}_{\substack{j=1\dots n \\ k=1\dots j-1}}$$

Dove $\overline{M}_1 = \{1;2\}$.

Per ridurre l'area del sistema, costi e complessità vengono utilizzate soltanto 2 capacità pilota. Il fattore moltiplicativo così ottenuto è incluso nel vettore $\overline{M}_2 = \{1;1.5;2;3\}$. Fra questi valori, il più grande viene scelto per attivare il sistema più velocemente.

3.4.2 Dimensionamento

La capacità finale C_4 dev'essere in grado di immagazzinare abbastanza carica da permettere al nodo di sensori di completare il proprio lavoro prima che C_4 si scarichi del tutto e i sensori si spengano. Viene preso in esame un nodo di sensori equipaggiato con un microcontrollore MSP430 della Texas Instruments: la sua tensione di alimentazione varia da 1.8 V a 3.6 V e la potenza media utilizzata da tutto il nodo è circa 400 μ W, compreso un convertitore A/D, un cancellatore Flash, uno scrittore Flash e un radiocomunicatore, tutto integrato nel nodo. Se caricato a 3.6 V, una capacità finale di 470 μ F può alimentare il nodo per un tempo pari a circa 5.7 s, senza trasferimento di energia addizionale dalla supercapacità. Questo tempo è sufficiente al microcontrollore per eseguire tutti i test e spegnersi. Per questo, la capacità finale viene fissata a 470 μ F.

La scelta della supercapacità ha due possibilità: da una parte deve disporre di più capacità possibile per immagazzinare più carica e garantire una lunga autonomia al circuito; dall'altra un valore elevato di capacità aumenta il tempo necessario per raggiungere un livello di tensione adeguato per iniziare la moltiplicazione di tensione, aumentando il tempo di start-up del nodo.

Dopo varie misurazioni è stato riscontrato che un buon compromesso fra autonomia e tempo di start-up si ottiene con un valore di supercapacità pari a 0.33 F.

Le capacità pilota C_2 e C_3 vengono scelte uguali. Il loro valore ottimale è quello che minimizza il tempo impiegato dalla capacità finale per raggiungere una tensione pari a 3 volte la tensione ai capi della supercapacità. Questo valore dipende dalla frequenza di funzionamento e dal valore della capacità finale: una frequenza elevata implica, come un valore basso di capacità finale, un valore ridotto delle capacità pilota.

Visto che il valore della capacità finale è già stato fissato, sono stati calcolati sperimentalmente i valori ottimali delle capacità per una vasta gamma di frequenza di funzionamento. Il tempo di carica in funzione del valore delle capacità pilota è mostrato nella figura 3.8, dove i valori ottimali per ogni frequenza sono stati segnati con un cerchio.

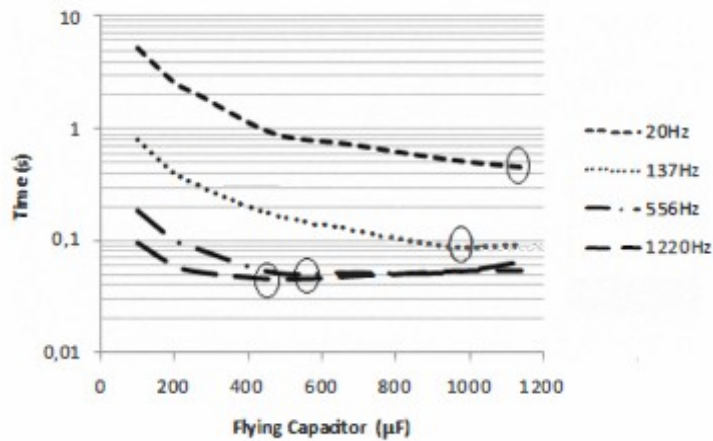


Figura 3.8: Tempo di carica delle capacità pilota per diverse frequenze di funzionamento. La capacità finale è pari a 470 µF. Il valore ottimale per ogni frequenza è stato segnato con un cerchio.

Visto che i valori ottimali delle capacità sono stati fissati per una certa gamma di frequenze, scelta la frequenza si ha già il valore della capacità. Nella tabella 1 è riportata la potenza media trasferita alla capacità finale in un ciclo di avviamento e la potenza assorbita dal circuito di avviamento, dall'alimentazione. E' facile vedere che la potenza media trasferita non aumenta proporzionalmente con la frequenza: quando questa arriva a circa 1 kHz, la potenza media trasferita tende a saturare, mentre la potenza media assorbita continua a crescere.

TABLE I
POWER ANALYSIS DURING A BOOSTING CYCLE

Switching Frequency	Average Transferred Power	Power Absorbed from Supply
20 Hz	2.94 mW	2.40 µW
140 Hz	15.4 mW	3.60 µW
550 Hz	26.0 mW	5.70 µW
1220 Hz	29.7 mW	8.40 µW
2270 Hz	30.2 mW	13.8 µW

Il rapporto fra la potenza media trasferita e la potenza media assorbita per un range di frequenze di 2500 Hz è mostrato nella figura 3.9. Da notare che tutti i valori in questo range sono sufficientemente elevati, ciò dimostra il buon funzionamento del circuito di alimentazione; tuttavia il circuito presenta un massimo attorno a 500 Hz per poi decrescere velocemente. Per questa ragione viene presa la frequenza di funzionamento pari a 500 Hz e quindi i valori delle capacità pilota C_2 e C_3 pari a 470 µF.

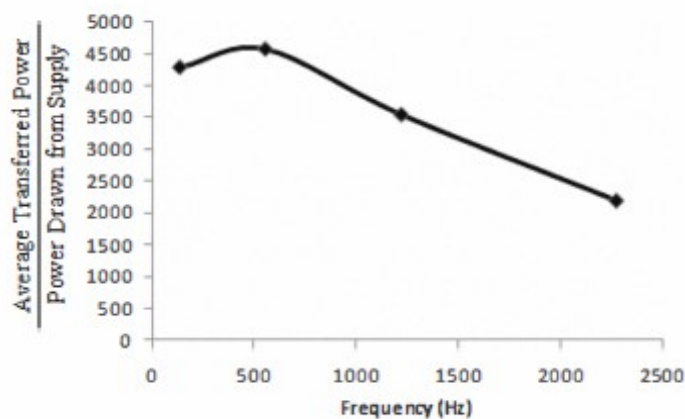


Figura 3.9: Rapporto fra la potenza media trasferita e la potenza media assorbita per un range di frequenze da 0 a 2500 Hz.

3.4.3 Operazioni di Raccolta

L'architettura dell'Energy Scavenger è mostrata in figura 3.10. Per una prima analisi non viene presa in considerazione la parte del circuito di avviamento (la parte il azzurro, Quick Start #).

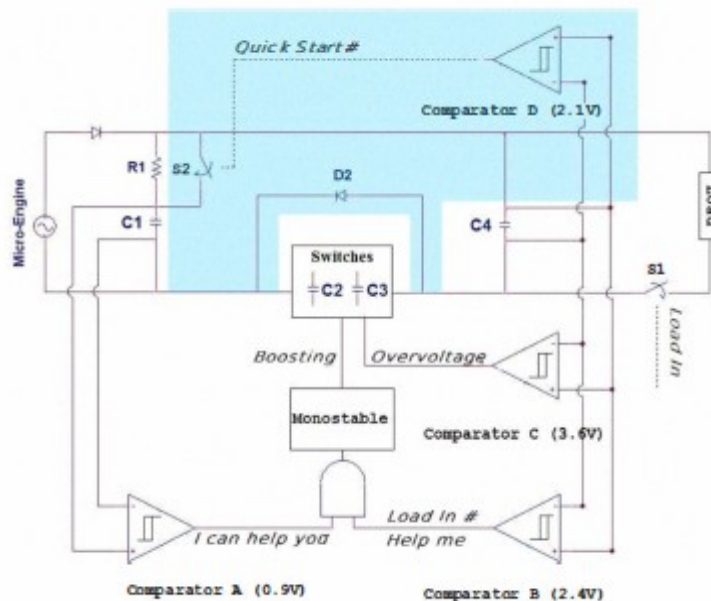


Figura 3.10: Schema dell'intero Energy Scavenger.

Il comparatore A, con una soglia interna di 0.9 V, controlla la tensione ai capi della supercapacità. La sua uscita, denominata "I can help you" fornisce un segnale logico alto quando la tensione ai capi della supercapacità supera questa soglia; ciò significa che è pronto a fornire la carica alla capacità finale tramite il circuito di avviamento.

Il comparatore B, con una soglia interna di 2.4 V, controlla la tensione ai capi della capacità finale. La sua uscita, denominata "Help me", fornisce un segnale logico alto finché la tensione ai capi della capacità finale è inferiore alla soglia del comparatore. Questo significa che questa ha bisogno di essere aiutata dalla supercapacità per poter alimentare il nodo di sensori.

Quando entrambi i segnali sono a livello logico alto, il circuito monostabile è abilitato e ponendo la sua uscita a valore logico alto, abilita il circuito di avviamento per un periodo prefissato da dei parametri interni.

Questo tempo è calcolato in modo tale da caricare la capacità finale fino a 3 volte la tensione della supercapacità.

Per prevenire che la capacità finale si carichi oltre i 3.6 V quando la supercapacità raggiunge 1.2 V, il comparatore C, con una soglia interna di 3.6 V, controlla la tensione ai capi della capacità finale; la sua uscita, chiamata "Overvoltage", fornisce un segnale logico alto quando la tensione supera questa soglia, fermando il circuito di avviamento.

L'uscita del comparatore B è usata anche come "Load in #": quando è bassa, attivando lo switch S1, connette il nodo di sensori all'alimentazione fornita dalla capacità finale.

Infine, il diodo Schottky D_1 (costituito da una giunzione metallo-semiconduttore invece che da una giunzione a semiconduttore; le sue caratteristiche sono la tensione di soglia di 0.35 V invece che di 0.6 V e tempi di commutazione brevissimi) rettifica la tensione fornita dal microgeneratore.

3.4.4 Circuito di Avviamento Veloce

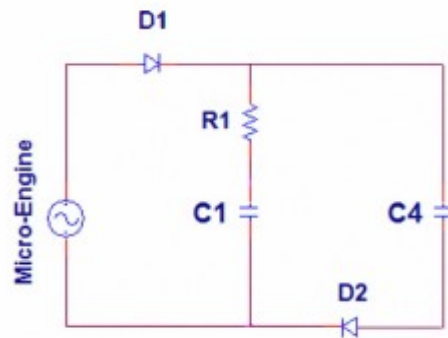


Figura 3.11: Circuito equivalente quando il segnale "Quick-start #" è a livello logico basso e il circuito di avviamento veloce è abilitato.

Il circuito di avviamento è alimentato dalla stessa capacità finale che alimenta il nodo di sensori. Per questo motivo questa capacità dev'essere precaricata in un certo tempo prefissato, detto "Setup Time".

Quando la tensione ai capi della capacità finale è inferiore a 2.1 V, l'uscita "Quick-start #" del comparatore D è a livello logico basso, lo switch S_2 è aperto e il circuito di avviamento è spento: il circuito equivalente è mostrato in figura 3.11, che non è altro che la parte evidenziata in azzurro della figura 3.10.

Il diodo Schottky permette alla capacità C_4 di caricarsi fino a $V_1 + R_1 I_1$, impedendole però di scaricarsi se la corrente I_1 si azzerà. Quando V_4 raggiunge i 2.1 V, l'uscita "Quick-start #" passa a livello logico alto, chiudendo lo switch S_2 : la resistenza R_1 è by-passata dallo switch e la carica generata dal microgeneratore è usata interamente per caricare la supercapacità C_1 . La capacità finale è ora a 2.1 V, tenendo alto il segnale "Help me" del comparatore B, pronta ad alimentare il circuito di avviamento quando la tensione ai capi di C_1 cresce oltre i 0.9 V, generando il segnale "I can help you".

3.4.5 Implementazione

Il sistema analizzato viene implementato mediante componenti OTS, ossia componenti disponibili sul mercato per l'acquisto da parte di aziende di sviluppo interessate ad utilizzarli nei loro progetti. Questo rende i costi moderati anche per bassi volumi di produzione, senza la necessità di usare circuiti ASICs complessi. Tutte le porte logiche hanno una componente AUP (Advanced Ultra-low Power) con una riduzione dei consumi pari a circa il 30% di una normale porta logica CMOS. I comparatori appartengono alla famiglia S1000 della Seiko, caratterizzati da un'alta precisione di controllo della tensione (con un'accuratezza del $\pm 1\%$), ridotto consumo di corrente (poche centinaia di nA) e di piccole dimensioni. Il clock è generato da un comparatore MAX919, avente un ridotto consumo di corrente, opportunamente inserito in un anello di retroazione per creare un'oscillatore a consumo ultra-ridotto.

La compattezza del sistema, unita ad un bassissimo consumo, lo rende perfetto per questo tipo di applicazioni.

Il nodo di sensori è un sistema miniaturizzato con architettura modulare, dove ogni blocco funzionale viene montato solo se richiesto dall'applicazione. Il cuore del nodo è basato su un microcontrollore RISC (Reduced Instruction Set Computer) a basso consumo (MSP430 della Texas Instruments) che garantisce un'ottimo compromesso fra consumo di energia e prestazioni.

3.4.6 Misurazioni

In questo paragrafo vengono presi in considerazione due sistemi: da una parte la supercapacità collegata assieme alla capacità finale, dall'altra una supercapacità che funziona sia da immagazzinatore di carica sia da fonte di energia per il carico. In particolare viene calcolato per entrambi i sistemi il tempo impiegato per raggiungere una tensione utile ad alimentare il carico, detto "Wake-Up time". Il carico è un nodo di sensori MSP430: la minima tensione di alimentazione è di 1.8 V. La supercapacità singola è in grado di alimentarlo appena la tensione cresce e resta stabile oltre la tensione minima di alimentazione; l'Energy Scavenger invece ha bisogno di raggiungere e superare i 2.4 V per essere alimentato. Per questo motivo il Wake-Up time viene definito per la singola capacità come il tempo impiegato per raggiungere e rimanere stabile a 1.8 V, mentre per l'Energy Scavenger come il tempo per raggiungere i 2.4 V.

Il microgeneratore utilizzato per simulare il movimento è stato creato dalla Precision Microdrives ed è mostrato nella figura sottostante.



Figura 3.12: Esempio di un microgeneratore utilizzato per le applicazioni sul corpo umano.

Il microgeneratore viene attaccato al polso, con una frequenza di movimento di circa 0.5 Hz. L'ampiezza dello stimolo generato dipende da molti fattori: accelerazione, amplificazione e impedenza di carico. Questo generatore è in grado di generare una tensione variabile fra 1.6 e 3.3 V quando viene chiuso su un'impedenza fra i 45 Ω e 45 k Ω . Il Wake-Up time calcolato è mostrato nella tabella II.

TABLE II
WAKE-UP TIMES

Stimulus Amplitude	Wake-up Time Supercapacitor	Wake-up Time Energy Scavenger
3.6 V	100 s	20 s
3.2 V	140 s	20 s
2.8 V	200 s	30 s
2.5 V	290 s	85 s

Da notare che l'Energy Scavenger è pronto ad alimentare il carico in un tempo 7 volte inferiore rispetto alla singola supercapacità.

Il confronto fra i tempi di wake-up dei due sistemi è mostrato in figura 3.13.

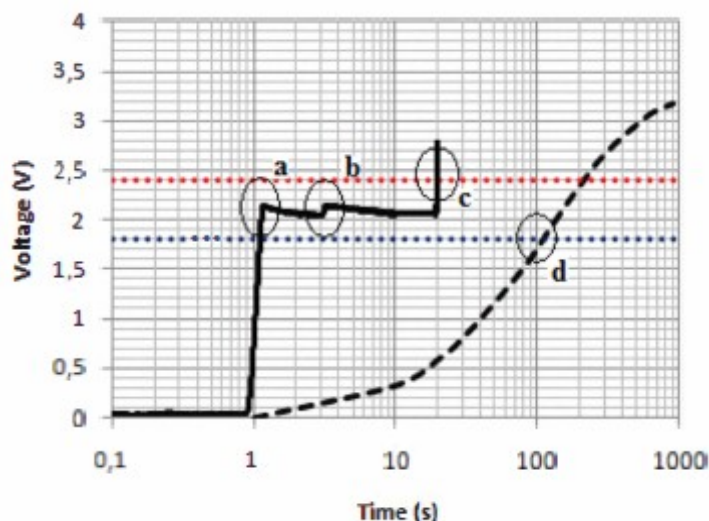


Figura 3.13: Confronto fra la carica ottenuta con l'Energy Scavenger (linea continua) e la supercapacità (linea tratteggiata). Il tempo di wake-up del primo è visualizzato al punto "c" mentre del secondo al punto "d".

La tensione ai capi della supercapacità cresce lentamente mentre quella ai capi dell'Energy Scavenger raggiunge rapidamente i 2.1 V grazie al circuito di avviamento veloce.

Al punto "a" il circuito di avviamento si spegne e la capacità finale lentamente si scarica per alimentare l'Energy Scavenger; al punto "b" il circuito di avviamento viene riattivato per permettere alla capacità finale di raggiungere nuovamente i 2.1 V. Al punto "c" la supercapacità è caricata sufficientemente per attivare il circuito di avviamento e la tensione ai capi della capacità finale cresce fino a 3 volte la tensione della supercapacità, superando i 2.4 V e alimentando il carico. Il punto "c" determina il tempo di wake-up dell'Energy Scavenger. Il tempo di wake-up della singola supercapacità è più lungo, e viene determinato al punto "d".

Un'altro confronto a livello sperimentale è stato fatto aumentando la durata dello stimolo in ingresso.

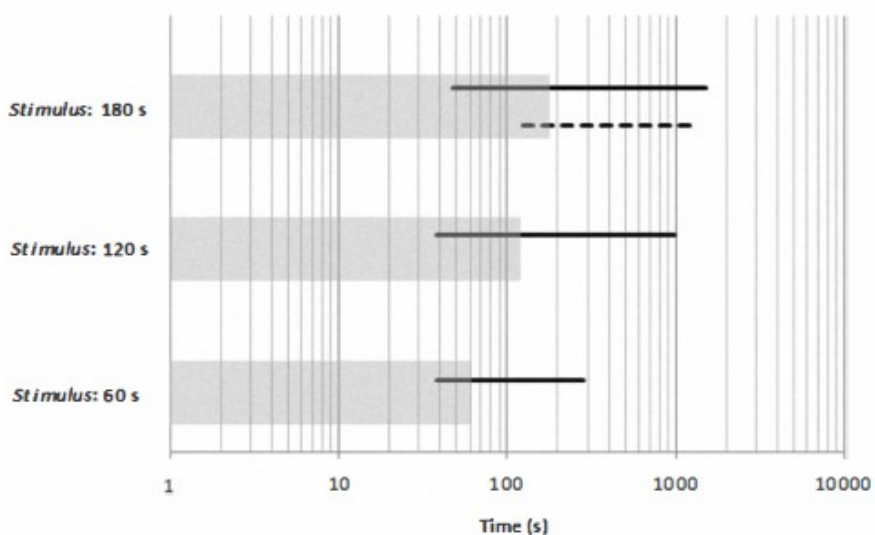


Figura 3.14: Confronto fra il comportamento dell'Energy Scavenger (linea continua) e la singola supercapacità (linea tratteggiata) quando eccitati con brevi stimoli (area colorata).

La figura 3.14 illustra i risultati ottenuti utilizzando un'onda sinusoidale di ampiezza 3.2 V e frequenza 0.5 Hz.

La zona colorata mostra la durata del segnale applicato, mentre le linee indicano dove l'Energy Scavenger (linea continua) e la capacità singola (linea tratteggiata) iniziano e finiscono di alimentare il nodo. Da notare che l'Energy Scavenger può alimentare il carico anche con brevi stimoli in ingresso, cosa che la supercapacità non è in grado di fare (i casi nel diagramma con stimoli a 60 e 120 s).

Capitolo 4

Confronto fra Energy Harvesting

Si è in grado ora di mettere a confronto le due diverse tipologie di Energy Harvesting per capire pregi e difetti di entrambe. Il confronto viene fatto fra la potenza generata e il volume occupato da entrambi i dispositivi quando il soggetto cammina oppure corre. La figura 4.1 mostra i limiti delle prestazioni dell'energia termoelettrica e cinetica in un soggetto che corre come funzione del volume occupato.

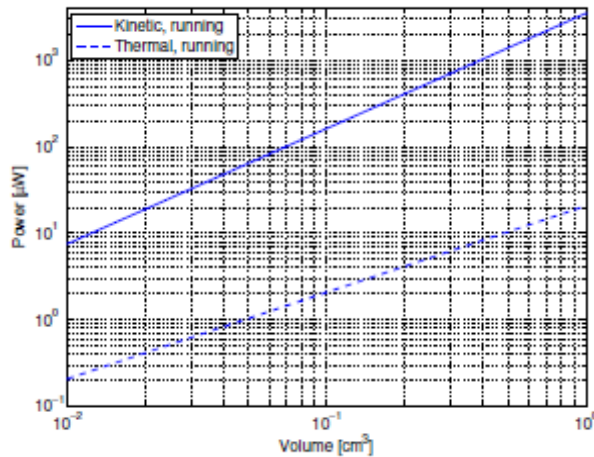


Figura 4.1: Limiti delle prestazioni dell'energia termoelettrica e dell'energia cinetica in un soggetto che corre.

In un soggetto che cammina il confronto è mostrato nella figura 4.2:

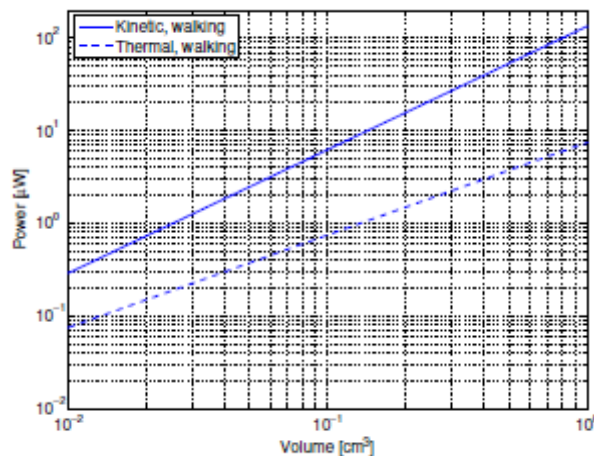


Figura 4.2: Limiti delle prestazioni dell'energia termoelettrica e dell'energia cinetica in un soggetto che cammina.

Come si può vedere i dispositivi ad energia cinetica sono superiori in entrambi i casi, specialmente se il soggetto sta correndo. Viene generata una densità di potenza teorica di circa $300 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ dall'energia cinetica, rispetto ai $20 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ dell'energia termoelettrica. Tuttavia, le analisi non hanno considerato la difficoltà di fabbricazione dei dispositivi e quanto le densità di potenza possono avvicinarsi ai limiti teorici. Lo stato attuale di sviluppo dei dispositivi cinetici e termoelettrici mostra che i dispositivi termoelettrici hanno un'efficienza di conversione del 70%, quando la migliore efficienza dei dispositivi cinetici arriva solo all'1%. Applicare queste considerazioni ai grafici soprastanti diventa utile per determinare quale delle due tipologie di dispositivi è più sfruttabile al momento.

La figura 4.3 mostra che, in un soggetto che corre, la differenza fra i due dispositivi diventa molto minore rispetto al caso ideale, in particolare i dispositivi termoelettrici possono generare una potenza maggiore con un'ingombro minore di area nel caso di un soggetto che corre.

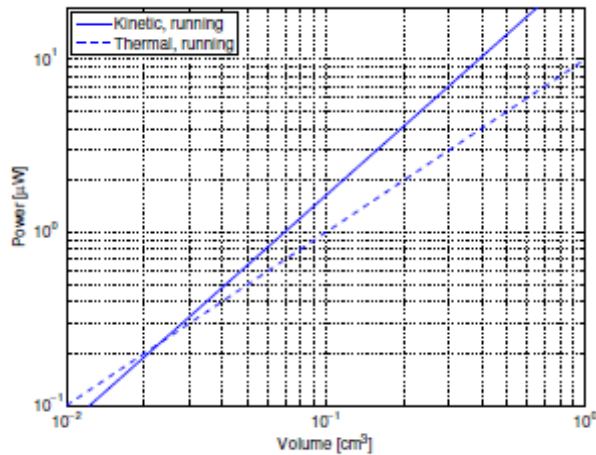


Figura 4.3: Prestazioni dei dispositivi termoelettrici e cinetici in un soggetto che corre nel caso reale.

Quando il soggetto cammina, questi si dimostrano nettamente superiori rispetto ai dispositivi cinetici (figura 4.4).

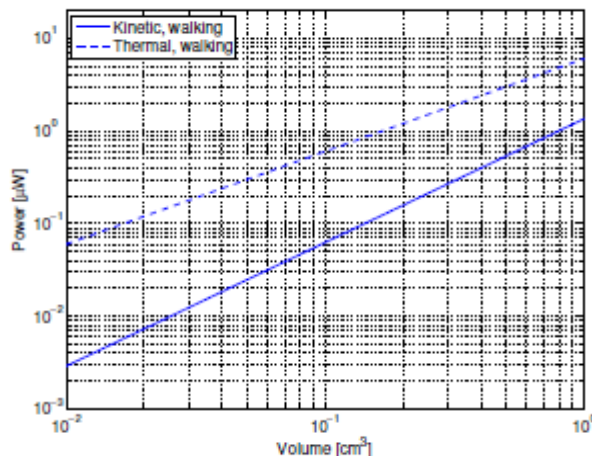


Figura 4.4: Prestazioni dei dispositivi termoelettrici e cinetici in un soggetto che cammina nel caso reale.

Una chiave per ottenere la più alta densità di potenza media per entrambi i dispositivi è fare in modo che questi riescano ad adattarsi alle situazioni che si presentano: un dispositivo cinetico dev'essere in grado di modificare la sua frequenza di risonanza e lo smorzamento per operare alla massima densità di potenza quando il soggetto corre o cammina e i dispositivi termoelettrici dovrebbero essere in grado di modificare la loro resistenza termica per operare in modo efficiente nelle due situazioni. Queste caratteristiche sono difficili da realizzare per entrambi i dispositivi, ma sono un'area attiva di ricerca, soprattutto nel caso dell'energia cinetica. Nella tabella 4 sono riportati vari metodi di Energy Harvesting con i relativi pregi e difetti.

Table 4: Summary of different types of energy converters.

Harvester type	Output voltage	Power density	Efficiency	Notes ^{a)}
Photovoltaic	Typically 0.7 ± 1.5 VDC per module. Up to 2.5 VDC per module in multijunction devices [5].	15 mW/cm^2 [1] 10 mW/cm^2 , $10 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ in indoor lighting [51, 52]	Highest: $32.0 \pm 1.5\%$ Typical: $25.0 \pm 1.5\%$ [5]	<ul style="list-style-type: none"> + Direct DC voltage easy for energy management hardware - Amount of light might be insufficient • Commercially available
Thermoelectric	Up to 10 VDC with commercial modules ^{b)} [16–18].	Up to 10 mW/cm^2 [7]	$2.70 - 5.02\%$ ^{c)} 3% [51]	<ul style="list-style-type: none"> + Direct DC voltage easy for energy management hardware • Commercially available [16–18] + Relatively high output voltage - Typically very high output impedance, $> 100 \text{ k}\Omega$ [20] • Commercially available [29–31]
Piezoelectric	$2 - 10 \text{ VAC}$ [24]	$250 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ [41] $330 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ [11]	^{e)}	<ul style="list-style-type: none"> - Low output voltage difficult for energy management hardware • Commercially available [35, 37] • Relatively high output current levels achievable at the expense of low voltages [20]
Electromagnetic	$< 1 \text{ VAC}$ [20] $0.1 - 0.2 \text{ VAC}$ [41] Typical values for commercial harvesters are up to 10 VDC ^{d)} [35, 37].	^{d)}	^{e)}	<ul style="list-style-type: none"> + Easiest to integrate in MEMS systems [41] - Separate voltage source and mechanical stops needed [24] - The output impedance is often very high [20] • At research stage, no commercial solutions available
Electrostatic	$2 - 10 \text{ VAC}$ [24] $\geq 250 \text{ VAC}$ [40]	$50 \text{ }\mu\text{W/cm}^3$ [41]	^{e)}	<ul style="list-style-type: none"> + Energy can be harvested from ambient electromagnetic radiation, but the power density is very low - Higher power density can be achieved with external RF transmitter [7] • Commercially available for 915 MHz (ITU region 2, North and South America) [50]
RF	$3.3 - 5.25 \text{ VDC}$ (commercial harvesting modules) [50]	GSM 900/1800 MHz: $0.1 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ WiFi 2400 MHz: $0.01 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ [51]	50% ^{b)} [7, 50]	

a) + Advantage, - Disadvantage, • Other notable issue

b) Depends on the number of the thermoelectric couples in module, and the temperature gradient.

c) Commercial thermoelectric modules reported in this work.

d) Mitcheson et al. [2] state, that power density provides a meaningful comparison only in situations when the source characteristics are fixed

e) Max power, and therefore the efficiency, is source dependent

f) Commercial electromagnetic harvester modules include energy management hardware. The size is also a notable issue.

g) Efficiency of the harvester itself, excluding transmission efficiency.

Confronto dei Costi

Varie compagnie di Energy Harvesting sono state intervistate per capire come il loro andamento dei prezzi varierà nei prossimi anni, visto che al momento i dispositivi sono ancora in fase di sviluppo con qualche prototipo che non rispecchia l'effettivo costo sul mercato.

Le compagnie intervistate sono le seguenti:

Perpetuum (electromagnetic vibrations harvesters), Invent (piezoelectric harvesters), Micropelt (thermal generators), Powercast (RF harvesters).

Tutte sono d'accordo sul fatto che i dispositivi non sono pronti per essere commercializzati e quindi sono ancora molto esitanti sul definirne con costo, visto che dipende molto dal tipo di utilizzo. Così è stata scelta un'altra via per fare il confronto:

tre trasduttori commerciali sono stati scelti per essere confrontati con le batterie al litio e con le batterie alcaline in modo da capire quando questi riescono ad essere competitivi anche nel prezzo.

Le due tipologie di batterie sono state scelte per le loro basse correnti di perdita (1-3% per anno), il che le rende competitive con l'Energy Harvesting che ha un tempo di vita di molti anni (altre batterie come NiCd, nichel-cadmio, e NiMH, nichel-metallo idruro, durano solo per qualche mese). Il prezzo per Joule quando si compra una batteria dipende da quanto tempo la batteria sarà in grado di operare (cioè dipende dalle correnti di perdita). Più a lungo le batterie devono funzionare, meno quantità di Joule hanno a disposizione.

La figura 4.5 mostra il confronto dei prezzi in funzione del numero di cicli del nodo di sensori. L'esempio viene preso quando il nodo funziona solo una volta ogni mezz'ora. Questo significa che ha bisogno di 20 mJ ogni mezz'ora. Il prezzo per Joule cambia con il tempo, dovuto questo alle correnti di perdita. Quindi l'energia disponibile nella batteria decresce, e il prezzo per Joule aumenta leggermente. Per l'Energy Harvesting, più tempo lavora, più cala il rapporto prezzo / Joule. Questo significa che si arriva ad un punto dove questo rapporto è uguale per le batterie e per l'Energy Harvesting. Dopo l'intersezione, la soluzione più economica risulta l'Energy Harvesting, e per operazioni più brevi risulta invece la batteria.

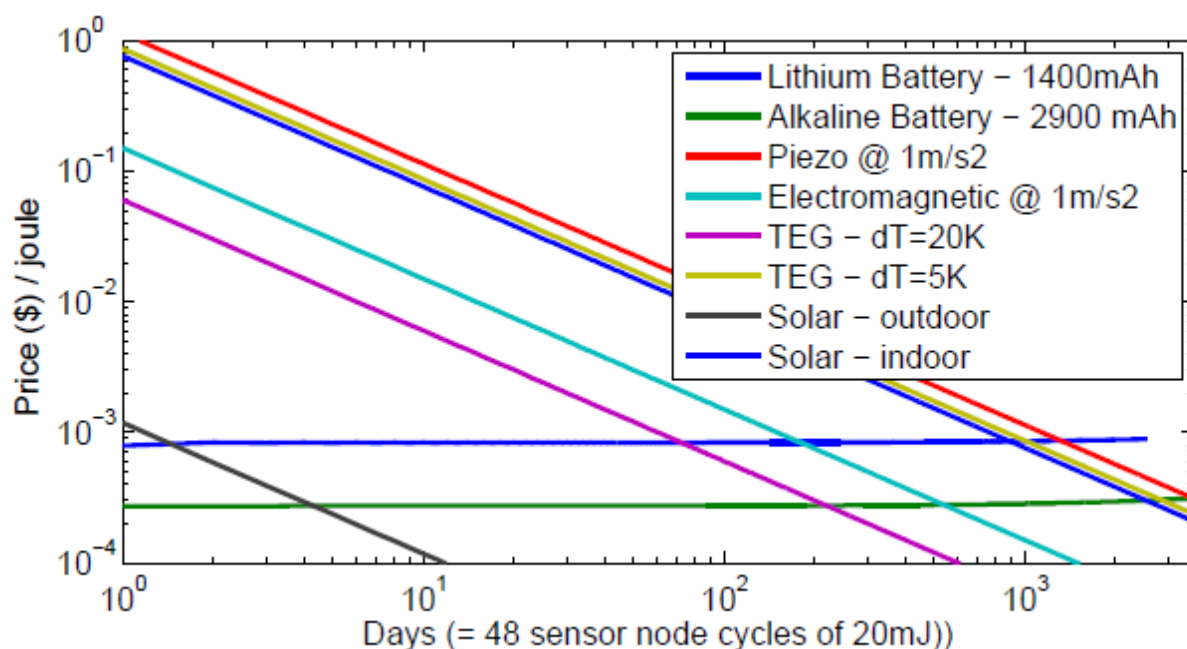


Figura 4.5: Confronto dei prezzi fra l'Energy Harvesting e le batterie al litio e alcaline.

La tabella 5 confronta l'intersezione dell'Energy Harvesting con le batterie alcaline, per mostrare dove il primo diventa competitivo sul prezzo.

Tabella 5:
Confronto dei prezzi e tempo impiegato per essere competitivi.

EH Technology	Price	Competitive after [days]
Solar outdoor	20\$	5
Solar indoor	20\$	2500
Piezo	79\$	3500
Electromagnetic	130\$	540
TEG 5K	15\$	2700
TEG 20K	15\$	220

E' interessante osservare come le celle solari generano energia sufficiente nel giro di qualche giorno per avere un prezzo più basso delle batterie. Invece le restanti tipologie di Energy Harvesting sono tutte molto dispendiose. Ovviamente devono diventare in qualche modo più economiche per essere competitive. L'origine di questi dati è riportata di seguito:

Lithium Battery - Panasonic CR132 – 1400 mAh 3V (end voltage 1.5V), 6\$, max lifetime 10 years
<http://www.farnell.com/datasheets/808605.pdf>

Alkaline Battery - Energizer X91 AA 1.5 V 2900 mAh (end voltage 0.8V), 2 \$, max lifetime 7 years
<http://www.farnell.com/datasheets/96696.pdf>

Piezoelectric generator - Mide V20W, 0.8 mW at 50Hz 0.1G, 79\$
<http://www.mide.com/products/vulture/v20w.php>

Electromagnetic generator - Perpetuum PMG FSH, 10 mW at 50 Hz 0.1G, 130\$^{8*}
<http://www.perpetuum.com/fsh.asp>

Thermal generator - Micropelt MPG-651, 0.2 mW at T = 5K, 2.88 mW at T = 20K, 15\$^{9*}
http://www.micropelt.com/down/datasheet_mpg_d651_d751.pdf

Solar cell - Sanyo AM-8801, 196 mW direct outdoor sunlight, 0.3 mW indoor, 20\$
<http://www.farnell.com/datasheets/87132.pdf>

^{8*} Expected price - Source: Roy Freeland, CEO Perpetuum

^{9*} Expected price - Source: Wladimir Punt, VP Sales and Marketing, Micropelt

Conclusioni

Sono state analizzate varie soluzioni per riuscire a generare energia elettrica dall'energia termica e dall'energia cinetica.

Per i microgeneratori TEGs sono state mostrate le differenze rispetto ai generatori a larga scala. E' stata proposta una figura di merito modificata che sottolinea l'importanza di un'alta resistenza termica interna del generatore. Il coefficiente di Seebeck, la resistività elettrica e la conducibilità termica sono state misurate per entrambi i materiali, poly-Si e poly-SiGe. Per ottimizzare il flusso di calore interno al dispositivo, sono state presentate delle tecniche particolari. Generatori di una grandezza pari a 6 mm^2 di poly-Si e poly-SiGe sono stati creati e testati. La tensione a circuito aperto varia fra 100 e 200 mV/K. Si devono trovare però delle tecniche per ridurre la resistenza elettrica del generatore, visto che questa limita la massima potenza di uscita.

Per l'Energy Scavenger cinetico invece è stato sottoposto un raccoglitore meccanico basato su un sistema non risonante e un convertitore piezoelettrico. Un modello meccanico dettagliato è stato sviluppato e associato ad un modello semplificato del trasduttore piezoelettrico. L'utilizzo di un circuito di avviamento per trasferire la carica immagazzinata nella supercapacità all'interno di una capacità finale più piccola permette di raggiungere un livello di tensione tale da alimentare un nodo di sensori in un tempo molto breve, fino a 7 volte inferiore rispetto al caso di utilizzo solo della supercapacità. L'efficienza viene aumentata usando dei circuiti che determinano quando la supercapacità è completamente carica e quindi spengono il circuito di avviamento. Questo riduce il consumo di potenza mantenendo il guadagno ottenuto in termini di start-up time.

Il modello completo prevede che questo dispositivo, che ha un volume inferiore a 1 cm^3 , sia capace di generare circa $40 \text{ }\mu\text{W}$ di potenza elettrica utile quando posizionato sul polso di una persona che cammina. Questo dispositivo può essere usato nelle applicazioni dove semplici informazioni devono essere trasmesse un basso duty-cycle.

Infine il confronto fra costi con le batterie alcaline e quelle al litio rivela che questi dispositivi non sono ancora pronti per essere commercializzati per il loro costo elevato essendo ancora dei prototipi in via di sviluppo e miglioramento. Fra tutte le fonti di energia alternative quella più competitiva risulta essere l'energia solare, competitiva dopo solo 5 giorni rispetto alle batterie.

Bibliografia

Temperatura:

- [1] M. Kishi, H. Nemeto, M. Yamamoto, S. Sudou, M. Mandai, S. Yamamoto, *Micro-thermoelectric modules and their application to wrist-watches as an energy source*, in: *Proceedings of the IEEE 18th International Conference on Thermoelectrics*, 1999, pp. 301-307.
- [2] R. R. Heikes, R. W. Ure, *Thermoelectricity: Science and Engineering*, Interscience, New York, 1961.
- [3] A. E. Culp, *Principles of Energy Conversion*, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [4] G. Min, R. W. Rowe, *Peltier devices as generators*, in: D. M. Rowe (Ed.), *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [5] M. Strasser, R. Aigner, G. Wachutka, *Analysis of a CMOS low power thermoelectric generator*, in: *Proceedings of Eurosensors XIV*, 2000, pp. 17-20.
- [6] M. I. Newsam, A. J. Walton, M. Fallon, *Numerical analysis of the effect of geometry on the performance of the Greek cross structure*, in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures'96*, Vol. 9, 1996, pp. 247-252.
- [7] F. Volklein, *Characterization of the thermal properties of bulk and thin-film materials by using diagnostic microstructures*, in: *Proceedings of the Micrometrology Symposium, Delft, The Netherlands, 31 August-1 September 2000*, pp. 91-107.
- [8] M. von Arx, O. Paul, H. Baltes, *Process-dependent thin-film thermal conductivities for thermal CMOS MEMS*, *J. Microelectromech. Syst.* 9 (1) (2000) 136-145.
- [9] C. B. Vining, *Silicon/germanium*, in D. M. Rowe (Ed.), *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [10] P. Van Gerwen, K. Baert, R. Mertens, *Thin-film poly-Si_{70%}Ge_{30%} for thermopiles*, in: *Proceedings of the Microsystem Technologies '98, Potsdam, Germany, 1-3 December 1998*, pp. 655-658.
- [11] D. S. Bang, M. Cao, A. Wang, K. C. Saraswat, *Resistivity of boron and phosphorus-doped polycrystalline Si_{1-x}Ge_x films*, *Appl. Phys. Lett.* 6 (2) (1995) 195-197.
- [12] R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts, and B. O'Quinn, "Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figure of merit," *Nature* 413, 597 (2001).
- [13] Parsonnett, V., A. Cheema. 2003. *The Nature and Frequency of Postimplant Surgical Interventions: A Realistic Appraisal*. *Pace*. 26: 2308-2312.
- [14] Wahlstrand, C.D., Phillips, W.C., and Skime, R.M. 2005. *Kind Code. Headset recharger for cranially implantable medical devices*. U.S. Pat. Application 20050004619.
- [15] Lanmuller H., S. Sauermann, E. Unger, G. Schnetz, W. Mayr, M. Bijak, and W. Girsch. 1999. *Multifunctional Implantable Nerve Stimulator for Cardiac Assistance by Skeletal Muscle*. *Artificial Organs*. Vol. 23 Issue 4: 352.
- [16] *Business Wire*, (2005). *Medtronic Announces FDA Approval of EnRhythm Pacemaker; Dual-Chamber Pacemaker Significantly Reduces Unnecessary Pacing in the Right Ventricle [WWW]*. Available from: <http://news.morningstar.com/news/BW/M05/D05/20050505206.html> [accessed 05/23/2005].
- [17] Arndt, M. *Rewiring the Body*. *BusinessWeek*. March 7, 2005: 74-82.
- [18] Venkatasubramanian, R., E. Siivola, T. Colpitts, B. O'Quinn. 2001. *Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit*. *Nature*. 413(6856): 597-602.
- [19] Rowe, D.M. 1995. *CRC Handbook of Thermoelectrics*.
- [20] *Wafer Scale Thin-film Thermoelectric Technology*, RTI Patent Pending, September 2003.

Movimento:

- [1] T. Sterken, P. Fiorini, K. Baert, R. Puers and G. Borghs, "An electret-based electrostatic micro-generator", *Proceedings of Transducers03*, pp. 1291-1294, 2003.
- [2] C.B. Williams, C. Shearwood, M.A. Warradine, P.H. Mellor, T.S. Birch and R.B. Yates, "Development of an electromagnetic micro-generator", *Circuits, Devices and Systems, IEEE Proceedings*, p. 337-342, 148, Issue 6, 2001.
- [3] P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman and A. S. Holmes, "Architectures for Vibration-Driven Micro-Power Generators", *IEEE/ASME J. Microelectromechanical Systems*, 13 (3), pp. 429-440 (2004).
- [4] M. Umeda, K. Nakamura and S. Ueha, "Analysis of Transformation of Mechanical Impact Energy to Electrical Energy Using a Piezoelectric Vibrator", *Japanese Journal of Applied Physics*, 35, Part I, No. 5B, pp 3267-3273 (1996).
- [5] T. Sterken, P. Fiorini, K. Baert, R. Puers, C. van Hoof and G. Borghs, "Comparative modeling for vibration scavengers", *Proceedings of the 3'd IEEE Conference on Sensors, Vienna, 2004*.
- [6] J. Ghosh and B. Paden, "Control of 2-periodic motion for bouncing ball", *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 4048-4050, San Diego, 1999.
- [7] E. Pavlovskaya, M. Wiercigroch and Grebogi, "Modeling of an impact system with a drift", *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys.*, 64 (2001).
- [8] M. Kishi, H. Nemoto, T. Hamao, M. Yamamoto, S. Sudou, M. Mandai, and S. Yamamoto, "Micro-thermoelectric modules and their application to wristwatches as an energy source," in *Proc. 18th Int. Conf. Thermoelectrics (ICT '99)*, Aug.-Sep. 29-2 1999, pp. 301-307.
- [9] V. Leonov, T. Torfs, P. Fiorini, and C. Van Hoof, "Thermoelectric converters of human warmth for self-powered wireless sensor nodes," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 7, no. 5, pp. 650-657, 2007.
- [10] K. Goto, T. Nakagawa, O. Nakamura, and S. Kawata, "An implantable power supply with an optically rechargeable lithium battery," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 7, pp. 830-833, 2001.
- [11] M. Catrysse, B. Hermans, and R. Puers, "An inductive power system with integrated bi-directional data-transmission," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 115, no. 2-3, pp. 221 - 229, 2004, the 17th European Conference on Solid-State Transducers.
- [12] B. Lenaerts and R. Puers, "An inductive power link for a wireless endoscope," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 22, no. 7, pp. 1390 - 1395, 2007.
- [13] S. Suzuki, T. Katane, H. Saotome, and O. Saito, "Electric power generating system using magnetic coupling for deeply implanted medical electronic devices," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 38, no. 5, pp. 3006-3008, 2002.
- [14] S. Kerzenmacher, J. Ducre, R. Zengerle, and F. von Stetten, "Energy harvesting by implantable abiotically catalyzed glucose fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 182, pp. 1-17, 2008.
- [15] R. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, "Micropower energy harvesting," *Solid-State Electronics*, vol. 53, no. 7, pp. 684 - 693, 2009.
- [16] P. Mitcheson, E. Yeatman, G. Rao, A. Holmes, and T. Green, "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 9, pp. 1457-1486, 2008.
- [17] J. M. Donelan, Q. Li, V. Naing, J. A. Hoffer, D. J. Weber, and A. D. Kuo, "Biomechanical energy harvesting: Generating electricity during walking with minimal user effort," *Science*, vol. 319, no. 5864, pp. 807- 810, 2008.
- [18] European Patent Office Patent 0 326 313, 1989.
- [19] M. Hayakawa, "A study of the new energy system for quartz watches (ii) - the effective circuit for the system," in *Congr europen de Chronometrie*, 1988.

[20] H. Goto, T. Sugiura, Y. Harada, and T. Kazui, "Feasibility of using the automatic generating system for quartz watches as a leadless pacemaker power source," *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 37, no. 1, pp. 377-380, Jan. 1999.

[21] J. Dickson, "On-chip high-voltage generation in nmos integrated circuits using an improved voltage multiplier technique," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 11, no. 6, pp. 374--378, June 1976.

[22] J. Wu and K. Chang, "Mos charge pumps for low-voltage operation," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 4, pp. 592-597, April 1998.

[23] J. Silva-Martinez, "A switched capacitor double voltage generator," in *Circuits and Systems, 1994., Proceedings of the 37th Midwest Symposium on*, vol. 1, 1994, pp. 177-180 vol. 1.

[24] P. Favrat, P. Deval, and M. Declercq, "A high-efficiency cmos voltage doubler," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 3, pp. 410- 416, March 1998.

[25] 7mm micro dc motor: <http://www.precisionmicrodrives.com/>.

Confronto fra le due Tecnologie:

[1] Shashank Priya and Daniel J. Inman (editors), *Energy Harvesting Technologies*, Springer, 2009.

[2] http://micropelt.com/applications/te_power_node.php June 28, 2010.

[3] Adrian Valenzuela, Texas Instruments Batteryless energy harvesting for embedded designs <http://www.eetimes.com/design/embedded/4008326/Batteryless-energy-harvesting-for-embedded-designs> August 1, 2009.

[4] Murugavel Raju, Mark Grazier, ULP meets energy harvesting: A game-changing combination for design engineer <http://focus.ti.com/lit/wp/slyy018a/slyy018a.pdf> 2010, Texas Instrument.

[5] News Analysis Rare Earth Elements Fueling Innovation <http://www.globalization101.org/news1/Rare-Earth-Elements> October 15, 2010, Levin Institute, State Uni. of New York.

[6] Shadrach J. Roundy *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion*, Berkeley 2003.

[7] Solar cells efficiency tables version 36 <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.1021/pdf>.

[8] A. Chini and F. Soci Boost-converter-based solar harvester for low power applications *Electronic Letters* Vol. 46 No. 4, 2010.

[9] W. S. WANG, T. O'DONNELL, N. WANG, and M. HAYES *Design Considerations of Sub-mW Indoor Light Energy Harvesting for Wireless Sensor Systems* Tyndall National Institute, 2010.

[10] Chulsung Park and Pai H. Chou *AmbiMax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes*, UC Irvine, 2006.

[11] Alireza Khaligh, Peng Zeng and Cong Zheng *Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies - State of the Art*, Illinois Institute of Technology 2010.

[12] Mickael Lallart and Daniel Guyomar *An optimized self-powered switching circuit for non-linear energy harvesting with low voltage output*, INSA-Lyon, 2008.

[13] Taylor G W, Burns J R, Kammann S M, Powers W B and Welsh T R *The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator*, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2001.

[14] Markus Pollak, Loreto Mateu, Peter Spies *STEP-UP DC-DC-CONVERTER WITH COUPLED INDUCTORS FOR LOW INPUT VOLTAGES*, Fraunhofer IIS, 2009.

[15] J. M. Damaschke *Design of a Low Input Voltage Converter for Thermoelectric Generator*, University of Victoria, 1996.

- [16] Jihong Kim, *Tajana Simunic Rosing Power-Aware Resource Management Tech-niques for Low-Power Embedded Systems* Seoul National University, 2006.
- [17] Jerry W. Fleming *Ultra-Low Power Conversion and Management Techniques for Thermoelectric Energy Harvesting Applications*, Luna Innovations Incorpo-rated, 2010.
- [18] John Blyler *Energy Scavenging And Storage Must Work To-gether* <http://chipdesignmag.com/lpd/blog/2009/07/16/energy-scavenging-and-storage-must-work-together>, Low Power Engineering Community, 2009.
- [19] *Energy Harvesting Journal Using a supercapacitor to manage your power* <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/using-a-supercapacitor-to-manage-your-power-00001921.asp?sessionid=1>, 14 December 2009.
- [20] C.O. Mathuna et al. *Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks*, Tyndall National Institute, 2008.
- [21] Zhi Ang Eu, Hwee-Pink Tan, Winston K.G. Seah *Design and performance analysis of MAC schemes for Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting* National Uni. of Singapore, 2010.
- [22] NA KONG, DONG SAM HA, ALPER ERTURK AND DANIEL J. INMAN *Resistive Impedance Matching Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting*, Virginia Tech, 2010.
- [23] I. Laird, H. Lovatt, N. Savvides, D. Lu, and V. Agelidis, *Comparative study of maximum power point tracking algorithms for thermoelectric generators* Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08.
- [24] Alex S. Weddell, Geo V. Merrett, Bashir M. Al-Hashimi, *Ultra Low-Power Photovoltaic MPPT Technique for Indoor and Outdoor Wireless Sensor Nodes*, Uni. of Southampton, 2011.
- [25] Trishan Eswam, Patrick L. Chapman, *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*, Uni. of Illinois, 2005.
- [26] Linear Technology LTC3105 Datasheet <http://www.linear.com/product/LTC3105>.
- [27] Top Bits Seebeck Effect <http://www.tech-faq.com/seebeck-effect.html>.
- [28] Micropelt Energy Harvesting Thermal Generators - TE-Power Plus http://www.micropelt.com/applications/te_power_plus.php.
- [29] Perpetuum Limited, website at <http://www.perpetuum.co.uk/>, accessed June 2010.
- [30] Ferro Solutions, website at <http://www.ferrosi.com>, accessed June 2010.
- [31] Datasheet for Perpetuum PMG17, Perpetuum Ltd., accessed from <http://www.perpetuum.com/resources/PMG17>, July 2010.
- [32] T. Starner, *Human Powered Wearable Computing*, IBM Systems Journal, Vol 35, No 3-4, pp1–12, 1996.
- [33] Kymissis, J. and Kendall, C. and Paradiso, J. and Gershenfeld, N., *Parasitic power harvesting in shoes*, Second International Symposium on Wearable Computers, pp 132–139, 1998.
- [34] J. Maxwell Donelan, V. Naing and Q. Li, *Biomechanical Energy Harvesting*, Proceedings of PowerMEMS '08, Sendai, Japan, pp 39–44, 2008.
- [35] J. Feenstra, J. Granstroma and H. Sodano, *Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 22, Issue 3, pp 721–734, April 2008.
- [36] M. Hayakawa, *Electric wristwatch with generator*, U.S. Patent 5 001 685, March 1991.
- [37] T. Von B`uren, P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman, A. S. Holmes, and G. Tr`oster, *Optimization of Inertial Micropower Generators for Human Walking Motion*, IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 1, pp. 2838, 2006.

- [38] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. Kondala Rao, A. S. Holmes and T. C. Green, *Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices*, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 96, No. 9, pp 1457–1486, September 2008.
- [39] Verichip Corporation, website at <http://www.positiveidcorp.com/>, accessed June 2010.
- [40] V. Leonov, C. Van Hoof, R. J. M. Vullers, *Thermoelectric and Hybrid Generators in Wearable Devices and Clothes*, *Proceedings of Body Sensors Networks 2009, Berkeley, USA*, pp 195–200, 2009.
- [41] V. Leonov and R. J. M. Vullers, *Thermoelectric Generators on Living Beings*, *Proceedings of the 5th European Conference on Thermo-electrics (ECT 07), Odessa, Ukraine*, pp 47–52, September 2007.
- [42] V. Leonov and P. Fiorini, *Thermal Matching of a Thermoelectric Energy Scavenger with the Ambience* *Proceedings of the 5th European Conference on Thermoelectrics (ECT 07), Odessa, Ukraine*, pp 129–133, September 2007.
- [43] G. Min, *Thermoelectric Energy Harvesting*, *Energy Harvesting for Autonomous Systems*, Ch. 5, Artech House, S. P. Beeby, N. M. White, Eds, in press.
- [44] B. W. Williams, *Power Electronics: Devices, Drivers, Applications, and Passive Components*, Wiley, 1987.