

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E
DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

Energy Harvesters Indossabili

Elaborato in Elettronica

Relatore:
Prof. Claudio Fiegna

Presentata da:
Simone Morgagni

Anno Accademico 2023/2024

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Dispositivi Indossabili	3
1.2	Harvesting Energetico	4
1.3	Applicazioni Harvester Energetici	4
2	Metodi Harvesting Energetico	6
2.1	Sorgenti Corporee	6
2.1.1	Generatori Triboelettrici	6
2.1.2	Generatori Piezoelettrici	6
2.1.3	Generatori Termoelettrici	7
2.1.4	Generatori Elettrostatici	7
2.1.5	Generatori Elettromagnetici	7
2.1.6	Celle a Biocombustibili	7
2.1.7	Generatori Idroelettrici	8
2.2	Sorgenti Ambientali	8
2.2.1	Generatori Fotovoltaici	8
2.2.2	Generatori a Radiofrequenza (RF)	8
2.3	Generatori Ibridi	9
3	Esempio	10
3.1	Generatori	10
3.1.1	Generatore Triboelettrico	10
3.1.2	Generatore a Radiofrequenza	11
3.1.3	Integrazione	11

Abstract

Si è voluto valutare i metodi e le applicazioni di harvesting possibili con particolare attenzione su alcuni esempi...

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Dispositivi Indossabili

Pur essendo presenti in campo medico da tempo, i dispositivi indossabili e impiantabili hanno subito una rapida evoluzione. Tra le possibili applicazioni si hanno diagnosi attraverso la registrazione di segnali e marcatori biologici, ma anche terapia attraverso stimoli elettrici o rilascio di medicinali. In particolare la portabilità abilita al funzionamento lontano dagli ospedali, rispondendo ai requisiti della telemedicina. Questo li rende particolarmente adatti al trattamento di condizioni croniche, sgravando sia strutture sanitarie che pazienti. Permettono inoltre misure costanti, a lungo termine e non invasive.

I dispositivi indossabili, oltre a sensori e attuatori specifici dell'applicazione, richiedono anche componenti a bassa potenza come processori e antenne. Questi componenti sono necessari per svolgere funzioni di controllo automatico, elaborazione e trasmissione dei segnali misurati. Quando un modulo wireless è disponibile, invece di conservare i dati, è possibile inviarli a una hub intermedia o direttamente al destinatario finale in una struttura medica.

La forma ideale è piccola abbastanza da svolgere le funzioni volute senza intralciare il paziente. Nelle installazioni invasive è essenziale che le dimensioni siano ridotte per abbassare i rischi e la complessità dell'operazione. Anche nel caso non invasivo però si preferiscono dispositivi sottili e di piccole dimensioni che possono sostituire o integrarsi a capi di abbigliamento. L'aspetto non intrusivo o piacevole può incentivare l'uso regolare. Evitare dimenticanze è infatti importante in pazienti a rischio che richiedono controllo costante. Avere numerosi punti di possibile applicazione permette di usare più dispositivi in combinazione.

Si vuole quindi approfondire uno degli aspetti più critici dei dispositivi medici indossabili e impiantabili, ovvero la loro alimentazione. Ogni tipologia avrà necessità energetiche diverse da pochi microwatt a milliwatt, ma al momento hanno tutti in comune l'uso di batterie come fonte. Gli svantaggi di un sistema a batteria sono evidenti nell'autonomia limitata e il bisogno di ricarica o sostituzione, specialmente quando si parla di dispositivi impiantabili. Inoltre i materiali usati nelle batterie sono pesanti e potenzialmente tossici, il che riduce la compatibilità all'uso prolungato.

1.2 Harvesting Energetico

Le tenciche di harvesting energetico consistono nel recupero di energia da fonti esterne al dispositivo. I vantaggi di queste tecnologie sono molteplici, come estensione dell'autonomia in modo indefinito, riduzione di dimensioni e peso, flessibilità e biocompatibilità. Rappresentano una potenziale alternativa all'uso di batterie su dispositivi a bassa potenza.

Le sorgenti principali a cui un harvester può attingere sono classificabili secondo lo schema #. I generatori utilizzabili sono termoelettrici, fotovoltaici, a radio frequenza, elettromagnetici, elettrostatici, piezoelettrici, triboelettrici e a biocombustibile. La potenza in ingresso ad un harvester di dimensioni ridotte è necessariamente piccola, quindi quella prodotta sarà limitata anche se si lavora ad alto rendimento. Combinazioni di più sistemi, detti harvester ibridi, possono migliorare le prestazioni al costo di maggiore complessità. La localizzazione del dispositivo sul corpo determina quale fonte energetica è più accessibile e quindi in gran parte anche la tecnologia di harvesting migliore.

La maggior parte delle fonti non è sempre disponibile e nemmeno prevedibile. È possibile però usare harvester accoppiati a componenti di accumulo come batterie o supercondensatori quando è richiesta un'alimentazione regolare. Un'alternativa per monitorare segnali a rischio più basso è accendere il dispositivo solo quando l'energia è disponibile. Similmente per aumentare l'efficienza si possono alimentare i singoli moduli quando diventano necessari. La gestione intelligente dell'energia richiede una power management unit.

1.3 Applicazioni Harvester Energetici

Esistono versioni indossabili per la misura non invasiva di molti parametri di interesse rilevante come ECG, EEG, pressione sanguigna, saturazione di ossigeno nel sangue e frequenza respiratoria. Altri dispositivi sono in grado di raccogliere in maniera più o meno invasiva fluidi corporei come sangue, sudore o liquido interstiziale per intercettare problemi metabolici. Oltre a raccogliere dati, questi apparati medici possono anche partecipare attivamente alla cura, come nel caso di dosatori di medicinali, elettrostimolatori neuronali o muscolari, pacemaker e defibrillatori impiantabili.

Monitorare facilmente e con costanza questi parametri consente di individuare lo sviluppo di alcune malattie in anticipo rispetto ai metodi tradizionali, aumentando le probabilità di successo nel trattamento. Nonostante questo, nessun dispositivo medico indossabile commercializzato fa uso di energy harvesting. La ricerca recente ha però sorpassato lo studio esclusivamente teorico e sono stati svolti anche test in vivo su animale per harvester impiantabili. Alcuni esempi recenti sono:

- Un dispositivo in grado di misurare glicemia dal sudore, temperatura e HRV è stato sviluppato in [?]. Un harvester RF ne permette il funzionamento continuativo, supportando la batteria.

- Per trattare la miopia con esposizione graduale ai farmaci, in [?] e' stata sviluppato un dosatore a forma di lente a contatto. La funzione di rilascio e' automatizzata da un nanogeneratore piezoelettrico attivato dal battito delle palpebre.
- Un modulo autosufficiente che monitora respiri e temperatura e' stato integrato in mascherine sanitarie in [?]. In [?], un harvester triboelettrico e' usato per creare un campo elettrico forte abbastanza da disinfettare le maschere.
- In [?] viene dimostrato l'uso di un harvester piezoelettrico impiantato su tessuto cardiaco porcino.

Soluzioni con harvester hanno ancora troppi svantaggi rispetto a sola batteria. Tra questi, la bassa densita' energetica e l'affidabilita' incerta li rendono un'opzione immatura per scopi medici critici. Questi sono gravosi soprattutto per dispositivi impiantabili che richiedono dimensioni minime e la certezza del funzionamento a lungo termine. I costi di produzione sono alti, dovuti anche alla mancanza di una catena manifatturiera paragonabile a prodotti altamente diffusi come le batterie.

#

E' giusto menzionare che e' possibile applicare l'idea di energy harvester anche a dispositivi non mobili. Un'applicazione di interesse e' usarli per recuperare l'energia di scarto da sistemi piu' grandi come macchinari industriali o mezzi di trasporto. In zone dove e' necessario fare monitoraggi, ma manca distribuzione elettrica anche possono essere una soluzione. Questo permetterebbe di azionare una rete distribuita di sensori o attuatori autonomi. Harvester impiegati in questo modo hanno meno restrizioni su dimensioni e affidabilita'. Alcuni esempi recenti sono:

- Monitoraggio della sicurezza e stato dei mezzi di trasporto come treni o auto trasformando l'energia delle vibrazioni [?, ?]
- Una rete di generatori galleggianti che raccolgono l'energia meccanica delle onde per deionizzare l'acqua marina in loco [?].
- Sensori per verificare lo stato di macchinari industriali, sfruttandone le vibrazioni [?, ?], o il calore [?].

Capitolo 2

Metodi Harvesting Energetico

2.1 Sorgenti Corporee

Movimento, vibrazioni, gradienti di temperatura e reazioni enzimatiche possono essere convertiti in energia elettrica da harvester. L'attività fisica e i processi fisiologici offrono fonti energetiche con intensità irregolare ma sempre accessibile. Per alcuni movimenti è anche possibile raccogliere il lavoro necessario alla frenata, riducendo addirittura il costo metabolico dell'azione [1]. In particolare un livello basale di energia meccanica dovuto al movimento è sempre disponibile, così come l'energia chimica immagazzinata nei liquidi corporei.

2.1.1 Generatori Triboelettrici

Un generatore triboelettrico (TENG) sfrutta materiali che si caricano elettricamente strisciando l'uno sull'altro. In base alla capacità di generare una densità di carica al contatto, sono organizzati nella serie triboelettrica [2]. È una proprietà presente anche in molti materiali organici e leggeri. Quando stimolati producono alte tensioni e basse correnti per piccoli istanti di tempo. Usare più strati di materiali aumenta la potenza prodotta. Le migliori zone di applicazione sono negli arti inferiori dove si sviluppano le forze maggiori, come nella pianta del piede.

2.1.2 Generatori Piezoelettrici

I sistemi di harvesting piezoelettrici producono energia elettrica attraverso la deformazione elastica di materiali piezoelettrici. Possono essere di forma e dimensione arbitraria, inoltre usano materiali leggeri, poco costosi, non tossici e anche facili da assemblare. Producono corrente anche per stimoli molto piccoli, ma la potenza è bassa così come l'efficienza. Lo studio di materiali flessibili è una possibile soluzione dato che permetterebbero l'installazione in zone del corpo che subiscono forze maggiori. In mancanza di stimoli prevalenti si ha una conversione dell'energia meccanica data dalle vibrazioni. Le performance di elementi ottenuti da strati di materiale sono inferiori ai tessuti di fibre. Il polivinilidene fluoro PVDF abbinato a vari additivi è il polimero più usato negli studi. La quantità di energia generata dipende dal posizionamento dell'harvester e dallo stato di attività fisica. Gli arti

inferiori sono sottoposti a forze maggiori, soprattutto durante il cammino. Posizionare il generatore in una suola o accoppiarlo al movimento del ginocchio offre i risultati migliori in termini di potenza. La tecnologia piezoelettrica e' pero' anche valida come sensoristica attiva di pressione. Sensori di questo tipo possono essere usati per monitorare la respirazione, le pulsazioni o lo spostamento dei singoli arti.

2.1.3 Generatori Termoelettrici

L'effetto di Seebeck, o termoelettrico, trasforma un gradiente di temperatura alle estremita' dell'elemento in una differenza di potenziale. Un harvester che sfrutta l'effetto di Seebeck ha una forma sottile e usa il corpo e l'ambiente circostante come fonti calde e fredde #. E' possibile rendere questo tipo di harvester flessibili, si migliora cosi' sia l'adesione alla pelle, che la portabilita'. Allargare l'area disponibile aumenta il trasferimento di calore senza che questo diventi percettibile all'utente. La mancanza di parti mobili determina un'elevata affidabilita'. I materiali dove l'effetto termoelettrico e' piu' marcato sono pero' relativamente pesanti, come Bismuto e Tellurio. E' possibile, attraverso rectenne o celle termo-fotovoltaiche, recuperare anche il calore irradiato dal corpo.

2.1.4 Generatori Elettrostatici

Un generatore elettrostatico genera corrente in seguito alla variazione nella capacita' di un condensatore. La variazione e' causata dal movimento relativo delle armature. Si preferiscono condensatori con forma planare che cambiano la propria capacita' in risposta a una deformazione, ad esempio strutture a nido d'ape o a pettine.

2.1.5 Generatori Elettromagnetici

I generatori elettromagnetici sfruttano la legge di Farady per produrre corrente dal movimento relativo di spire e magneti. La mancanza di accoppiamento meccanico tra le componenti riduce l'usura dovuta all'attrito rispetto alle altre soluzioni di harvesting per energia meccanica. La maggior parte delle implementazioni preferiscono l'assetto lineare al rotazionale. Il magnete permanente e' accoppiato a una molla per aumentare l'efficienza e in movimento all'interno degli avvolgimenti conduttivi.

2.1.6 Celle a Biocombustibili

Le celle a biocombustibile producono corrente attraverso l'ossidazione di una macromolecola disponibile nel corpo come glucosio o acido lattico. Una membrana permeabile solo a cariche positive separa anodo e catodo della cella per forzare la corrente elettronica sul circuito voluto. La reazione necessita di catalizzatori per massimizzare l'efficienza. Enzimi, microbi e strutture inorganiche possono essere usati come catalizzatori. Gli enzimi, ma soprattutto i batteri richiedono il perfetto isolamento della cella per evitare perdite di efficienza o infezioni. Catalizzatori solidi sono piu' sicuri ma meno efficaci. Finche' i reagenti sono disponibili la cella

puo' produrre energia in modo continuato. Questo tipo di harvester si presta sia a dispositivi indossabili, raccogliendo acido lattico dal sudore, ma anche a dispositivi impiantabili che possono accedere al glucosio interstiziale che e' ancora piu' energetico.

2.1.7 Generatori Idroelettrici

I generatori idroelettrici per harvesting energetico sfruttano l'effetto idrovoltaiico tra molecole di vapore acqueo e un nanomateriale. Il passaggio delle molecole d'acqua attraverso la struttura porosa contro gradiente di concentrazione crea una differenza di potenziale sulle pareti che si traduce in piccole correnti. La densita' di potenza prodotta e' bassa e dipende dalla differenza di umidita' alle estremita'. Possibili applicazioni sono a contatto con la superficie corporea raccogliendo la traspirazione o in sensori montanti su maschere.

2.2 Sorgenti Ambientali

Le fonti ambientali...

2.2.1 Generatori Fotovoltaici

Dispositivi che usano harvesting fotovoltaico sono in commercio da tempo, come le calcolatrici ad esempio. Per dispositivi esposti alla luce si scelgono le usuali celle al silicio amorfo o cristallino. Seppure usare la forma amorfa abbassi l'efficienza di conversione, la struttura diventa flessibile e la maggiore idossabilita' permette di aumentare l'area del pannello. Se invece il dispositivo e' un impianto sottocutaneo si scelgono materiali piu' sensibili alle basse frequenze. Per la massima biocompatibilita' si possono usare celle prodotte con materiali organici ma meno prestanti. In condizioni ottimali, con dispositivo esposto alla luce solare, la potenza generata e' sufficientemente alta, e i costi di produzione sono bassi. E' pero' difficile garantire il funzionamento se si considerano le cadute in irradianza dovute a ambienti chiusi e vestiti.

2.2.2 Generatori a Radiofrequenza (RF)

Energia sotto forma di onde radio e' altamente disponibile nell'ambiente grazie allo sviluppo delle comunicazioni wireless. Per catturare questa energia sono necessarie delle antenne rettificatrici. I problemi principali nel recuperare energia da onde radio sono le dimensioni e la complessita' delle componenti circuitali accessorie all'antenna. La produzione di corrente e' pero' pressoché continua e affidabile. Si possono anche usare tenciche di trasferimento di potenza wireless quando necessario, ma sono limitate da problemi di vicinanza e allineamento del dispositivo rispetto alla fonte.

2.3 Generatori Ibridi

Usare generatori ibridi... Le caratteristiche in uscita possono essere incompatibili.[\[3\]](#)
Per massimizzare l'efficienza di conversione in potenza, si usano metodi di maximum power point tracking (MPPT). Un compromesso e' tra spazio occupato e efficacia e' proposto in [\[4\]](#) come tracciamento dei punti attraverso multiplexing.

Capitolo 3

Esempio

Si sceglie come esempio [5] che offre una realizzazione pratica di un harvester ibrido. L'obiettivo di questo generatore e' proporre un dispositivo riproducibile in scala e facilmente integrabile nel vestiario. Per fare questo usa una struttura interamente fondata su una base di tessuto e accoppia un generatore triboelettrico a uno RF. Un tessuto elettricamente conduttivo disponibile sul mercato e' usato per realizzare le connessioni su ambo i lati di uno strato di tessuto comune di cotone. In questo modo l'harvester diventa altamente flessibile e facilmente ingrabile in capi di abbigliamento. Avere 2 fonti distinte aumenta le probabilita' che il dispositivo sia sempre in funzione, inoltre queste in particolare si prestano a un design planare.

3.1 Generatori

3.1.1 Generatore Triboelettrico

In generale i generatori di questo tipo sfruttano la capacita' di alcuni materiali di trasferire carica al contatto. La struttura e' formata da uno strato di propilene fluorato (FEP) libero di scorrere sopra ai 2 elettrodi di tessuto connettivo che doppiano da secondo materiale triboelettrico. Questa forma detta a scorrimento libero, oltre ad avere un fattore di forma piu' vantaggioso, e' genera anche piu' energia rispetto al semplice contatto [6]. Il design aperto e i limiti di peso non permettono di ottimizzare altri aspetti che influenzano l'efficienza, come l'umidita' o la pressione tra gli elementi. # figura e spiegazione? La tensione massima ottenibile tra gli elettrodi e' determinata dalla densita' di carica ottenibile dal contatto dei materiali. . Lo stimolo meccanico genera nello strato libero un movimento oscillatorio e quindi una corrente alternata sul circuito che necessita rettifica. La densita' di potenza massima e' $0.024 \mu W cm^{-2}$ stata misurata collegando un potenziometro e azionando il movimento a $2 Hz$ per simulare il cammino. Per quanto questo dimostri che il dispositivo e' in grado di raccogliere energia dal movimento umano, la densita' di potenza e' molto bassa se paragonata a una batteria tradizionale, ma anche ai requisiti correnti dei dispositivi raccolti in [?].

3.1.2 Generatore a Radiofrequenza

Per raccogliere energia dalle radiazioni presenti nell'ambiente e' stato scelto un harvester con antenna dimensionata per la sola banda attorno ai $2.45GHz$ usata per connessioni a corto raggio come Wi-Fi e Bluetooth. La distribuzione di onde radio dovute alle comunicazioni elettroniche e' naturalmente concentrata nelle zone urbane. In aree extraurbane la densita' di potenza dovuta a comunicazioni ad ampio raggio scende vistosamente [7], la scelta di una banda comunemente usata da dispositivi generalmente vicini all'uomo ha quindi il vantaggio di essere piu' consistente nel tempo. La configurazione per l'antenna e' a patch circolare e le dimensioni ottimali per la risonanza sono stati ottenuti attraverso simulazione. Il valore di specific absorbtion rate (SAR) e' un parametro usato per determinare la potenza assorbita da un'unita' di massa di tessuto corporeo [?]. Secondo le simulazioni il SAR e' $0.073 \frac{W}{Kg}$, ben inferiore ai $2.0 \frac{W}{Kg}$ stabiliti dalle norme europee per antenne mobili. In questo caso il SAR e' usato come parametro di efficienza rispetto alla quantita' di radiazione persa dall'antenna nel corpo.

Un analizzatore (Keysight N5227B) e' usato per misurare la return loss in condizioni libera e a contatto col corpo. Per le dimensioni scelte si nota effettivamente un picco di $-10dB$ nel centro banda desiderato e anche quando l'antenna e' indossata lo stesso picco trasla di solo 20MHz. La return loss e' generalmente definita come

$$RL = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{ref}} \right) \text{ dB}$$
$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \text{ dB} , \text{ dove } \Gamma = \frac{Z_{out} - Z_{in}}{Z_{in} + Z_{out}} \quad \text{e' il coefficiente di riflessione} \quad (3.1)$$

Questo articolo la usa come una valutazione dell'abbinamento delle impedenze in ingresso e uscita all'antenna, ma il valore ottenuto di $-10dB$ e' negativo e indicherebbe una potenza riflessa maggiore delle catturata. Si assume quindi che il valore realmente graficato sia quello del coefficiente di riflessione, che e' spesso sostituito alla return loss [?]. Cio' non detrae pero' dalla conclusione che l'antenna sviluppata e' adatta a ricevere segnali intorno ai $2.45GHz$. Usando un a camera antieco microonde e' stato graficato lo schema di radiazione in varie posizioni. Lo schema bidimensionale segue le curve dove il guadagno del dispositivo e' massimo. A causa della della configurazione della camera di prova e' stato necessario montare l'antenna su un modello di braccio per caratterizzarne la funzione in flessione. Le misure sono in accordo con le simulazioni e non si presentano particolari differenze nei lobi dovute al cambio di inclinazione o flessione.

3.1.3 Integrazione

Bibliografia

- [1] Mingyi Liu, Feng Qian, Jia Mi, and Lei Zuo. Biomechanical energy harvesting for wearable and mobile devices: State-of-the-art and future directions. *Applied Energy*, 321:119379, September 2022. [6](#)
- [2] Haiyang Zou, Ying Zhang, Litong Guo, Peihong Wang, Xu He, Guozhang Dai, Haiwu Zheng, Chaoyu Chen, Aurelia Chi Wang, Cheng Xu, and Zhong Lin Wang. Quantifying the triboelectric series. *Nature Communications*, 10(1):1427, March 2019. [6](#)
- [3] Hamna Shaukat, Ahsan Ali, Shaukat Ali, Wael A. Altabey, Mohammad Noori, and Sallam A. Kouritem. Applications of Sustainable Hybrid Energy Harvesting: A Review. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 13(4):62, December 2023. [9](#)
- [4] Lianxi Liu, Ying Yu, Xufeng Liao, Jie Yin, Jian Ma, and Xiudeng Wang. MPPT Multiplexed Hybrid Energy Harvesting Interface With Adaptive Switching Cycle and Single-Cycle Sampling for Wearable Electronics. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 70(8):3187–3197, August 2023. [9](#)
- [5] Zhenghao Kou, Chao Zhang, Buyun Yu, Hao Chen, Zhenguo Liu, and Weibing Lu. Wearable All-Fabric Hybrid Energy Harvester to Simultaneously Harvest Radiofrequency and Triboelectric Energy. *Advanced Science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany)*, 11(17):e2309050, May 2024. [10](#)
- [6] Shaoke Fu and Chenguo Hu. Achieving Ultra-Durability and High Output Performance of Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Functional Materials*, 34(9):2308138, 2024. [10](#)
- [7] Husam Hamid Ibrahim, Mandeep Jit Singh, Samir Salem Al-Bawri, Sura Khalil Ibrahim, Mohammad Tariqul Islam, Ahmed Alzamil, and Md Shabiul Islam. Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications. *Sensors*, 22(11):4144, January 2022. [11](#)