



ATTICUS

Ambient-intelligent Tele-monitoring System

Codice progetto: ARS01_00860

Deliverable D4.5

Tecniche di harvesting



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DEL MOLISE**



Consorzio Italia



Data: Agosto 2019

Leader OR	UNISANNIO
Obiettivo realizzativo (OR)	OR4 – Realizzazione del dispositivo S-WARE: acquisizione ed elaborazione segnali
Attività	4.5 – Studio delle tecnologie di harvesting per dispositivi personalis
Descrizione dell'attività (come da capitolato)	Saranno analizzate le tecnologie di harvesting adatte all'utilizzo per dispositivi elettronici personali, tra cui quelle basate su vibrazioni, calore umano e celle solari.
Partner coinvolti nell'attività	
Stato del documento	Final draft
Confidenzialità	Ristretta

Indice del documento

1	Introduzione	6
2	Tecnologie di harvesting per sistemi wearable	7
2.1	Thermal energy harvesting	12
2.2	Kinetic energy harvesting	16
2.3	Piezoelectric energy harvesting	18
2.4	Solar energy harvesting	19
2.5	RF energy harvesting	21
3	Conclusioni	23
4	Bibliografia	24



Indice delle tabelle

Tabella 1: Potenza Raccolta in soluzioni indossabili.....	10
Tabella 2: Consumi tipici di un dispositivo indossabile	11
Tabella 3: Harvesting di energia termica dal corpo umano.....	14
Tabella 4: Potenza erogata e raccolta dal TEG per diversi gradienti della temperatura relativi al corpo umano	15
Tabella 5: Risultati sperimentali TEG.....	16
Tabella 6: Harvesting di energia cinetica tramite piezoelettrici dal corpo umano.....	19
Tabella 7: Risultati sperimentali	21

Indice delle figure

Figura 1: Schema a blocchi di un tipico sistema di Energy Harvesting	9
Figura 2: Esempio di carico adattato in un sistema di EH.....	11
Figura 3: Schema a blocchi del Sistema di EH presentato in [3].....	11
Figura 4: Schema di costruzione di un TEG	13
Figura 5: Modello di un TEG	13
Figura 6: Sottosistema di EH composto da 7 TEG e da LTC3108	14
Figura 7: Forma d'onda del Kinetron MSG 26.4	17
Figura 8: Schema a blocchi del sistema	18

1 Introduzione

Questo documento riporta lo stato dell'arte delle tecnologie di harvesting per sistemi IoT wearable.



2 Tecnologie di harvesting per sistemi wearable

L'energy harvesting è il processo tramite il quale si ricava energia da fonti esterne o ambientali come ad esempio: energia solare, energia termica, energia eolica, energia cinetica. Tale energia viene catturata e immagazzinata per alimentare piccoli dispositivi autonomi wireless o indossabili. Tale processo fornisce una quantità di energia molto bassa, che però può essere utilizzata per alimentare dispositivi elettronici a bassa potenza. Esistono in commercio parecchi sensori sviluppati con tecnologia MEMS che tramite l'energy harvesting, riescono ad utilizzare l'energia presente nell'ambiente per autoalimentarsi, così da poter essere operativi virtualmente per un indefinito periodo di tempo.

In genere l'energia catturata viene immagazzinata in capacità, super capacità o batterie. Le prime vengono utilizzate quando i dispositivi alimentati necessitano di picchi energetici alti, mentre le ultime qualora si necessiti di alimentazione prolungata e stabile nel tempo.

Il processo di energy harvesting al giorno d'oggi, viene maggiormente utilizzato all'interno di reti di sensori indipendenti. In tali applicazioni a bassa potenza, l'energia viene immagazzinata utilizzando un primo stage con condensatore ed un secondo con batteria, per l'alimentazione del microprocessore.

Le sorgenti principali di energia dove le tecniche di energy harvesting vengono utilizzate sono:

- **Energia cinetica:** l'energia dovuta al movimento di un corpo. Molti orologi da polso utilizzano l'energia cinetica dovuta al movimento del braccio, per auto-alimentarsi. In generale la maggior parte dei dispositivi che presenta tecniche di energy harvesting cinetico sfruttano l'effetto piezoelettrico, tramite il movimento di un quarzo. Negli ultimi anni sono stati sviluppati dispositivi per l'harvesting dell'energia cinetica basati sulla legge di Faraday, sfruttando il movimento di un magnete all'interno di un campo elettrico per generare una corrente.
- **Energia fotovoltaica:** i dispositivi che sfruttano l'harvesting dell'energia fotovoltaica presentano delle celle fotovoltaiche e sfruttano l'effetto fotovoltaico per generare energia.

- **Energia termoelettrica:** tali dispositivi utilizzano l'effetto termoelettrico per la generazione di energia. In genere presentano due o più giunzioni di materiali che a causa di una variazione di temperatura generano tensione elettrica. In genere vengono utilizzati per catturare energia da macchinari industriali, strutture o addirittura il corpo umano.
- **Energia RF:** Alcune antenne sono sviluppate per collezionare energia dalle onde radio vaganti e chiamate Rectenna (Receiving Antenna). Tali dispositivi trasformano l'energia elettromagnetica in corrente continua. Una semplice rectenna presenta un dipolo al quale viene collegato in serie un diodo Schottky che funge da raddrizzatore del segnale AC ricevuto dal dipolo, trasformandolo in continuo, ed un carico da alimentare.

Al giorno d'oggi le tecnologie di energy harvesting propongono soluzioni promettenti per alimentare dispositivi indossabili a bassa potenza. In particolare, negli ultimi anni, c'è stato un aumento esponenziale di tecnologie basate su sensori intelligenti. Tali dispositivi sono realizzabili grazie all'avanzamento dell'elettronica a bassa potenza, con l'utilizzo di circuiti integrati miniaturizzati. Vista questa grande espansione del paradigma IoT, i dispositivi intelligenti integrano un numero sempre crescente di funzionalità, incrementandone la necessità di energia.

L'avanzamento della tecnologia ha permesso la miniaturizzazione dei dispositivi di EH, riuscendo ad utilizzare quella che viene detta ambient energy (movimento, temperatura, luce solare, radiazione elettromagnetica) per l'alimentazione dei dispositivi indossabili. Questi ultimi necessitano di poter acquisire informazioni per un lungo periodo di tempo e non possono ricevere alimentazione esterna tramite cavi. Si necessita quindi di dispositivi che riescano ad autoalimentarsi, raccogliendo energia dall'ambiente esterno. Inevitabilmente però, la conversione di energia presenta delle perdite, che sono più alte nel caso di energia cinetica. La durata delle batterie di tali dispositivi è quindi diventata oggetto di studio e l'energy harvesting rappresenta un candidato valido per la soluzione di questo problema.

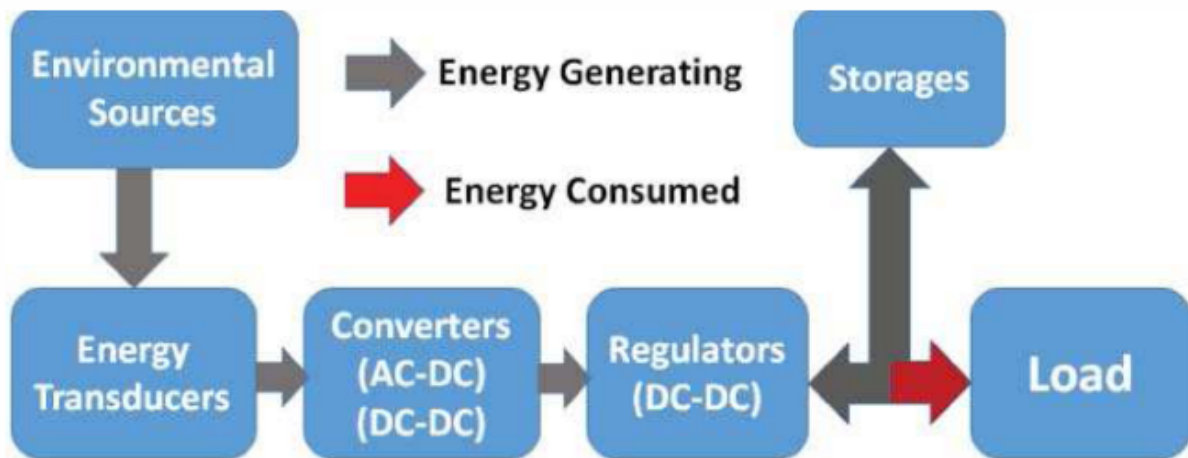


Figura 1: Schema a blocchi di un tipico sistema di Energy Harvesting

In [1] viene presentato lo schema generale di un sistema che sfrutta l'EH. Come si può vedere dalla Figura 1, il sistema può essere suddiviso in:

- **Sorgenti Ambientali:** Rappresenta l'energia disponibile in scenari realistici, come ad esempio la luce, la vibrazione, il calore termico e la radiazione elettromagnetica.
- **Trasduttori di Energia:** Sono i generatori di energia che trasformano l'energia d'ambiente in energia elettrica
- **Regolatori:** Dispositivi atti alla conversione di energia in forma più stabile e adatta all'immagazzinamento all'interno di batterie, in modo tale da fornire una tensione di alimentazione costante che può variare nel range 1.8 - 3.3 V.
- **Immagazzinamento:** Comprende i dispositivi, come le batterie, per l'immagazzinamento dell'energia convertita e stabilizzata. La grandezza e la tecnologia utilizzata in questo stadio dipendono dalle applicazioni del dispositivo sul quale viene utilizzato.

A seconda dello scenario applicativo sul quale applicare tecniche di EH, varie coppie di sorgenti-trasduttori possono essere utilizzate.

Sorgente	Potenza raccolta
Luminosa	$4 \mu W / cm^2$
Termica	$25 \mu W / cm^2$
Radiazione EM	$0.1 \mu W / cm^2$
Cinetica	$40 \mu W / cm^2$

Tabella 1: Potenza Raccolta in soluzioni indossabili

Come si può vedere dalla Tabella 1, la potenza raccogliabile con soluzione indossabili sul corpo umano presenta notevoli differenze in base alla sorgente presa in considerazione. La potenza raccolta dalla radiazione elettromagnetica risulta essere parecchio inferiore rispetto a quella delle altre sorgenti, e la conversione di tale energia in una tensione immagazzinabile in una batteria presenta una efficienza molto bassa, tra o 0 % ed il 10%. Ciò limita la potenza ottenibile a qualche nW nei casi migliori e non la rende adatta ad applicazioni indossabili.

I convertitori ed i regolatori giocano un ruolo critico nei sistemi di EH, generando l'energia necessaria all'alimentazione di questi ultimi. I trasduttori possono produrre sia tensione che corrente, che possono essere troppo alte o basse per essere direttamente utilizzate per lo stadio di alimentazione. Infatti, nel caso di sorgente cinetica ed EM, i trasduttori generano corrente alternata, che deve essere convertita in continua.

Ci sono varie tipologie ed architetture di convertitori che possono essere utilizzate a seconda della sorgente considerata, ma il parametro più importante da valutare e considerare è l'efficienza del convertitore (η), che può essere espressa dalla seguente formula matematica:

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{batt}} \cdot 100$$

Dove P_{in} è la potenza generata dal trasduttore e P_{batt} è la potenza che raggiunge e viene immagazzinata all'interno della batteria, a seguito delle perdite dovute proprio a tale conversione. Ovviamente maggiore efficienza indica una maggiore quantità di potenza trasdotta e immagazzinata ed un valore di η pari al 100% implica che tutta la potenza raccolta venga trasdotta e trasferita alla batteria, senza perdite (trasduttore ideale). Una condizione necessaria per la trasmissione efficiente di energia dai convertitori alle batterie è quella di adattamento in potenza. I trasduttori presentano

una resistenza parassita ohmica, di conseguenza per massimizzare l'output di potenza è necessario un carico adattato (Figura 2).

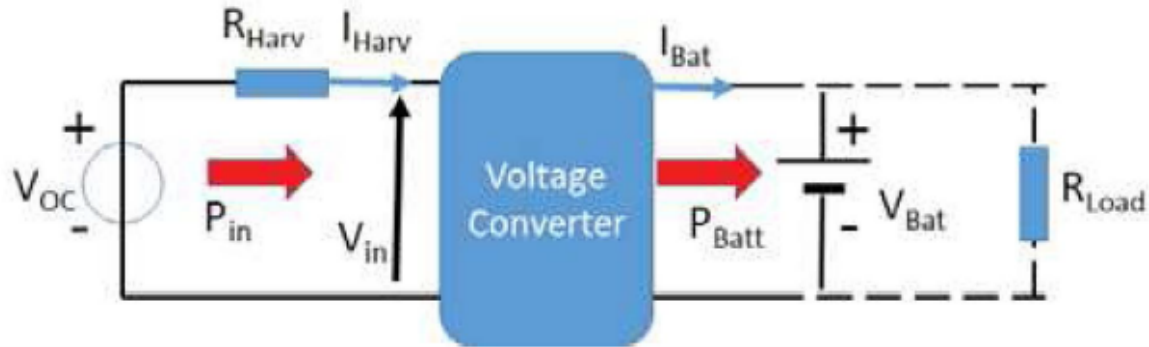


Figura 2: Esempio di carico adattato in un sistema di EH

La potenza generata dai generatori ambientali è molto piccola, nell'ordine dei μW o mW ed è tipicamente utilizzata per autoalimentare i sensori e l'apparato trasmittente di un dispositivo indossabile.

Componente	Ultra-Low Power	Funzionamento tipico
Microcontrollore	60 $\mu A/MHz$ (Cortex M3)	225 $\mu A/MHz$ (Cortex M4)
Sensori	100 μA	1 – 10 μA
Transciever	6 mA	15 mA
Comunicazione Ultra Low Power a corto raggio	0 – 100 μA	1 mA

Tabella 2: Consumi tipici di un dispositivo indossabile

Anche in [3] gli autori presentano un sistema completo per l'EH, raffigurato in Figura 3.

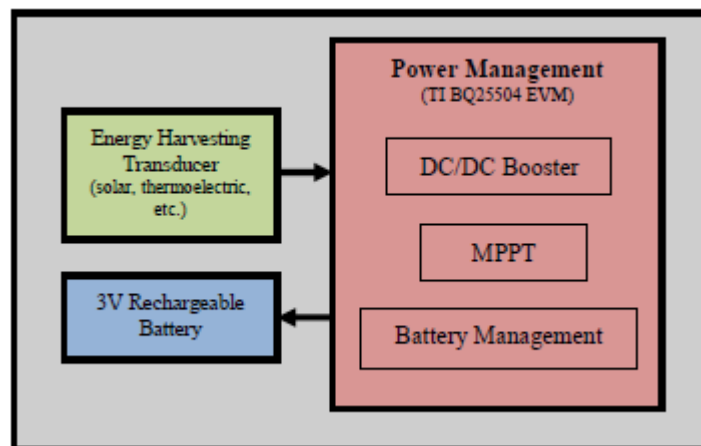


Figura 3: Schema a blocchi del Sistema di EH presentato in [3]

Il sistema completo presenta: i) un trasduttore per la raccolta dell'energia, ii) amplificatore DC-DC, iii) modulo Maximum Power Point Tracking (MPPT), iv) modulo di controllo della batteria, v) batteria ricaricabile.

- **Trasduttore:** I trasduttori utilizzati nel sistema sono di due tipi: fotovoltaici e termici.
- **Amplificatore DC-DC:** Necessario per amplificare le tensioni provenienti dai trasduttori, non sufficienti per la ricarica della batteria.
- **Modulo MPPT:** Il modulo assicura che la potenza consegnata al carico sia massima, adattando in potenza l'uscita del sistema.
- **Modulo di Controllo della Batteria:** Controlla lo stato della batteria e presenta un circuito di protezione per evitare possibili danni alla batteria.

2.1 Thermal energy harvesting

Nel 1821 Thomas Johann Seebeck scoprì che quando un gradiente termico viene applicato tra due conduttori dissimili, essi generano una tensione. L'effetto termoelettrico si basa sul fatto che tale gradiente genera tra i due materiali una conduzione di calore e di conseguenza in una diffusione di cariche. Lo spostamento di queste cariche dalla regione calda alla regione fredda genera una differenza di potenziale. Qualche anno dopo, nel 1834, Jean Charles Athanase Peltier scoprì che trasmettendo corrente attraverso una giunzione si può, in base alla direzione della corrente, riscaldarla o raffreddarla. Il calore assorbito è proporzionale alla corrente e la costante di proporzionalità è detta Coefficiente di Peltier.

Per dispositivi indossabili, i generatori di energia termica rappresentano una soluzione di EH concreta e realizzabile. Esistono sul mercato numerosi dispositivi che sfruttano la differenza di temperatura tra il corpo umano e l'ambiente. La potenza che tali sistemi riescono a generare è nell'ordine delle decine di μW .

Per quanto riguarda i dispositivi indossabili, il corpo umano produce continuamente calore che può essere utilizzato da un *Thermal Electric Generator* (TEG) per generare energia (Figura 4). La

caratteristica elettrica di un modulo TEG può essere modellata come generatore di tensione che dipende da un gradiente di temperatura con in serie una resistenza interna (Figura 5).

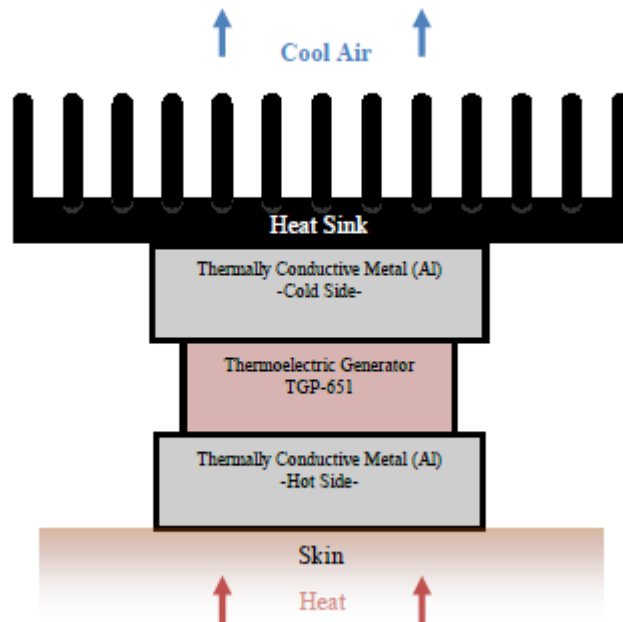


Figura 4: Schema di costruzione di un TEG

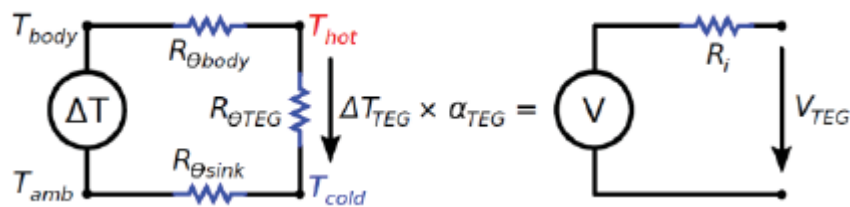


Figura 5: Modello di un TEG

La tensione a circuito aperto di un TEG è dipendente dal gradiente ai terminali di quest'ultimo dal coefficiente di Seebeck $\alpha_{TEG} [V/K]$. Il gradiente di temperatura può essere simulato utilizzando un modello semplificato che include la resistenza termica del corpo, la resistenza termica del modulo TEG e la resistenza termica del dissipatore. Nel caso di dispositivi indossabili, le resistenze dovute al corpo e al dissipatore sono molto più elevate rispetto all'altra. In [1] gli autori presentano una simulazione del modello su di un modulo TEG disponibile in commercio (QC-32-0.6-1.2) con un dissipatore di $14 \times 14 \text{ mm}$. Dalla simulazione può essere notato che il gradiente sul TEG è molto più basso del previsto e che quando ci si trova in condizione di temperatura ambiente, c'è un gradiente

di temperatura di solo 2 K. In Tabella 3 vengono mostrati i risultati di tre lavori basati sullo sfruttamento del calore generato dal corpo umano per alimentare dispositivi indossabili.

Autore	Temperatura Sorgente (corpo umano) [°C]	Temperatura Ambiente [°C]	Potenza in uscita	Dimensioni
Leonov et al. [5]	37	22	100 μW	100 mm^3
Torfs et al. [6]	37	23	1.5 mW	n/a
Zhang et al. [7]	37	25	60 μW	16 cm^2

Tabella 3: Harvesting di energia termica dal corpo umano

In [4] viene presentato un design per l'harvesting dell'energia termica dal corpo, utilizzando il TEG QC-32-0.6-1.2 con un dissipatore 14x14 mm. In [1] il design presentato in [4] viene utilizzato per calcolarne l'efficienza. D'apprima il TEG viene caratterizzato in un ambiente realistico di funzionamento, indossandolo. Il gradiente di temperatura sulla superficie del TEG in situazioni realistiche varia nel range 0-5 K. In queste condizioni la tensione in uscita dal modulo è molto bassa, nell'ordine delle decine di mV. Per questo motivo sono stati utilizzati 7 moduli TEG in serie, aumentando la tensione in uscita e riuscendo comunque ad ottenere un sistema complessivo non ingombrante. Per la conversione di energia è stato utilizzato l'LTC3108 della Linear (Figura 6). In Tabella 4 viene riportata l'efficienza del sistema per vari gradienti della temperatura.

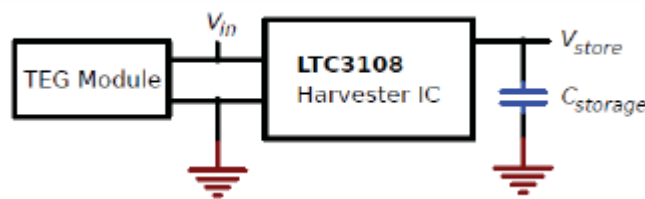


Figura 6: Sottosistema di EH composto da 7 TEG e da LTC3108

La Tabella 4 mostra i risultati in termini di efficienza del sistema di EH proposto in [4].

ΔT [K]	P_m [μW]	Tensione TEG [mV]	P_H [μW]	Efficienza [%]
(0.0,0.5]	14.49	0.0-15.1	0	0
(0.5,1.0]	72.45	8.9-18.3	0	0
(1.0,1.5]	188.37	16.4-23.4	0	0

(1.5,2.0]	362.25	20.3-25.7	0.274	0.08
(2.0,2.5]	594.08	24.4-28.8	3.048	0.51
(2.5,3.0]	883.88	27.1,31.9	16.743	1.89
(3.0,3.5]	1231.63	30.1-36.2	37.500	3.04
(3.5,4.0]	1637.35	36.2-41.4	89.289	5.45
(4.0,4.5]	2101.02	37.5,45.9	183.219	8.72
(4.5,5.0]	2622.66	43.4-52.1	253.674	9.67

Tabella 4: Potenza erogata e raccolta dal TEG per diversi gradienti della temperatura relativi al corpo umano

L'autore dimostra che è possibile collezionare fino a 200 mJ di energia al giorno grazie all'harvesting termico e tale sistema è stato utilizzato per alimentare un bracciale multisensore.

Utilizzando lo stesso design presentato in [3] e in Figura 3, gli autori hanno effettuato dei test valutando la potenza generata dal sistema di EH, utilizzando un TEG. I test sono stati effettuati sia all'interno che all'esterno di un edificio ed il soggetto indossava il sistema su di una fascia prima posta sull'avanbraccio e poi sul polso. I dati, inoltre, sono stati collezionati durante 3 diverse attività: stare seduto, fermo in piedi, camminata e corsa.

Il soggetto è rimasto fermo per 30 minuti durante le prime due attività per permettere alla tensione generata dal TEG di stabilizzarsi, mentre la camminata e la corsa sono stati effettuati su di un tapis roulant a varie velocità, rispettivamente per 10 e 5 minuti. I risultati dell'esperimento sono mostrati in Tabella 5.

Attività Fisica	Potenza (avambraccio) [mW]	ΔT [°C]	Potenza (polso) [mW]	ΔT [°C]
All'interno				
Seduto	0.164	5.6	0.238	5.9
Camminata (2 mph)	0.224	7.2	0.267	7.4
Camminata (3 mph)	0.238	7.3	0.296	7.6
Camminata (4 mph)	0.319	7.4	0.335	7.7
Corsa (5.5 mph)	0.382	7.8	0.465	8
Corsa (6.5 mph)	0.4	8	0.558	8.1
Corsa (7.5 mph)	0.431	8.2	0.612	8.4
Corsa (8.5 mph)	0.468	8.3	0.673	8.7
All'esterno				
Seduto	0.743	9.1	0.928	9.7
Camminata	0.602	10	1.03	10.4

Corsa	0.811	12.9	1.65	13.1
-------	-------	------	------	------

Tabella 5: Risultati sperimentali TEG

Esaminando la tabella, è possibile notare che la posizione ottimale tra le due scelte per l'harvesting di energia termica è il polso, dove è presente il calore proveniente dall'arteria. La potenza generata al chiuso risulta essere minore rispetto a quella all'aperto, il che viene attribuito alla presenza più massiccia di flusso d'aria, risultando in una temperatura più bassa dal lato freddo del TEG, aumentando il gradiente di temperatura. Gli autori concludono affermando che purtroppo la tensione generata in entrambi i casi dal TEG, risulta essere troppo bassa per essere amplificata dall'amplificatore DC-DC, quindi le potenze elencate sono quelle generate direttamente dal TEG e non quelle che giungono alla batteria. Comunque, i dati indicano che tali potenze potrebbero essere utilizzate per pilotare piccoli dispositivi, come dei sensori, che richiedono appunto una potenza molto bassa.

2.2 Kinetic energy harvesting

Le vibrazioni risultanti dal movimento di un soggetto rappresentano un'altra sorgente di interesse per le tecnologie di EH. Esistono numerose soluzioni che sfruttano il movimento per generare energia. Principalmente le tecnologie utilizzate si basano su elementi piezoelettrici oppure sulla legge di Faraday. I generatori elettromagnetici riescono nominalmente a fornire un quantitativo di energia maggiore rispetto alla tecnologia piezoelettrica, che può essere direttamente immagazzinato all'interno della batteria. In [1] gli autori descrivono e comparano le due soluzioni, proponendo un sistema progettato per l'EH basato sulla legge di Faraday, per dispositivi indossabili.

Uno dei metodi principali per estrarre energia cinetica dal corpo umano è quello di utilizzare generatori elettromagnetici oscillanti rotazionali. Questa tecnologia è stata brevettata dalla Seiko e viene utilizzata nella maggior parte dei loro orologi da polso. Il design consiste in una massa pendolare rotante in un generatore magnetico permanente.

In [1] viene riportato un sistema di EH dell'energia cinetica proveniente dal corpo umano che presenta anche un circuito di conversione. Viene infine effettuata una analisi sulle prestazioni del sistema complessivo, in termini di potenza generata e di efficienza di conversione.

Il trasduttore utilizzato nel sistema è l'MSG 26.4 della Kinetron. Presenta una molla meccanica come buffer di energia ad intermittenza per pilotare un generatore elettrico. In Figura 7 viene riportata la forma d'onda all'uscita del trasduttore durante il movimento.

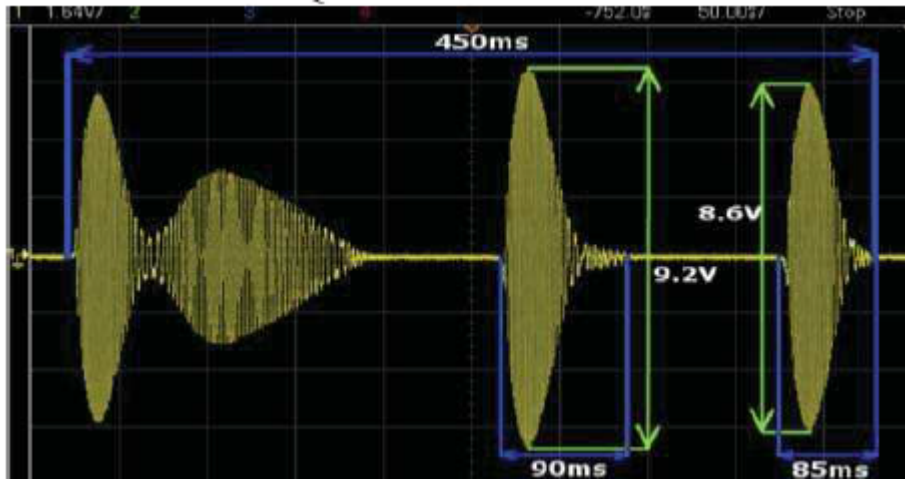


Figura 7: Forma d'onda del Kinetron MSG 26.4

Parametro	Valore Minimo	Valore Massimo
Frequenza	0.5 kHz	2 kHz
Durata	160 ms	280 ms
Ampiezza	0 V	9 V

Tabella 6: Range di valori della forma d'onda dell'MGS 26.4

L'ampiezza e la frequenza della forma d'onda, riportate in Tabella 6, dipendono dalla velocità e dalla direzione del movimento, anche se abbastanza simili tra di loro. Per collezionare la massima energia possibile, un convertitore AC-DC ottimizzato che utilizza diodi Schottky (BAT51) con caduta di tensione molto bassa (250 mV) è stato utilizzato. Il convertitore è stato poi collegato in serie ad un ulteriore convertitore DC-DC, il TIBQ25570.

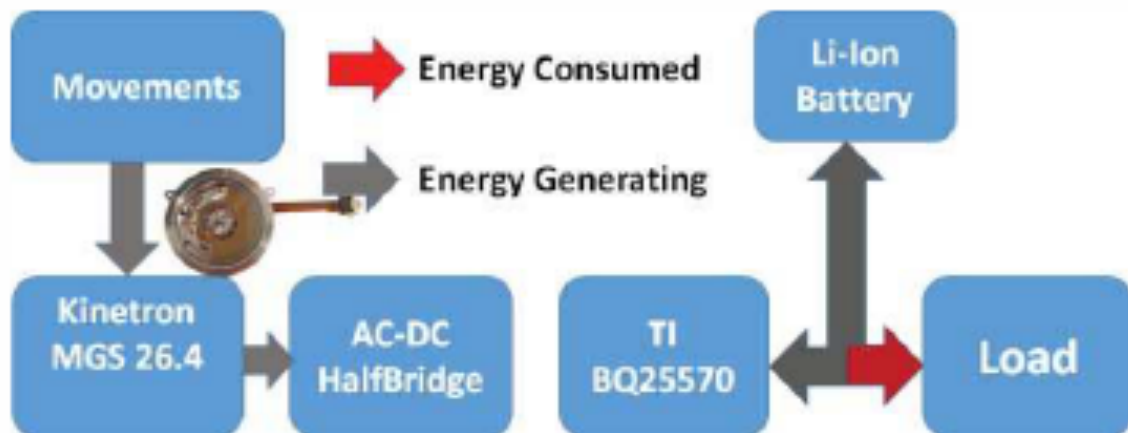


Figura 8: Schema a blocchi del sistema

L'implementazione del sistema è mostrata in Figura 8. Il parametro più importante da valutare per una stima della qualità del sistema di EH è l'efficienza energetica. Per farlo, gli autori hanno misurato l'energia massima che è possibile estrarre dall' MSG 26.4, utilizzando un resistore adattato, nel range 750Ω e $3 k\Omega$, scegliendo il valore di $1 k\Omega$. L'energia per singolo impulso misurata è di $300 \mu J$. Tale valore è stato utilizzato come riferimento nel calcolo dell'efficienza. Successivamente il trasduttore è stato collegato al circuito di harvesting e l'energia è stata immagazzinata in un super-condensatore. L'energia accumulata è stata quindi calcolata e misurata, mediando su 20 campioni. In queste condizioni gli autori hanno misurato una efficienza del circuito pari al 68%. Successivamente alle prove in laboratorio, il circuito è stato utilizzato sul corpo umano, per simulare uno scenario reale. Dai test eseguiti si dimostra che è possibile generare e collezionare grazie al movimento fino ad un massimo di $0.7 J$ al giorno.

2.3 Piezoelectric energy harvesting

L'effetto piezoelettrico converte una forza meccanica in una tensione o una corrente. La tipologia di forza può provenire da diverse fonti come ad esempio il movimento umano, vibrazioni a basse frequenze e rumore acustico. La maggior parte dei generatori piezoelettrici producono potenze nell'ordine dei mW , troppo basse per poter essere utilizzate in sistemi complessi, ma abbastanza per dispositivi indossabili. Esistono comunque delle eccezioni, in quanto negli ultimi anni la

tecnologia piezoelettrica per l'EH è stata oggetto di importanti studi. In [8] gli autori hanno realizzato un sistema per lo sfruttamento dell'energia cinetica tramite tecnologia piezoelettrica, sfruttando l'energia rilasciata nel camminare o correre. Il dispositivo viene montato all'interno della suola della scarpa.

Autore	Frequenza [Hz]	Accelerazione [ms^{-2}]	Potenza	Dimensioni
Yang et al. [9]	363	7.45	0.6 μW @ 1.38 mV	n/a
Wang et al. [10]	55	14.9	0.61 μW @ 18 mV	0.13 cm^3
Liao et al. [11]	166	n/a	7.23 mW @ 4.5 V	200 mm^3
Pillatsch et al. [12]	2	20	43 μW	1.53 cm^3

Tabella 7: Harvesting di energia cinetica tramite piezoelettrici dal corpo umano

L'idea nasce dagli esperimenti di Thad Starner che nel 1995 analizzò la potenza generata da varie attività del corpo umano. Scopri che nel camminare, il tallone risulta essere la parte del piede dove viene scaricata la maggior parte di energia (67 W): riuscire a recuperarne anche una piccola parte, permetterebbe di alimentare la maggior parte dei dispositivi a bassa potenza presenti sul mercato. Implementando un materiale piezoelettrico all'interno del tacco di una scarpa, sarebbe quindi possibile recuperare parte di questa energia dissipata al suolo. Gli autori hanno quindi realizzato un prototipo partendo da uno stivale militare, che presenta un materiale piezoelettrico dimorfo, all'interno del tacco, risultando completamente non intrusivo. Il sensore è stato poi collegato in serie ad un carico adattato per massimizzarne la potenza in uscita e l'efficienza e ad un raddrizzatore. Il generatore piezoelettrico è stato utilizzato per alimentare un semplice apparato RD che trasmette un codice identificativo a 12 bit, wireless.

Dagli esperimenti effettuati, il generatore durante una camminata riesce a generare in media 8.4 mW di potenza, in linea con i valori della Tabella 7. La potenza generata risulta essere sufficiente per l'alimentazione di dispositivi indossabili.

2.4 Solar energy harvesting

Le tecnologie di EH basati sulla luce solare rappresentano una tecnologia più matura rispetto alle altre, visto il loro utilizzo all'interno di centrali fotovoltaiche. La tecnologia presenta la possibilità di

essere scalata per poter essere utilizzata all'interno di piccoli dispositivi, come quelli indossabili. Esistono però una serie di problematiche di cui tener conto quando si utilizzano tali tecnologie: i) per lunghi periodi di tempo, il dispositivo potrebbe trovarsi al chiuso, dove l'unica sorgente di energia è la luce artificiale, ii) i pannelli fotovoltaici da utilizzare devono presentare delle dimensioni molto contenute per poter essere implementate su dispositivi indossabili, iii) rispetto alle centrali all'aperto, un pannello utilizzato su di un dispositivo indossabile potrebbe presentare dei momenti nel quale viene ostruito da elementi esterni come ad esempio un pezzo di stoffa. A dispetto di ciò, questa fonte di EH risulta comunque essere una delle più vantaggiose.

L'incremento della tecnologia ha fatto in modo che l'energia fotovoltaica possa essere utilizzata per alimentare dispositivi indossabili, creando pannelli a basso costo e flessibili. Anche se tale energia risulta una delle più promettenti ed utilizzate, non sono stati effettuati studi recenti su di essa, tranne che in [4], dove la luminosità prodotta al chiuso da lampadine viene utilizzata per alimentare smart-watch multi-sensore. La carenza di interesse scientifico è dovuta ai problemi citati in precedenza di occlusione dei pannelli e bassa illuminazione degli ambienti interni.

Una possibile configurazione del sistema presentato in [3] sfrutta tre trasduttori fotovoltaici: uno di essi è una cella rigida della Cymbet Corp., mentre gli altri due sono celle flessibili della PowerFilm e sono montati su di una fascia. Per studiare la potenza generata dal sistema in applicazioni IoT per la medicina, il sistema è stato testato in diversi ambienti e posizionato sul bicipite. I test sono stati effettuati in 3 diverse condizioni di luminosità:

- Artificiale interna, dove il dispositivo è stato irradiato da una luce di una lampadina per diverse incidenze del fascio luminoso, in modo tale da studiarne la dipendenza rispetto alla potenza generata.
- Interna naturale, dove il dispositivo è stato esposto alla luce all'interno di un ufficio, proveniente da una finestra.
- Esterna naturale.

Dai risultati dell'esperimento, le celle fotovoltaiche sono riuscite a generare abbastanza potenza da caricare la batteria, in particolare le celle flessibili hanno prodotto più potenza rispetto alla rigida e grazie alla loro flessibilità, possono essere integrato all'interno di patch. Come ci si aspettava, la potenza generata nel terzo caso, con luce esterna, risulta essere maggiore rispetto agli altri due, ma comunque nei primi due casi, il sistema è riuscito comunque a generare abbastanza energia da autosostenersi. La Tabella 8 presenta i risultati dell'esperimento.

Condizioni di luminosità	Potenza cella rigida [mW]	Potenza della cella flessibile A [mW]	Potenza della cella flessibile B [mW]
All'interno			
Luce artificiale perpendicolare alle celle	0.39	0.627	0.833
Luce artificiale parallela alle celle	0.556	1.474	2.815
Luce dalla finestra, fronteggiandola	8.42	10.816	42.977
Luce dalla finestra, lontano	1.2	4.297	5.33
All'esterno			
Giornata soleggiata (Temperatura ambiente di 13°C)	113	50.16	94.05

Tabella 8: Risultati sperimentali

In sintesi, la potenza generata dal sistema risulta essere abbastanza per alimentare il dispositivo e caricare la batteria.

2.5 RF energy harvesting

Come riportato in Tabella 1, l'energia elettromagnetica non è una opzione realistica da tenere in considerazione per l'EH su dispositivi indossabili, ciò a causa della bassa potenza disponibile. In ambito accademico esistono vari studi che esplorano la possibilità di utilizzarla ma solo pochi di essi ne valutano effettivamente l'efficacia. Al più, la massima potenza sviluppabile da tali generatori è nell'ordine dei nW , troppo bassa per essere presa in considerazione.



3 Conclusioni

In [1] vengono riportate le efficienze di due sistemi per l'EH basati sull'energia cinetica e termica. Gli autori hanno dimostrato la potenza ottenibile in situazioni realistiche (sistema montato sul corpo umano) risulta sufficiente per fornire energia a piccoli sistemi indossabili a bassa potenza, ottenendo un'efficienza del 68% con una energia collezionata giornaliera pari a $0.7 J$, recuperando l'energia cinetica dal movimento di un corpo, in particolare durante la camminata. Il sistema termico invece ha esibito una efficienza nella conversione in potenza molto bassa, con un ammontare di energia collezionata giornaliera pari a $200 mJ$.

In [3] gli autori supportano l'idea di poter utilizzare tecnologie di EH termico e solare per alimentare dispositivi medici indossabili. Un dispositivo utilizzato per la misura dell'impatto, tipicamente usato negli sport di contatto, possiede un consumo medio in idle di $7 \mu W$, in sleep mode di $80 mW$ e di $200 mW$ in modalità attiva. Assumendo che un harvester di energia solare possa essere integrato in un dispositivo del genere, sarebbe possibile alimentarlo e ricaricarne le batterie. Gli autori dimostrano che è possibile trasdurre quindi energia solare in energia elettrica per l'alimentazione di dispositivi medici indossabili a bassa potenza.

La tecnologia Piezoelettrica risulta essere un altro candidato valido per l'utilizzo all'interno di un sistema indossabile, generando però una potenza media sensibilmente più bassa rispetto alle due sorgenti citate in precedenza.

L'harvesting dell'energia EM risulta essere invece non adatto, in quando la potenza generata da tali sistemi risulta essere troppo bassa anche per l'alimentazione di dispositivi low-power.

4 Bibliografia

- [1] M. Magno and D. Boyle, "Wearable Energy Harvesting: From body to battery," 2017 12th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems In Nanoscale Era (DTIS), Palma de Mallorca, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/DTIS.2017.7930169.
- [2] Y. Chong, W. Ismail, K. Ko and C. Lee, "Energy Harvesting For Wearable Devices: A Review," in IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 20, pp. 9047-9062, 15 Oct.15, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2925638.
- [3] T. J. Voss, V. Subbian and F. R. Beyette, "Feasibility of energy harvesting techniques for wearable medical devices," 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Chicago, IL, 2014, pp. 626-629, doi: 10.1109/EMBC.2014.6943669.
- [4] M. Magno, D. Brunelli, L. Sigrist, R. Andri, L. Cavigeli, A. Gomez, L. Benini, "InfiniTime: Multi-Sensor Wearable Bracelet with Human Body Harvesting" Sustainable Computing: Informatics and Systems 2016.
- [5] V. Leonov, T. Torfs, P. Fiorini and C.V. Hoof "Thermoelectric converters of human warmth for self-powered wireless sensor nodes" Sensors Journal, IEEE 7(5) pp. 650-657, 2007
- [6] T. Torfs, V. Leonov, R. Yazicioglu, P. Merken, C. v: Hoof, R Vullers and B. Gyselinekx "Wearable autonomous wireless electroencephalography system fully powered by human body heat" Sensors, 2008 IEEE, pp. 1269-1272, 2008
- [7] T. Zhang, F. Zhang, Y. Shakhsher, J. Silver, A. Klinefelter, M. Nagaraju, J. Boley, J. Pandey, A. Shrivastava, E. Carlson and A. Wood " A batteryless 19 W MICS/ISM-band energy harvesting body sensor node SoC for ExG applications" Solid-State Circuits, IEEE Journal, 48 (1) pp.199-213, 2013
- [8] N. Shenck and J. paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics", IEEE micro, vol. 3, pp. 30-42, 2001
- [9] B. Yang, C. Lee, W. Xiang, J. Xie, J. He, R. Kotlanka, S. low and H. Feng "Electromagnetic energy harvesting from vibrations of multiple frequencies", J. of Micromechanics and Microengineering, 19(3), 2009
- [10] P. Wang, K. Tanaka, S. Sugiyama, X. Dai, X. Zhao, J. Liu, "A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on MEMS technology", Microsystems Technologies, 15(6) pp. 941-951, 2009
- [11] L. Liao, P. Chao, J. Chen, W. Chen, W. Hsu, C. Chiu, C. Lin, "A miniaturized electromagnetic generator with planar coils and it's energy harvest circuits, "Magnetics, IEEE Transactions on 45(10) oo.4621 – 4627
- [12] P. Pillatsch, E.M Yeatman, A.S. Holmes, "A piezoelectric frequency up-converting energy harvester with rotating proof mass for human body applications", SENSOR ACTUAT A-PHYS 206(1) pp. 1278 – 185