

di Stefano Maggi

SOLUZIONI DI ENERGY HARVESTING

CON ENERGY HARVESTING SI INTENDE L'ALIMENTAZIONE DEI NODI DI UNA RETE DI SENSORI WIRELESS, SENZA UTILIZZO DI CAVI

o ricaricabili. Mini celle a combustibile e microgeneratori a combustione sono, a oggi, limitati allo stadio di ricerca. In ogni caso, batterie e sorgenti sopra citate sono comunque fonti a energia finita, che richiedono periodiche procedure di sostituzione e smaltimento o di ripristino mediante ricarica. Ciò rappresenta un notevole problema tecnico ed economico, che è attualmente considerato tra le principali limitazioni alla diffusione di sistemi di misura e dei sensori wireless.

Ricavare energia dall'ambiente

Un'alternativa consiste nell'energizzare il sensore per via elettromagnetica durante l'interrogazione da parte di un'unità esterna di lettura del segnale. Si tratta dello stesso principio utilizzato nei dispositivi passivi Rfid (Radio Frequency Identification). Il limite di questo approccio è che, in assenza di energia a bordo immagazzinata in batterie o supercondensatori, il sensore è operativo solo in prossimità dell'unità di lettura. A fronte di tutto questo, un approccio completamente

diverso consiste nel ricavare l'energia necessaria all'alimentazione di sensori e sistemi elettronici prelevandola direttamente dall'ambiente circostante. Il recupero di energia (energy harvesting) viene effettuato con opportuni convertitori, che prelevano l'energia da sorgenti ambientali e la trasferiscono nel dominio elettrico per alimentare il modulo sensore. Quest'ultimo, in questo modo, diventa autonomo, ossia energeticamente autosufficiente, e acquisisce un'operatività nel



Esempio di schema a blocchi delle funzionalità del nodo sensore

L'energy harvesting, anche conosciuto come power harvesting o energy scavenging, rappresenta il processo per il quale l'energia, proveniente da sorgenti alternative, viene catturata e immagazzinata. Per forme di energia alternative si intendono tutte quelle sorgenti comunemente disponibili nell'ambiente, inesauribili e pronte per essere opportunamente convertite in energia elettrica, direttamente utilizzabile. I recenti progressi nella microelettronica, nei sistemi micro-elettro-meccanici Mems (Micro-electro-mechanical systems) e nelle comunicazioni a radiofrequenza (RF) hanno permesso lo sviluppo di sensori e di sistemi integrati compatti e ricchi di funzionalità, nei quali è spesso presente un'interfaccia di comunicazione wireless. L'eliminazione dei tradizionali collegamenti via cavo per i sensori comporta indubbi vantaggi, tra cui riduzione d'ingombro, peso e relativi costi, maggiore mobilità dei dispositivi, fino alla completa portabilità e utilizzabilità in spazi chiusi incompatibili con soluzioni cablate. Tuttavia, con la rimozione dei cavi, il tradizionale percorso per l'approvvigionamento energetico dei dispositivi viene meno. Ciò comporta la necessità di soluzioni alternative e di nuove architetture di sistema. La soluzione più diffusa è costituita dall'utilizzo di sorgenti di alimentazione a bordo, tipicamente costituite da batterie primarie

tempo virtualmente illimitata senza intervento esterno.

Batterie, celle a combustibile e supercondensatori sono i principali esempi di dispositivi per l'immagazzinamento dell'energia (energy storage). Le batterie e le celle a combustibile basano il loro funzionamento sulla conversione di energia chimica in energia elettrica, i condensatori, invece, si basano sul principio della separazione di cariche elettriche attraverso un mezzo dielettrico costituito, generalmente, da una pellicola di un polimero o da uno strato di ossido.

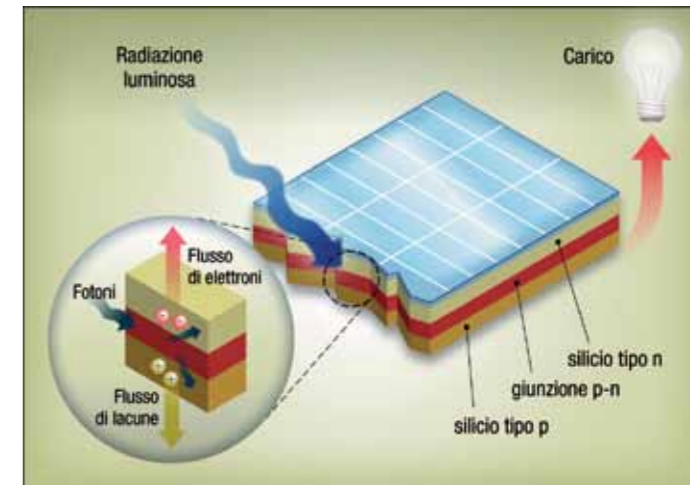
Ciascun tipo di dispositivo è caratterizzato da una diversa combinazione di densità di potenza e densità di energia. I supercondensatori si basano sulla separazione delle cariche chimicamente, tramite un'interfaccia elettrificata tra un elettrodo solido e un elettrolita, fornendo una combinazione di densità di potenza e di energia entrambe elevate. Tra le sorgenti esterne di energia figurano: la radiazione solare, l'energia meccanica proveniente da vibrazioni, movimento e flussi di fluidi, l'energia termica sotto forma di gradiente di temperatura, l'energia elettromagnetica di fondo o deliberatamente immessa in una regione di spazio per energizzare dispositivi (si parla in questo caso di 'tele-alimentazione').

In generale, per questioni di ragione pratica le potenze sono mediamente comprese tra 10 µW e 10 mW. Livelli così ridotti richiedono opportuni circuiti elettronici di gestione dell'energia e architetture innovative per il condizionamento dei segnali, intrinsecamente robuste rispetto a condizioni di alimentazione variabili e poco prevedibili.

Tra tutte le fonti di harvesting, a oggi quelle che risultano più promettenti sono quella solare, vibrazionale e termica; in presenza di un'ot-

- Energia solare

L'effetto fotovoltaico è il fenomeno fisico che si realizza quando un elettrone presente nella banda di valenza di un materiale (generalmente un semiconduttore) passa alla banda di conduzione a causa dell'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico incidente sul materiale. Tale fenomeno è utilizzato nelle celle fotovoltaiche per la produzione di energia elettrica. La cella fotovoltaica è un dispositivo costituito da una giunzione P-N di materiale semiconduttore, solitamente silicio opportunamente trattato, che provvede alla trasformazione dell'energia solare direttamente in energia elettrica. Tale cella rappresenta l'elemento base nella costruzione di un mo-



Principio di funzionamento della cella fotovoltaica

Fonte energetica	Densità di potenza	Note
Solare		
- esterno pieno sole	15 mW/cm ²	Potenza per unità di area con efficienza di conversione 15%
- esterno nuvoloso	0,15 mW/cm ²	
- interno	10 µW/cm ²	
Meccanica		
- vibrazioni macchinari	100 - 1000 µW/cm ³	Esempio: 800 µW/cm ³ @ 2 mm e 2,5 kHz
- movimento corpo umano	1 - 10 µW/cm ³	Esempio: 4 µW/cm ³ @ 5 mm e 1 Hz
- rumore acustico	1 µW/cm ² @ 100 dB	Dipende dalle condizioni specifiche rispetto al limite di Betz
- flusso di aria	750 µW/cm ² @ 5 m/s	
Termica		
- gradienti di temperatura	1 - 1000 µW/cm ³	Dipende dalla temperatura media Esempio: 10 µW/cm ³ @ ΔT = 10 °C intorno a T ambiente
- radiazione EM	50 µW	Distanza di 5 m da una sorgente di 1 W @ 2,4 GHz in spazio libero

Principali sorgenti di energia con livelli indicativi di potenza

tima illuminazione, ricavare energia dal sole rappresenta la soluzione più versatile ed efficiente. Tuttavia, nel caso questa non dovesse essere presente, lo sfruttamento dell'energia meccanica delle vibrazioni o dell'energia termica associata a gradienti di temperatura costituisce la seconda via, spesso con potenzialità di utilizzo anche maggiori. La matura tecnologia di sfruttamento (generatori piezoelettrici o elettromagnetici) e la quasi universale presenza di vibrazioni, seppur a volta estremamente deboli, di origine sia antropica sia naturale, rappresenta un ulteriore vantaggio dell'alternativa piezoelettrica.

Le fonti di energia più utilizzare

Vediamo ora sinteticamente quali sono le sorgenti più utilizzate nel campo dell'energy harvesting in riferimento ad applicazioni WSN-Wireless Sensor Network.

dulo fotovoltaico. La versione più diffusa di cella fotovoltaica, quella in materiale cristallino, è costituita da una lamina di materiale semiconduttore (il più utilizzato è il silicio) e si presenta in genere di colore nero o blu, con dimensioni variabili. I moduli fotovoltaici sono fabbricati con diverse tecnologie (silicio monocristallino, policristallino, a giunzione multipla ecc.) e presentano caratteristiche corrente-tensione differenti.

Da notare che queste celle sono dispositivi intrinsecamente inefficienti, ma sulle curve caratteristiche V-I è possibile individuare un punto di lavoro ottimale, in corrispondenza del quale la potenza prodotta è massima. Pertanto, un requisito del circuito di harvesting è essere in grado di garantire e mantenere il punto di lavoro in questa zona.

Ovviamente, variando il livello d'illuminazione, varia anche il punto di massimo, per esempio a causa del movimento del sole durante la giornata. Ciò costituisce evidentemente un inconveniente e fa nascere l'esigenza di un Maximal power point tracker (Mppt) che sappia sopperire al cambiamento delle condizioni attraverso un continuo aggiustamento del punto di lavoro. Negli impianti solari a grande potenza è una pratica comune implementare questi sistemi, per esempio tramite l'utilizzo di controllori digitali. Lo stesso non si può dire nell'ambito delle bassissime potenze (caso tipico delle reti di sensori), nel quale si aggiungono difficoltà tecniche create dal bilancio energetico estremamente contenuto attribuito alla dimensione delle celle.

- Energia vibrazionale

Le vibrazioni a bassa frequenza, le vibrazioni meccaniche, il movimento umano, addirittura il rumore acustico (basti pensare all'in-

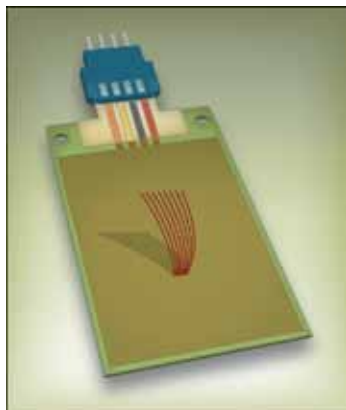
quinamento acustico delle grandi città) sono tutte forme di energia convertibili in energia elettrica. I dispositivi in grado di convertire il movimento meccanico in energia elettrica possono essere classificati a seconda del principio di conversione utilizzato. Tali principi sono essenzialmente tre: a induzione magnetica, elettrostatico e piezoelettrico. Nei convertitori elettromagnetici è presente un sistema a magnete permanente il cui flusso è concatenato con uno o più avvolgimenti. Gli avvolgimenti e il magnete costituiscono la coppia base-massa sismica o viceversa, a seconda del tipo di realizzazione. Il moto relativo tra la base e la massa sismica, causato dalle vibrazioni, induce ai capi dell'avvolgimento una tensione proporzionale alla variazione nel tempo del flusso magnetico, in accordo con la legge dell'induzione elettromagnetica.

I convertitori elettrostatici o capacitivi includono una capacità le cui armature sono solidali, rispettivamente, con base e massa sismica. Assumendo che la capacità sia mantenuta in condizioni di carica costante, il moto relativo tra le armature causato dalle vibrazioni induce tra queste una tensione proporzionale alla variazione della capacità nel tempo. La limitazione fondamentale consiste nella necessità di una condizione di precarica della capacità, al fine di poter attuare la conversione.

I convertitori piezoelettrici sfruttano l'effetto piezoelettrico diretto, ovvero la proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando soggetti a una deformazione meccanica. Si tratta di un effetto che si verifica su scala nanometrica ed è reversibile. Attualmente le sorgenti piezoelettriche rappresentano una delle principali fonti di energia utilizzabili mediante tecniche di energy harvesting.

Recentemente sono stati messi a punto materiali piezoelettrici a matrice plastica polimerica (Pvdf) e continui sviluppi sono in corso per trovare nuovi materiali e processi di fabbricazione sempre più avanzati.

Esistono infine, anche strutture basate su array di generatori di potenza Mems. Tali dispositivi si possono sintonizzare su più frequenze in modo da ampliare la banda di frequenze e includere anche le vibrazioni ambientali che sono solitamente a bassa frequenza.



Esempio di trasduttore piezoelettrico

- Energia termica

Tutto ciò che è intorno a noi produce calore. Il PC, una lampada, persino il corpo umano sono esempi di sorgenti di calore. Il calore è energia in movimento che, se non raccolta e convertita, verrebbe sprecata. I dispositivi termoelettrici sono in grado di convertire il calore in elettricità e viceversa secondo due principi fisici: l'effetto Seebeck e l'effetto Peltier. Il primo è quell'effetto termoelettrico per il quale, in un circuito costituito da conduttori metallici o semiconduttori, una differenza di temperatura genera elettricità. È l'opposto dell'effetto Peltier dove, invece, è il flusso di corrente elettrica che, scorrendo tra i due materiali, produce un trasferimento di calore.

Gli odierni dispositivi hanno però due grosse limitazioni: non pos-

siedono un'efficienza sufficientemente elevata e sono realizzati con materiali rari, quindi relativamente costosi, nonché spesso dannosi per l'ambiente.

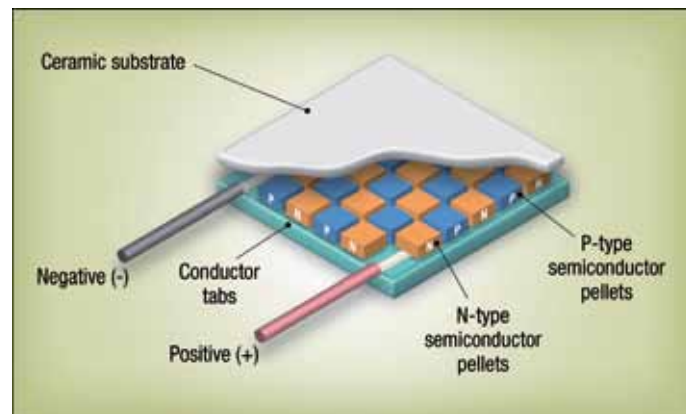
Una differenza di temperatura tra due punti ha come conseguenza l'instaurarsi di un flusso di energia termica che va dal punto a temperatura maggiore a quello a temperatura più bassa. Il flusso di calore sarà presente fino al raggiungimento dell'equilibrio termico e può essere sfruttato per raccogliere energia riutilizzabile. Il processo di estrazione dell'energia dallo scambio di calore è governato dalle leggi della termodinamica. Per questo motivo, la massima efficienza, ossia il rapporto tra il lavoro utile estratto e il calore in ingresso (legata al limite di Carnot), è molto basso se lo scambio di calore avviene tra punti con piccola differenza di temperatura.

La massima efficienza idealmente raggiungibile è governata dalla relazione:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

dove T_h e T_c sono rispettivamente la temperatura assoluta della superficie più calda e di quella più fredda del generatore termoelettrico. Ovviamente, maggiore è la differenza di temperatura, maggiore è l'efficienza massima teorica raggiungibile.

I generatori termoelettrici (TEG) sono costituiti da moduli termoelettrici che convertono una differenza di temperatura ai capi del dispositivo e il conseguente flusso di calore che scorre attraverso di esso in una tensione elettrica (come accennato tramite l'effetto Seebeck). I moduli termoelettrici sono generalmente costituiti da coppie di



Esempio di costituzione di un generatore termoelettrico

pellet semiconduttori di tipo N e di tipo P, connesse in serie elettricamente e poste tra due piastre ceramiche termicamente conduttive. La polarità della tensione di uscita dipende ovviamente dalla polarità del differenziale di temperatura attraverso il TEG.

Al termine di questa sintetica panoramica è utile segnalare che il basso consumo e la possibilità di autoalimentarsi, anche da più sorgenti contemporaneamente, sono caratteristiche fondamentali dei nodi costituenti una rete di sensori wireless, i quali rappresentano un candidato ideale per un ampio spettro di applicazioni e utilizzi: monitoraggio ambientale, home&building automation, controllo all'interno di veicoli, rilevamento di intrusioni all'interno di aree estese o edifici, monitoraggio flessibile e scalabile di dati nel settore industriale, agroalimentare, biomedicale, che appaiono oggi di così grande interesse.