

Onde evanescenti e trasmissione di energia senza fili

VALTER BELLA

Nell'ambito delle telecomunicazioni, dell'informatica e dell'intrattenimento assistiamo oggi ad una crescita vertiginosa di dispositivi portatili. Sicuramente questi hanno contribuito a semplificare molti aspetti della nostra quotidianità, ma per contro, la presenza al loro interno delle batterie ha posto nuovi problemi quali la ricarica, la sostituzione e lo smaltimento delle medesime. Oviare alla presenza delle batterie non è semplice e le strade percorribili sono sostanzialmente due: l'*energy scavenging*, ossia il tradurre in energia elettrica altre forme di energia presenti nell'ambiente circostante, e la trasmissione di energia senza fili. L'articolo affronta quest'ultima tecnologia, basata sulle onde evanescenti e sui circuiti risonanti accoppiati. A valle di un'esposizione concettuale di questo sistema sono descritti i due relativi dimostratori, realizzati nel MIT e in TILab. Entrambi gli esperimenti hanno dimostrato un trasferimento energetico a distanze dell'ordine del paio di metri, con un'efficienza compresa tra il 15% ed il 40%. Il prototipo TILab ha dimostrato inoltre che il trasferimento energetico è perturbato in modo minimo anche quando tra l'elemento emittente e quello ricevente sono interposti oggetti, anche metallici, conferendo così al sistema notevole flessibilità operativa per sue eventuali future applicazioni. Già ora una ricaduta applicativa è possibile per quanto concerne la ricarica senza fili di telefonini, notebook ed altri dispositivi multimediali. Infatti, una soluzione molto semplificata del dimostratore prevede un'integrazione del loop emittente in qualunque superficie (tavoletta, scrivania od altri supporti ergonomici) rendendo così possibile un'efficientissima ricarica di qualunque dispositivo portatile semplicemente appoggiandolo su di essa. Sul medio termine invece, un dispositivo ad onde evanescenti potrebbe risultare impareggiabile nell'ovviare all'uso massivo delle batterie in scenari emergenti come l'*Internet delle cose*, con un positivo impatto in termini economici e manutentivi, ma soprattutto contribuendo a migliorare l'impatto ecologico, tema assai caro a Telecom Italia già da tempo impegnata sul fronte del risparmio energetico.

1. Introduzione

La capacità di trasferire “senza fili” dati attinenti ad informazioni vocali, video e testuali ha oggi raggiunto un soddisfacente grado di maturità, concretizzando così il primo dei due obiettivi collegati al mondo delle telecomunicazioni. Il secondo obiettivo è quello di far funzionare tutto ciò che è portatile “senza batterie”, e conseguentemente senza i relativi caricatori. Già oggi nelle nostre abitazioni ed uffici cerchiamo di districarci tra grovigli di fili

dei caricatori per cellulari, dispositivi bluetooth, laptop, PDA oltre a quelli per gli MP3 player, videocamere e fotocamere digitali.

Ma l'attuale scenario non evidenzia ancora appieno la portata di questo problema. Già nei prossimi anni, infatti, si assisterà ad una nuova rivoluzione denominata l'*Internet delle cose*, un'espressione suggestiva per indicare miliardi di oggetti che si autorganizzano in pico-reti di sensori ed attuatori WSN (*Wireless Sensor Network*), in grado di conferire una “fisicità” all'attuale Internet dotandola della capacità

di percepire gli stimoli provenienti dell'ambiente reale circostante e di reagire in modo appropriato ad essi. Ciascuno di questi oggetti è dotato almeno di un processore, una radio, un sensore, un attuatore e, ovviamente, una batteria. Questo significa che, a meno di nuove soluzioni, le batterie impiegate si conteranno a miliardi con problemi enormi da risolvere in termini economici, ecologici e manutentivi.

Telecom Italia, da tempo impegnata sul tema del *risparmio energetico* nonché sulla sperimentazione di fonti alternative di produzione di energia elettrica per alimentare le stazioni radio base, pone anche particolare attenzione al problema delle batterie in quanto destinato a divenire precipuo nei futuri servizi a valore aggiunto (VAS) basati sulle emergenti reti wireless di sensori ed attuatori. In questo contesto, presso i laboratori di ricerca TILAB sono in essere attività di scouting e realizzazione prototipale sulle due possibili modalità alternative alle batterie:

- l'*energy scavenging*, ossia l'insieme di tecnologie per tradurre in energia elettrica altre entità presenti nell'ambiente circostante quali luce, suoni, vibrazioni, temperatura, campi elettromagnetici, ... ;
- la *trasmissione di energia senza fili*, necessaria quando dell'*energy scavenging* non risulta sufficiente ed occorre perciò trasferire energia dalla sorgente al dispositivo finale senza l'adozione di conduttori elettrici.

Mentre l'*energy scavenging* è una tematica di ricerca piuttosto diffusa in ambito accademico e presso i laboratori di ricerca, la trasmissione di energia senza fili è meno trattata in quanto non ha raggiunto ancora una soluzione ottimale, ma proprio per questo essa rappresenta un tema sfidante e disruptive per le applicazioni wireless del futuro.

2. La trasmissione di energia senza fili

2.1 Un po' di storia

Nel 1825 William Sturgeon inventò l'elettromagnete e grazie a questo sei anni dopo Michael Faraday dimostrò il principio dell'induzione elettromagnetica, ossia il fenomeno per cui la variazione del campo magnetico in un elettromagnete induce una corrente alternata in un avvolgimento adiacente anche se non vi è alcun contatto elettrico. Combinando queste due scoperte, nel 1836 Nicholas Joseph Callan dimostrò la trasmissione e la ricezione di energia elettrica senza fili con un dispositivo che oggi è conosciuto come trasformatore elettrico.

Nel 1864 il matematico James Clerk Maxwell formulò un pacchetto di equazioni, che presero il suo nome, in grado di descrivere con accuratezza la propagazione nello spazio della radiazione elettromagnetica e la relazione esistente tra campo elettrico e campo magnetico. Nel 1888 Heinrich Hertz confermò sperimentalmente le equazioni di Maxwell con un generatore di onde elettromagnetiche rilevabili a distanza. Ciò permise qualche anno dopo a

Guglielmo Marconi di evolvere l'apparato di Hertz realizzando la prima trasmissione radio a distanza.

Ma quando si conduce una ricerca bibliografica sul tema della trasmissione di energia senza fili si finisce sistematicamente, e doverosamente, col ritrovare il grande fisico, inventore ed ingegnere serbo Nikola Tesla, nato a Smiljan nel 1856. Tesla è conosciuto soprattutto per il suo rivoluzionario lavoro e i suoi numerosi contributi nel campo dell'elettromagnetismo tra la fine dell'Ottocento e gli inizi del Novecento. Tra le sue molteplici creazioni vi è anche la bobina di Tesla (figura 1A), un trasformatore risonante con avvolgimenti sintonizzati in aria per produrre altissime tensioni ad alta frequenza.

Egli realizzò diverse versioni di queste bobine, sempre più potenti, sino alla costruzione della

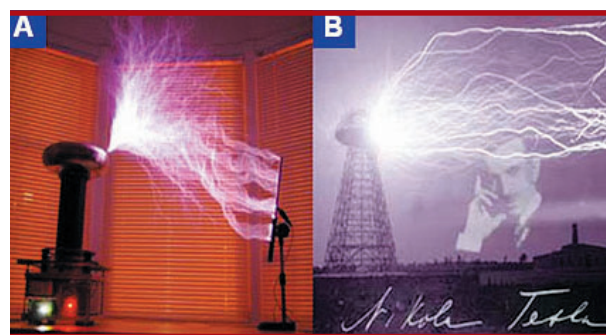


FIGURA 1 ▶ A) Bobina di Tesla;

B) foto d'archivio della torre di Wanderclyffe.

Wardenclyffe Tower (figura 1B) avvenuta nel 1903, una torre alta 60 metri sulle scogliere di Wardenclyffe, Long Island, New York e contenente un'enorme bobina per la trasmissione di energia senza fili a chilometri di distanza. Purtroppo il geniale scienziato non era un buon manager di se stesso e vari conflitti con i suoi finanziatori lo portarono allo smantellamento della torre ed alla successiva morte in povertà.

Dopo le esperienze di Tesla, l'uso delle onde elettromagnetiche si indirizzò prevalentemente alla trasmissione dell'informazione, grazie anche ad invenzioni straordinarie per la comunicazione di massa quali la radio e la televisione. Tuttavia, sebbene in forma più contenuta, nei decenni successivi furono sperimentate varie tecniche di trasmissione di energia wireless, anche con risultati di rilievo, ma sempre con qualche controindicazione, talvolta di carattere economico, altre volte di dipendenza da fenomeni fisici naturali, come esposto nel prossimo paragrafo.

2.2 Gli approcci odierni

Il parametro di maggior criticità nel trasferimento di energia senza fili è indubbiamente l'efficienza. Essa è definita come il rapporto tra la potenza che raggiunge l'unità ricevente e quella emessa dall'unità trasmittente.

Tra il 1960 e 1970 furono sperimentate tecnolo-



FIGURA 2 L'energia a microonde ricevuta viene convertita in corrente continua da una rectenna (da rectifier e antenna).

gie per il trasferimento di energia ad alta efficienza e potenza, anche su lunghe distanze, tramite sistemi a fasci di microonde che in condizioni favorevoli raggiungono un'efficienza del 90%. Per contro trasmettitore e ricevitore devono essere in visibilità ottica senza ostacoli interposti ed il sistema richiede antenne ad alto guadagno e quindi di dimensioni ingombranti (figura 2). Infine il sistema deve essere ubicato in zone rurali scarsamente abitate per ovviare a possibili effetti sulla popolazione in termini di impatto biologico.

Un'altra tecnologia efficiente per il trasferimento energetico senza fili è costituita da un trasmettitore laser ed un ricevitore costituito da pannelli fotovoltaici ottimizzati per offrire la massima resa sulla lunghezza d'onda del laser. A tal proposito, nel 2003 la NASA ha concretizzato questa tecnologia facendo volare un modello di aereo (figura 3) su cui era puntato un raggio laser: la replica in scala reale di questo esperi-

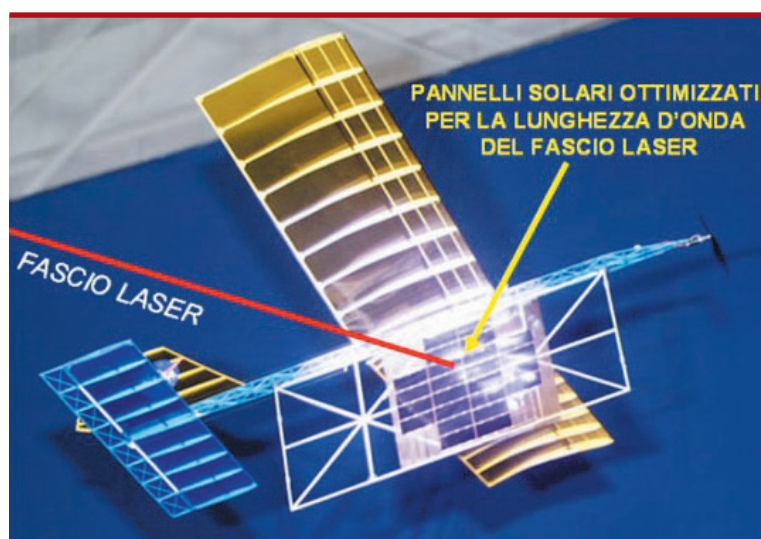


FIGURA 3 Modello di aereo realizzato dalla NASA funzionante tramite energia trasmessa da un fascio laser.

mento, con fascio laser emesso da satelliti, conferirebbe al velivolo un'autonomia di volo praticamente illimitata.

Il maggior inconveniente di questo approccio, oltre al requisito che trasmettitore e ricevitore devono essere in visibilità ottica, è rappresentato dall'attenuazione del fascio laser per assorbimento in caso di nuvole o nebbia.

Esiste poi un progetto, ad oggi non ancora concretizzato per ragioni economiche, denominato SPS ossia una rete di satelliti disposti in modo da raccogliere in modo continuativo sulle 24 ore la luce solare trasformandola in un potente fascio a microonde da indirizzare verso stazioni riceventi a terra (figura 4); in altre parole si avrebbe un'energia continuativa, rinnovabile con zero emissioni.

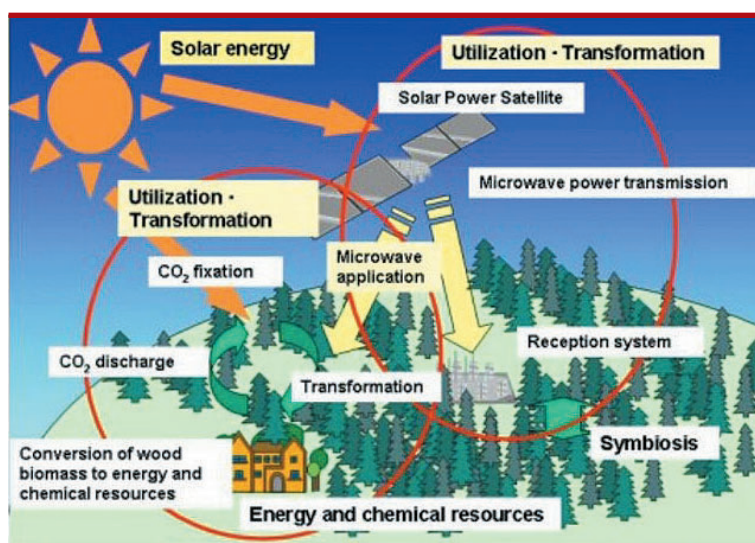


FIGURA 4 Schema concettuale del progetto SPS (Solar Power Satellite).

Sicuramente, ad oggi, la trasmissione di energia via cavo è molto più efficiente di quella wireless, soprattutto sulle lunghe distanze in quanto l'ottima conducibilità elettrica del rame introduce basse perdite energetiche lungo il cammino. Per tutte queste ragioni esposte, finora l'unico trasferimento energetico wireless che ha trovato ampia diffusione è quello destinato ad applicazioni richiedenti distanze molto brevi e potenze molto contenute, quale la *passive RFID* (Radio Frequency Identification), una tecnologia per l'identificazione automatica di oggetti, animali o persone.

Il sistema *passive RFID* si basa sulla lettura, a distanza di pochi centimetri, di informazioni contenute in un'etichetta elettronica priva di batteria ed alimentata dal campo elettromagnetico generato da un opportuno lettore.

In questo scenario rimaneva però un dominio spaziale ed energetico inesplorato, ossia quello relativo alla trasmis-

sione di energia wireless nel raggio di pochi metri con potenze dell'ordine della decina di watt. Improvvisamente l'interesse per questo dominio è tornato vivo per l'esigenza di alimentare senza batterie miliardi di dispositivi wireless a basso consumo. Dopo varie esplorazioni teoriche e simulazioni funzionali condotte a livello mondiale presso importanti atenei e rinomati centri di ricerca tra i quali TILab, un approccio è parso concretamente percorribile: quello delle onde evanescenti.

3. Le onde evanescenti

3.1 Definizione

Prima di proseguire nella trattazione sul tema occorre fornire una spiegazione sulla natura delle onde evanescenti, cercando di evitare un prolisso formalismo matematico, per il quale si rimanda alle ben note soluzioni delle equazioni di Maxwell presenti in letteratura. Le equazioni di Maxwell descrivono le relazioni tra campo elettrico e campo magnetico e tra carica elettrica e corrente elettrica. Da queste equazioni si evince che la radiazione emessa da un'antenna è spazialmente suddivisa in tre regioni: campo vicino non radiativo, campo vicino radiativo e campo lontano radiativo. Le onde evanescenti sono le onde presenti nell'immediata vicinanza dell'antenna, ossia nel campo vicino non radiativo, e la loro energia viene emessa, e quasi totalmente riassorbita, in modo ciclico. Queste onde vengono dette evanescenti perché gli effetti della loro presenza decadono in modo esponenziale con l'allontanarsi dall'antenna e già dopo una distanza pari a circa un terzo della loro lunghezza esse non sono più rilevabili.

Il modo più intuitivo ed immediato per osservare le onde evanescenti è quello di dirigere un raggio luminoso con una certa angolazione su una superficie di separazione tra due mezzi, ad esempio aria ed acqua, aventi diverso indice di rifrazione (figura 5). Tipicamente, una componente del raggio luminoso incidente viene riflesso indietro mentre l'altra penetra nel secondo mezzo cambiando l'angolo d'incidenza. Questo è il motivo per cui se osserviamo un cucchiaino immerso in un bicchiere contenente acqua esso ci appare "spezzato". Il fenomeno della rifrazione però si manifesta solo fino ad un certo angolo di incidenza del raggio luminoso, detto angolo critico, oltre il quale la riflessione diviene totale ed il raggio luminoso non penetra più nel secondo mezzo. Quando si verifica la riflessione totale, nel secondo mezzo tuttavia si ha un'onda trasmessa che si propaga lungo la superficie di separazione, mentre si attenua in modo esponenziale nella direzione normale alla superficie stessa: essa è un'onda evanescente.

Ma perché l'onda evanescente esiste? Fisicamente l'insorgere di un'onda evanescente

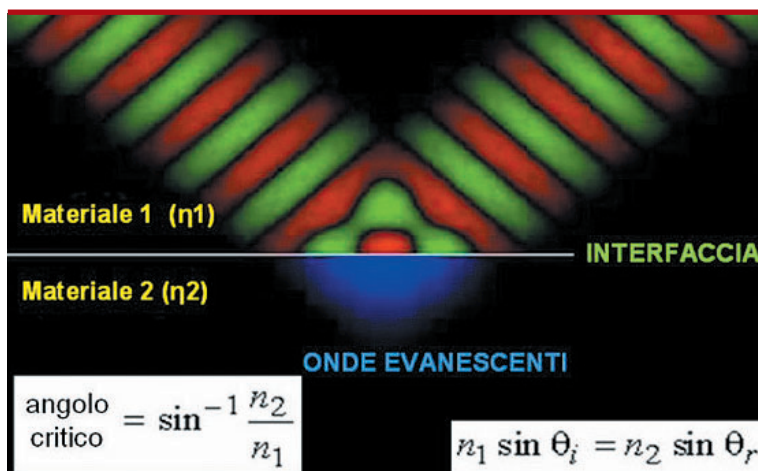


FIGURA 5 ▶ Le onde evanescenti emergono contestualmente al fenomeno della riflessione totale.

può essere spiegata in modo relativamente semplice. Un fascio di luce incidente ha una velocità di fase che è funzione dell'indice di rifrazione dei due mezzi coinvolti. Supponiamo che il primo mezzo abbia un indice di rifrazione più elevato del secondo: la velocità di fase nel primo mezzo risulta minore dell'analoga quantità nel secondo mezzo. Nella regione di interfaccia, per rispettare la continuità delle componenti magnetica ed elettrica del campo, le onde che si propagano nei due mezzi devono muoversi con la stessa velocità nella direzione dell'asse superficiale. Ne consegue che, con l'aumentare dell'angolo incidente del raggio luminoso sino a raggiungere l'angolo critico, l'onda presente nel secondo mezzo deve dunque rallentare per mantenersi in fase con la prima, fino a trasformarsi in un'onda lenta superficiale con ampiezza che decresce esponenzialmente, ossia un'onda evanescente.

3.2 I vantaggi dell'accoppiamento tra risonatori ad onde evanescenti

Per accoppiamento tra risonatori si intende il processo per cui un'onda evanescente viene trasmessa da un mezzo all'altro per mezzo di un campo elettromagnetico non radiativo. Il vantaggio precipuo di effettuare un accoppiamento tra risonatori ad onde evanescenti sta nel fatto che se non vi è un mezzo ricevente risonante alla stessa frequenza, gran parte di quest'energia non radiativa rimane confinata alla sorgente (figura 6A), senza propagarsi e dissiparsi inutilmente.

Un altro grande vantaggio offerto dall'accoppiamento tra due o più risonatori sta nel fatto che se nell'ambiente circostante esistono altri apparati con frequenza di risonanza differente lo scambio energetico con quest'ultimi è minimo, il che significa anche ridurre al minimo il rischio di interferenze.

In ultimo, ma non per importanza, essendo l'accoppiamento tra i risonatori prevalentemente dominato dal campo magnetico, il trasferimento energetico tra apparato sorgente e ricevitore rimane effi-

ciente anche quando vi si trovano interposti sul cammino oggetti di varia natura (figura 6B), anche metallici ma non ferromagnetici, come rame ed alluminio in quanto la componente elettrica del campo non partecipa alla propagazione.

3.3 Generare le onde evanescenti

Il concetto fisico di onde evanescenti trova conferma in esperimenti effettuati nei domini dell'acustica, dell'ottica e delle onde radio. Proprio in quest'ultimo dominio ci si orienta al fine di effettuare trasferimenti energetici con un raggio d'azione dell'ordine dei metri. In precedenza si è visto che il raggio d'azione delle onde evanescenti è di circa un terzo della loro lunghezza d'onda, perciò diventa relativamente semplice determinare la frequenza cui il sistema dovrà operare in quanto quest'ultima è data dal rapporto tra la velocità della luce e la lunghezza d'onda prescelta. Requisito fondamentale nell'utilizzo delle onde evanescenti è quello di costruire strutture emittive in grado di esaltare la componente magnetica del campo a radiofrequenza generato cercando di sopprimere e schermare per quanto possibile la componente elettrica, la cui presenza nel campo lontano radiativo genera segnali interferenti indesiderati. Nel capitolo seguente è illustrato l'approccio concettuale per la realizzazione di un prototipo per il trasferimento energetico senza fili.

4. Architettura di un sistema di trasferimento energetico ad onde evanescenti

Lo schema concettuale dell'architettura adottata per il trasferimento energetico tramite onde evanescenti è illustrata in figura 7. Un generatore a radiofrequenza applica un segnale con frequenza dell'ordine dei megahertz ad un risonatore ad alto fattore di merito, cuore del sistema, progettato in modo da emettere principalmente la componente magnetica del campo e di sopprimere la componente elettrica, tipicamente presente nella propagazione del campo lontano. Le onde evanescenti emesse trasferiscono la loro energia ad un analogo

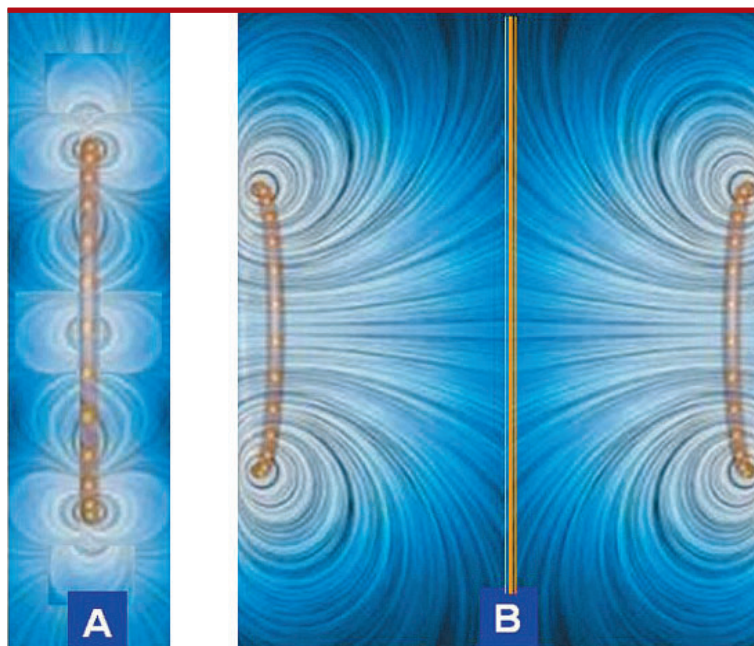


FIGURA 6 A) L'energia del campo evanescente rimane nell'intorno della sorgente; B) Il trasferimento energetico continua anche con schermi interposti sul cammino.

risonatore posto ad una distanza di qualche metro. Se la tensione presente in arrivo non è sufficientemente elevata, questa può essere moltiplicata, senza l'ausilio di elettronica alimentata, tramite un circuito di Cockcroft-Walton. Nei paragrafi che seguono sono analizzati i singoli blocchi costituenti l'intero sistema.

4.1 Il loop magnetico risonante

Quando un circuito con induttanza (L) e capacità (C) collegate in parallelo (figura 8A) viene eccitato da un'energia esterna, a radiofrequenza, l'energia elettromagnetica percorre l'induttore L ed il condensatore C ed assume alternativamente la forma di un campo magnetico (durante la fase di corrente nell'induttanza) e di un campo elettrico (durante la fase di tensione al condensatore).

Nelle immediate vicinanze del circuito (campo vicino) c'è un campo d'induzione elettromagnetica che decresce secondo il cubo della distanza. Un tale circuito però non crea un significativo campo di radiazione, tuttavia se si modifica la struttura del condensatore aumentando la distanza fra le sue armature e si stira l'induttore in maniera che le due componenti del circuito occupino uno spazio massimo, il prodotto LC rimane inalterato ed il circuito è in grado di produrre una radiazione elettromagnetica in grado di propagarsi nello spazio (campo lontano). Un siffatto circuito prende il nome di "antenna". Ma dov'è finita la capacità che avevamo nel circuito? Si è ripartita per tutta la lunghezza dell'induttanza, che è stata stirata sino ad assumere la forma di un filo (figura 8B).



FIGURA 7 Schema a blocchi di un sistema per la trasmissione di energia in campo evanescente

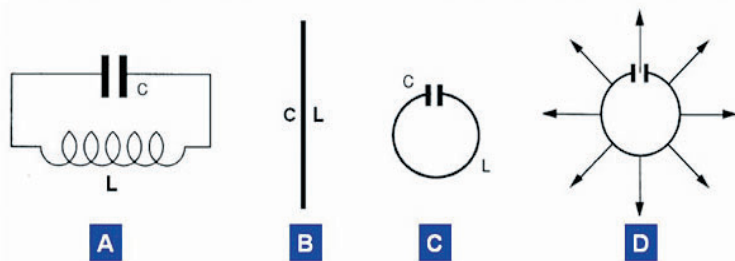


FIGURA 8 A) Circuito risonante LC; B) filo stirato; C) loop a singola spira; D) direzione di emissione del loop magnetico.

L'obiettivo in oggetto è però quello di realizzare un loop con un campo elettrico di prossimità quanto più debole possibile e ciò è possibile concentrando la capacità del circuito in un condensatore, invece che ripartirla per tutta la lunghezza del filo irradiante. È per questa ragione che in fase progettuale si sceglie un loop composto da un'unica spira (figura 8C), dove il campo elettrico si concentra quasi esclusivamente nel condensatore, mentre quello magnetico si sviluppa su una superficie sufficiente a consentire l'emissione del campo vicino. La direzione di emissione principale del loop magnetico è radiale nel piano della spira (figura 8D), mentre nelle due direzioni perpendicolari che tagliano tale piano, la radiazione è minima.

Tuttavia non è sufficiente confinare il campo elettrico tra le armature del condensatore per massimizzare la componente magnetica del campo emanata, ma occorre operare un distinguo tra i loop in elettricamente piccoli e grandi.

Un loop si definisce elettricamente piccolo quando la lunghezza del cavo che lo avvolge lungo il suo perimetro è molto minore della lunghezza d'onda applicata. Vari autori utilizzano diverse lunghezze di riferimento per definire un loop elettricamente piccolo. Conformemente ai manuali della marina americana della seconda guerra mondiale, un loop è da considerarsi piccolo se la lunghezza complessiva del filo è definita come minore di 0,22 volte la lunghezza d'onda. L'ARRL Antenna Book definisce il loop piccolo se si ha una lunghezza complessiva di 0,085 volte la lunghezza d'onda.

I loop elettricamente piccoli e grandi differiscono nella distribuzione della corrente all'interno del cavo con il quale sono costituiti. Nei loop elettricamente piccoli la corrente che vi scorre

all'interno è uniforme in tutte le porzioni del cavo, mentre nei loop elettricamente grandi la corrente varia lungo la lunghezza del conduttore. Inoltre, i loop piccoli differiscono da quelli grandi dal modo in cui reagiscono ai segnali radio. Un segnale radio è un'onda elettromagnetica trasversale, o TEM (Transverse Electromagnetic Mode), in cui il campo elettrico e quello magnetico sono sempre perpendicolari fra loro ed il piano nel quale giacciono è sempre ortogonale alla direzione di propagazione (figura 9). I loop grandi rispondono fondamentalmente alla componente elettrica dell'onda TEM, mentre i loop piccoli rispondono principalmente alla componente magnetica ossia si comportano come la spira di un induttore.

Perché la forma del loop è tipicamente circolare, sebbene talvolta sono osservabili altre forme geometriche più facili da realizzare? Il motivo è semplice. Per quanto visto in precedenza, il perimetro del loop deve essere molto piccolo rispetto alla lunghezza d'onda del segnale a radiofrequenza applicato, ma contestualmente è auspicabile un'area grande per un'efficiente emissione del campo. La geometria insegna che, per una linea di una data lunghezza posta in modo da circoscrivere una certa area, la forma circolare è quella che presenta la maggiore superficie e quindi, in questo particolare contesto, il loop circolare è quello che meglio coniuga i suddetti requisiti tra loro contrastanti.

Infine il loop emittente e quello ricevente debbono possedere un fattore di merito, per convenzione indicato con Q , estremamente elevato in quanto l'efficienza di scambio energetico tra i medesimi è proporzionale al prodotto dei rispettivi Q . In sostanza per un efficiente trasferimento energetico è richiesto che: $Q_{emittente} \times Q_{ricevente} > 106$.

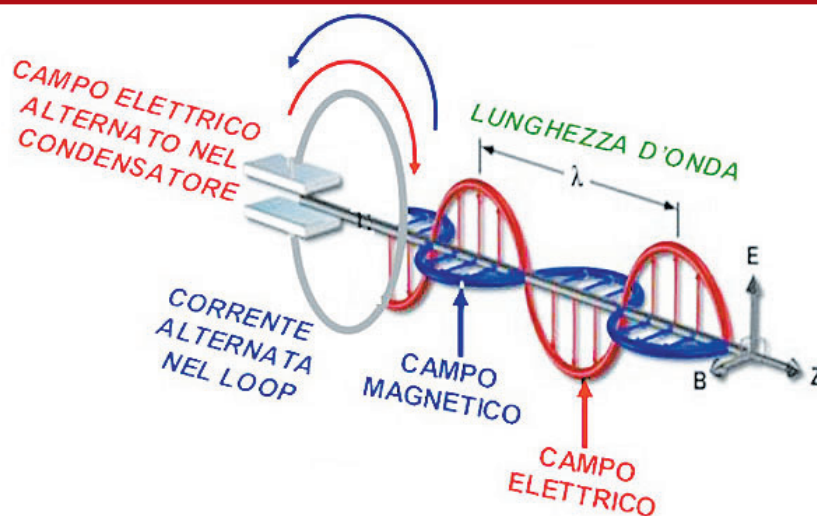


FIGURA 9 Generazione e propagazione di un campo elettromagnetico trasversale (TEM).

4.2 Moltiplicatore di Cockcroft-Walton

Mediante la ripetizione di celle in cascata, costituite da diodi e condensatori opportunamente connessi, il circuito di Cockcroft-Walton (figura 10) consente di moltiplicare una tensione alternata presente al proprio ingresso convertendola in tensione continua. In questo modo si realizzano circuiti duplicatori, triplicatori, ecc. di tensione, spesso utilizzati in molti dispositivi elettronici, il più noto dei quali è il moltiplicatore di tensione presente nello stadio AT di tutti i televisori.

Sostanzialmente in una semionda del segnale d'ingresso tutte le capacità presenti vengono a caricarsi parallelamente al valore della tensione applicata, mentre nella semionda successiva esse si trovano connesse in serie, offrendo in uscita la somma delle rispettive tensioni accumulate. Per ottenere un ampio intervallo del punto di lavoro, esso deve essere dimensionato in modo da ottenere l'efficienza di potenza ottimale, riuscendo a conseguire il massimo trasferimento di potenza dal loop ricevente al moltiplicatore di tensione.

A questo proposito, in fase di dimensionamento del valore dei componenti è importante riuscire a creare una rete di adattamento tra loop ricevente e moltiplicatore di tensione, in modo da non creare disadattamenti d'impedenza che potrebbero inficiare il corretto funzionamento e la resa dell'intero sistema.

5. Prototipi ad onde evanescenti

Nel secondo semestre del 2006, presso il MIT e il TILAB, la parte teorica e simulativa necessaria alla realizzazione di un prototipo si poteva ritenere conclusa. In questa fase vi è stato un carteggio elettronico tra l'autore del presente articolo e Aristeidis Karalis, membro del team di progetto MIT diretto dal prof. Marin Soljacic, in merito alle rispettive impressioni sulle modalità di costruzione e le potenze da porre in gioco.

Nel giugno 2007 il team di Soljacic annunciò alla comunità scientifica mondiale la riuscita dell'esperimento per il trasferimento di energia senza fili, subito ribattezzato *WiTricity*, intuitiva contrazione dei termini inglesi "*Wireless*" e "*Electricity*". Tre mesi dopo il prototipo realizzato in TILab entrava felicemente in funzione, ovviando ad alcuni inconvenienti della versione MIT.

5.1 Il prototipo di WiTricity del MIT

Come illustrato nella foto 1, il *WiTricity* realizzato dal MIT è costituito da un trasmettitore valvolare basato su un oscillatore Colpitts che eroga 400 watt. I loop risonanti sono entrambi costituiti da cinque spire circolari del diametro di 60 centimetri spaziate in modo da autorisonare alla frequenza del trasmettitore. Un accoppiamento induttivo formato da una

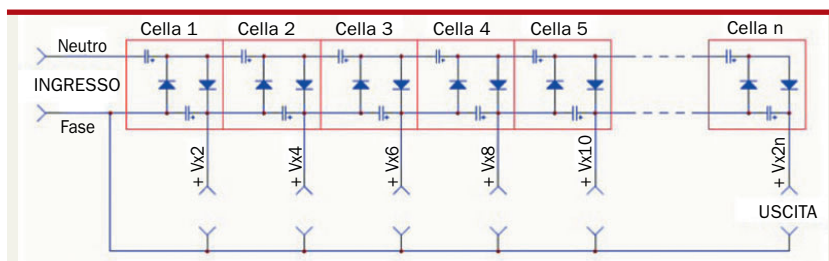


FIGURA 10 ► Circuito di Cockcroft-Walton per la moltiplicazione della tensione d'ingresso.

spira trasferisce questa potenza sul loop risonante emittente, e siccome questo trasferimento ha una resa di circa il 37% ne consegue che la potenza emessa dal loop risonante è di 150 watt.

Il prototipo MIT è in grado di accendere una lampadina da 60 watt alla distanza di due metri, dopodiché il campo, proprio perché evanescente si smorza rapidamente. In merito all'efficienza del sistema vi è una guerra dei numeri, in quanto il gruppo autore del prototipo dichiara una resa del 40%, ottenuta come rapporto tra i 150 watt emessi dal loop emittente ed i 60 watt necessari all'accensione della lampadina, mentre i detrattori dell'esperimento sostengono che la resa è solo del 15%, computata come rapporto tra i 400 watt emessi dal trasmettitore ed i 60 watt del carico finale costituito dalla lampadina.

Nonostante il successo dell'impresa ed il meritato eco mediatico nella comunità scientifica, il prototipo del MIT è ancora molto "concettuale", in quanto peso e dimensioni lo rendono tutt'altro che "portabile", i loop sono molto grandi e profondi e la loro taratura per ottenere la risonanza avviene manualmente, stringendo ed allargando le spire costituenti i medesimi, con tempi di sintonia lunghissimi.

Proprio osservando i punti deboli di questo prototipo, e cercando di ovviarli, è stato realizzato il prototipo TILab.

5.2 Il prototipo di TILAB

Il prototipo realizzato in TILab si colloca sin dalla fase progettuale su un'altra scala di potenze

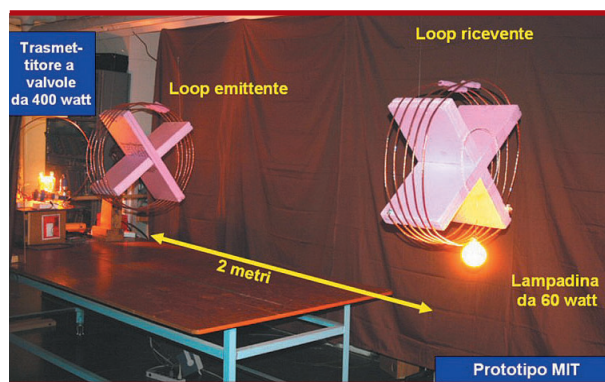


FOTO 1 ► Il prototipo MIT per la trasformazione di energia in campo evanescente.

e dimensioni, pur mantenendo l'efficienza dell'omologo d'oltre oceano. Esso è stato infatti concepito per trasmettere potenze dell'ordine del watt, in quanto esse sono più che sufficienti per alimentare nodi di reti di sensori senza fili (WSN) oppure alimentare e/o ricaricare terminali mobili.

Le specifiche, pianificate e conseguite, del dimostratore di TILab prevedevano un sistema che risultasse:

- compatto e leggero, ossia portatile;
- in grado di operare con continuità in un range di frequenze comprese tra 3 e 30 MHz senza variare i loop;
- in grado di accettare potenze di pilotaggio fino a 100 watt;
- dotato di un trasmettitore quarzato, allo stato solido e di ridotte dimensioni;
- costituito da loop emittente e ricevente con diametro dimezzato rispetto a quello del MIT;
- costituito da loop a singola spira e quindi senza profondità e senza necessità di sostegno;
- libero da tediosi ed iterati procedimenti di allineamento manuale dei loop;
- dotato di un'unica manopola di accordo tramite un condensatore variabile.

Vediamo ora com'è costituito il dimostratore TILab. Con riferimento alla foto 2, un trasmettitore quarzato fornisce un segnale a radiofrequenza che alimenta un cavo coassiale a 50 Ω richiuso a loop all'altro suo estremo. Questo piccolo loop, geometricamente dimensionato in modo da avere anch'esso un'impedenza di 50 Ω è di fatto un accoppiatore induttivo di Faraday, ossia esso consente il trasferimento della componente magnetica del campo, mentre quella elettrica è schermata dalla calza metallica del cavo stesso. Detta componente magnetica è trasferita al loop emittente



FOTO 2 • Il prototipo portatile di TILab.

che deve entrare in risonanza con la frequenza ricevuta.

A distanza di circa un paio di metri un loop ricevente deve risuonare esattamente alla stessa frequenza di quello emittente. A causa dell'elevato fattore di merito dei due loop si crea una forte risonanza magnetica che consente un trasferimento energetico di circa un milione di volte più intenso rispetto a quello dovuto dalla libera propagazione della componente magnetica del campo vicino, che, com'è noto in letteratura, decresce col cubo della distanza.

L'energia raccolta dal loop ricevente è poi nuovamente trasferita per induzione magnetica su un loop secondario a bassa impedenza, in grado di accendere una lampadina o alimentare qualche dispositivo portatile. È interessante osservare che in tutta la filiera di questo sistema per il trasferimento energetico senza fili non c'è mai contatto elettrico tra i vari componenti costituenti, ma il tutto avviene sempre per induzione magnetica.

Infine, se si interpone tra i loop un ostacolo di consistenti dimensioni, anche metallico, come illustrato nella foto 3, l'energia del campo magnetico evanescente trasmesso arriva ancora a destinazione, mantenendo accesa la lampadina. Questo aspetto, oltre che suggestivo, è significativo in termini di potenziali applicazioni che prevedono l'alimentazione di oggetti non direttamente in vista con la sorgente di onde evanescenti.

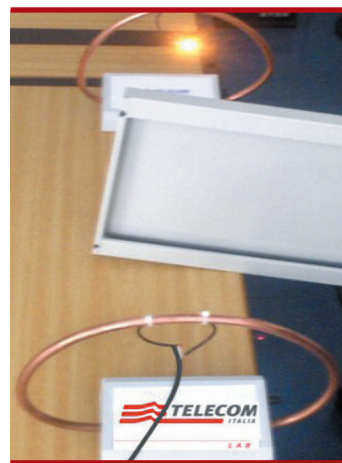


FOTO 3 • Ostacoli, anche metallici, hanno un basso impatto sul campo evanescente.

5.3 Punti ancora da risolvere e/o ottimizzare

Il successo di questo primo prototipo, pur suscitando motivata soddisfazione, non deve far scordare gli immancabili "punti deboli" ancora presenti. Occorre anzitutto operare un distinguo tra i punti da perfezionare e quelli ancora da risolvere, dando ovviamente precedenza a quest'ultimi.

I punti da risolvere sono comuni ai dimostratori MIT e TILab. In primis vi è quello della portata utile del campo energetico evanescente. Come già ricordato gli effetti energetici di un'onda evanescente sono percepibili sino ad un terzo della sua lunghezza d'onda, dopodiché essi decadono in modo esponenziale, vanificando bruscamente la resa del sistema. L'attuale efficienza dei dimostratori si estingue bruscamente oltre i due metri;

ovviamente usando una frequenza operativa più bassa, ossia una lunghezza d'onda maggiore, questa portata utile aumenta, ma occorre poi fare i conti con le dimensioni dei loop per mantenere costante il loro guadagno.

Altro punto da risolvere è la completa soppressione della componente elettrica indesiderata del campo lontano, sia per ragioni di impatto biologico verso persone ed animali sia per le possibili interferenze radio presenti sulla frequenza in uso del dimostratore. Detta componente indesiderata era inizialmente presente nei dimostratori MIT e TILab in misura di circa il 15% della potenza applicata; ora, con l'adozione del loop di accoppiamento magnetico di Faraday descritto in precedenza, essa è scesa a circa il 5%, ma future azioni di schermatura all'intera struttura potrebbero ulteriormente ridurre questo valore.

I punti da perfezionare risiedono principalmente nella qualità dei loop. Siccome essi sono percorsi da frequenze piuttosto elevate, la distribuzione di energia si manifesta principalmente sulla superficie esterna per effetto del *SE (Skin Effect)*, ossia dell'effetto pelle. L'effetto pelle è la tendenza di una corrente elettrica 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 particolarmente alle alte frequenze. In altre parole, una parte del conduttore non viene utilizzata: è come se non esistesse. Ne consegue una maggiore dissipazione di potenza a parità di corrente applicata o una minore corrente a parità di tensione applicata. Sebbene i dimostratori visti tengano già in conto dell'effetto pelle, facendo uso di loop in rame ad ampia sezione con l'interno cavo, si potrebbe compiere un ulteriore miglioramento delle prestazioni depositando sui medesimi un microstrato di metallo nobile (tipicamente argento o oro). In questo modo la resistenza dei loop diminuirebbe ulteriormente, incrementando il loro fattore di merito (*Q*) e, in ultima analisi, aumentando l'efficienza del trasferimento di energia.

6. Possibili ricadute applicative del dimostratore

Si è visto che questa tecnologia necessita di ulteriori approfondimenti in termini di efficienza e sicurezza; tuttavia già oggi alcune ricadute applicative per il dimostratore presentato sono già praticabili. Si pensi ad esempio di scalare distanza e dimensioni ed integrare il loop trasmissivo in una scrivania, in un tablet od in qualunque altra superficie ergonomica col fine di alimentare senza fili una moltitudine di apparati a batterie semplicemente appoggiandoli su di essa. Ciò significherebbe liberarsi di caricatori, fili ed adattatori per le prese di rete.



FOTO 4 ▶ Ricaricatore senza fili basato su induzione magnetica.

Un salto qualitativo ancor più interessante, da lato terminale mobile, sarebbe quello di eliminare addirittura la batteria, sostituendola con un piccolo loop ricevente collegato ad un ultracapacitore, ossia un'emergente tecnologia per l'immagazzinamento dell'energia ricevuta; a differenza della batteria, l'ultracapacitore ha un ciclo di vita media enormemente maggiore, anche superiore al tempo medio d'utilizzo del terminale stesso.

Oggi già si affacciano sul mercato dispositivi simili, basati sull'induzione magnetica ad alta frequenza, come quello mostrato nella foto 4, ma se fosse applicata la metodologia del campo ad onde evanescenti con risonatori ad alto fattore di merito, sarebbe possibile, a distanza così ravvicinata, ottenere un'efficienza nettamente superiore con dispersioni energetiche nell'ambiente circostante assolutamente trascurabili.

Immaginiamo un simile prodotto, commercializzato in bundle col telefonino marchiato TIM: oltre che utile, esso risulterebbe indubbiamente *appealing* per l'utente finale rafforzando la fidelizzazione del medesimo.

Guardando invece al medio termine, un dispositivo ad onde evanescenti potrebbe risultare impareggiabile se applicato nel campo delle reti di sensori ed attuatori wireless. Per quest'ultime, infatti, Telecom Italia ed altri grandi operatori stanno investendo in ricerca perchè le WSN sono percepite come generatori di una miriade di nuovi servizi a valore aggiunto. Secondo unanimi previsioni, nei prossimi 10, 15 anni i nodi radio delle WSN si conteranno a miliardi ed una loro alimentazione a batterie è impossibile in termini economici, manutentivi ed ecologici; la *wireless power transmission* ad onde evanescenti potrebbero divenire la soluzione ottimale a questo problema tuttora irrisolto.

7. Conclusioni

La trasmissione di energia senza fili effettuata tramite risonatori ad alta efficienza in un campo ad onde evanescenti è finalmente passata dalla fase concettuale a quella prototipale. Gli esperimenti effettuati presso il MIT e TILab hanno avuto successo, consentendo un trasferimento energetico a distanze dell'ordine del paio di metri, con un'efficienza compresa tra il 15% ed il 40%. Il prototipo TILab ha dimostrato inoltre per primo che il trasferimento energetico è perturbato in modo minimo anche quando tra l'elemento emittente e quello ricevente sono interposti oggetti metallici, conferendo così al sistema notevole flessibilità operativa per sue eventuali future applicazioni.

Sicuramente si è ancora agli inizi e parecchie migliorie debbono essere intraprese in termini di efficienza e dimensioni dei loop, di impatto biologico e di interferenze col campo elettromagnetico lontano cui altri dispositivi radio operano.

Se questi problemi aperti saranno superati i campi di applicazione della tecnologia qui presentata saranno sterminati; già ora una ricaduta applicativa è possibile per quanto concerne la ricarica senza fili di telefonini, notebook ed altri dispositivi multimediali. Infatti, una soluzione molto semplificata del dimostratore presentato, prevede un'integrazione del loop in qualunque superficie (tavola, scrivania od altri supporti ergonomici) rendendo così possibile un'efficientissima ricarica di qualunque dispositivo portatile semplicemente appoggiandolo su di essa.

Sul medio termine, un dispositivo ad onde evanescenti potrebbe risultare impareggiabile nell'ovviare all'uso delle batterie sia in ambito outdoor che indoor con un positivo impatto in termini economici e manutentivi, ma soprattutto contribuendo a migliorare l'impatto ecologico, tema assai caro a Telecom Italia già da tempo impegnata sul fronte del risparmio energetico.

valter.bella@telecomitalia.it

— ACRONIMI

ARRL	American Radio Relay League
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MP3	MPEG Layer format 3
PDA	Personal Digital Assistant
RFID	Radio Frequency IDentification
SE	Skin Effect
SPS	Solar Power Satellite
TEM	Transverse Electromagnetic Mode
VAS	Value Added Services
WiTricity	Wireless elecTricity
WSN	Wireless Sensor Network

— BIBLIOGRAFIA

- [1] André Kurs, Robert Moffat, Peter Fisher, Aristeidis Karalis, J.D. Joannopoulos, and Marin Solja_j: "Wireless power transfer via strongly magnetic resonance" – *www.sciencemag.org* – Science, vol. 317, 6 July 2007.
- [2] Aristeidis Karalis, J.D. Joannopoulos, and Marin Solja_j: "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer" – Nov 2006 - *http://arxiv.org/abs/physics/0611063*
- [3] Pozar, D. M.: "Microwave Engineering" (Wiley, New Jersey, 2005).
- [4] *Intelligent Wireless Power* - *http://www.ecoupled.com/*
- [5] Sievenpiper, D. F. et al.: "3D Metallo-Dielectric Photonic Crystals with Strong Capacitive Coupling between Metallic Islands" *Phys. Rev. Lett.* 80, 2829 (1998).
- [6] Jackson, J. D.: "Classical Electrodynamics" (Wiley, New York, 1999).
- [7] Balanis, C. A.: "Antenna Theory: Analysis and Design" (Wiley, New Jersey, 2005).
- [8] Fenske, K. and Misra, D. K.: "Dielectric materials at microwave frequencies. *Applied Microwave and Wireless*" 12, 92 (2000).
- [9] Tesla, N.: "Apparatus for transmitting electrical energy" U.S. patent number 1,119,732, dic 1914.
- [10] Fernandez, J. M. and Borrás, J. A.: "Contactless battery charger with wireless control link" U.S. patent number 6,184,651, issued in February 2001.
- [11] Esser, A. and Skudelny, H.-C.: "A new approach to power supplies for robots" *IEEE Trans. on industry applications* 27, 872 (1991).
- [12] Hirai, J., Kim, T.-W. and Kawamura, A.: "Wireless transmission of power and information and information for cableless linear motor drive" *IEEE Trans. on power electronics* 15, 21 (2000).
- [13] Haus, H. A.: "Waves and Fields in Optoelectronics" (Prentice-Hall, New Jersey, 1984).



Valter Bella si è diplomato in Telecomunicazioni e laureato in Fisica. Fino al 2000 si è occupato, presso il Centro Ricerca, microelettronica, di Telecom Italia, partecipando a numerosi progetti di ricerca in ambito nazionale ed europeo. Tra il 2001 ed il 2003 ha condotto per TILab il progetto europeo PASTORAL, dedicato all'emergente tecnologia di *Software Defined Radio*. Nel 2004 si è occupato di nuove tecnologie wireless quali RFID e ZigBee e contestualmente ha affrontato lo studio delle nanotecnologie MEMS e delle antenne frattali. Dal 2006 è attivo, presso la funzione "Research & Trends", sul tema delle reti di sensori ed attuatori wireless con particolare riferimento alla parte radio ed alle tecnologie alternative alle batterie quali l'*energy scavenging* e la *wireless power transmission*, per la quale ha ideato e realizzato il sistema qui presentato. È autore di parecchie pubblicazioni e brevetti internazionali.