
**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA E DELLE
TELECOMUNICAZIONI**

TITOLO DELL'ELABORATO

**Misure di lettura di un sistema RFID
a 13,56 MHz in presenza di piani metallici**

Elaborato in
Elettrotecnica L-A

Relatore:

Prof. Franco Mastri

Presentata da:

Daniele Ranieri

Sessione III°
Anno Accademico 2012/2013

Indice:

Introduzione	1
Capitolo 1: Principi Fisici dell'RFID	3
1.1 Basi del magnetismo	3
1.2 I solenoidi e l'induttanza	8
1.3 Accoppiamenti induttivi	11
1.4 Coefficiente di accoppiamento	14
1.5 Applicazione della legge di Faraday (induzione magnetica)	17
1.6 Circuito risonante	19
Capitolo 2: I sistemi RFID	25
2.1 Cenni storici	25
2.2 Composizione dei sistemi RFID	30
TAG	30
READER	31
SISTEMA DI GESTIONE	32
2.3 Classificazione dei TAG	33
<i>Sorgente di energia</i>	33
<i>Tipo di memoria</i>	34
<i>Principio fisico utilizzato</i>	35
<i>Chip</i>	36
2.4 Bande di operatività	37
2.5 Standard ISO ed EPC e applicazioni	39
2.6 Riassunti di confronto fra classificazioni di tag	43
Capitolo 3: Misure su un sistema RFID	45
3.1 Premessa	45
3.2 Prima I – Misure sulla distanza di lettura	45
3.2.1 Composizione del sistema RFID	46
TAG	46
READER	48
SISTEMA DI GESTIONE	51
3.2.2 Strumentazione	52
3.2.3 Set up di misura	53
3.2.4 Risultati di misura	57
3.2.5 Osservazioni e conclusioni	62
3.3 Parte II – Misure di potenza ricevuta da antenna	64
3.3.1 Strumentazione	65
3.3.2 Set up di misura	67

3.3.3 Risultati di misura	68
3.3.4 Osservazioni e conclusioni	73
Bibliografia	75
Ringraziamenti	77

INTRODUZIONE

L'RFID (Radio Frequency IDentification) nasce negli anni '40 ed è una delle tecnologie radio che al giorno d'oggi riceve maggior interesse in termini di sviluppo e diffusione.

Come suggerisce l'acronimo, si tratta di uno strumento per l'identificazione di oggetti tramite segnali a radio frequenza il cui utilizzo è già largamente diffusa in svariati settori della società odierna: logistica, trasporti, biglietteria, pagamenti elettronici, accesso crittografato, catena di montaggio, antitaccheggio ecc. Tale diffusione è dovuta ad una serie di vantaggi che questa tecnologia porta con sé, segnatamente: grande versatilità delle caratteristiche e delle funzionalità, adattabilità ai più disparati ambiti di utilizzo, basso costo di produzione e progettazione, molteplici livelli di sicurezza e standardizzazione globale.

In questo elaborato verrà preso in esame un sistema RFID con frequenza operativa di 13,56 MHz (unica frequenza riconosciuta e standardizzata a livello mondiale).

Partendo nel primo capitolo dai fondamenti teorici alla base del funzionamento della tecnologia RFID, si passerà poi a trattare nello specifico caratteristiche e prestazioni nel caso pratico di utilizzo per la lettura di dati contenuti in carte elettroniche, chiamate Smart Card.

L'applicazione studiata prevede la presenza di:

- Un dispositivo denominato reader dedicato all'identificazione tramite la gestione del campo magnetico alla base della tecnologia;
- Un transponder denominato tag (nel caso specifico una generica Smart Card) che risponde alla interrogazione del reader;
- Un sistema di gestione (Personal Computer) che analizza la comunicazione e ne permette una visualizzazione sintetica a video;

Il funzionamento e al composizione di questo sistema, che trova potenziali impieghi commerciali come: biglietteria di tram/treni, raccolta punti nei supermercati, accesso al luogo di lavoro, pagamenti elettronici, etc., verranno trattati in dettaglio nel capitolo 2.

Infine nel capitolo terzo, verranno esposti i risultati delle misure sperimentali eseguite su questo sistema focalizzandosi, in particolare, sulla distanza di

lettura fra tag e reader e sulla potenza ricevuta dal tag, due parametri di riferimento fondamentali da prendere in considerazione in fase di progetto di uno specifico sistema RFID.

Capitolo 1: Principi Fisici dell'RFID

1.1 Basi del magnetismo

La RFID (Radio Frequency IDentification) è una tecnologia che sfrutta gli accoppiamenti induttivi per trasferire dati da un chip ad un lettore; è quindi una tecnologia basata sul magnetismo.

Per capire meglio come funziona questa tecnologia occorre in primo luogo riprendere i principi e le grandezze che stanno alla base del magnetismo.

La grandezza basilare è dunque il campo magnetico H , si vedrà quindi ora come derivarne il valore e individuarne le caratteristiche attraverso alcuni esempi teorici. La legge fondamentale per calcolare il campo magnetico associato al movimento delle cariche (corrente I) è la *Legge di Ampere*.

Tale legge afferma che l'integrale lungo una linea chiusa del campo magnetico è pari alla sommatoria algebrica, con segno dipendente dal verso, delle correnti elettriche ad essa concatenate.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I^{\text{concatenate}} \quad (1.1)$$

Percorso chiuso

Partendo da questa formula, si ricava il valore del campo in alcuni casi teorici semplificati.

- Nel caso di un singolo filo rettilineo percorso da corrente I (Fig. 1) il campo magnetico risulta avere un andamento uniforme lungo un percorso circolare attorno al filo con verso dato dalla regola della mano destra e valore assoluto pari a:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (1.2)$$

dove r è la distanza dal filo alla quale si calcola il campo magnetico. Si nota che $2\pi r$ è la lunghezza del percorso chiuso, circonferenza, alla distanza r dal centro.

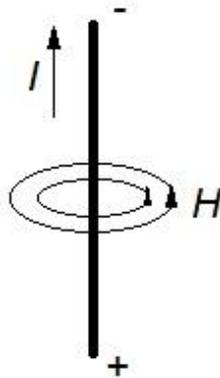


Fig. 1 Campo magnetico generato da un filo

- Nel caso di una spira, cioè un filo conduttore di forma circolare chiusa, (vedi Fig. 2), il campo magnetico sul piano della spira è perpendicolare, diretto verso l'alto o il basso a seconda del verso con cui fluisce la corrente nella spira stessa, seguendo ancora la regola della mano destra.

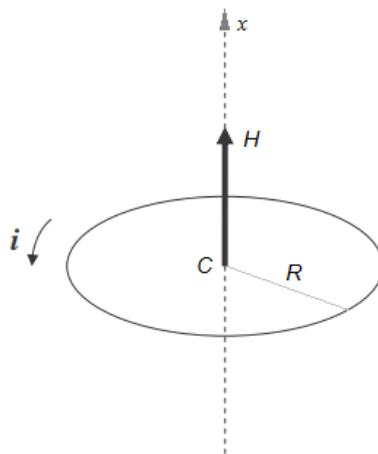


Fig. 2 Campo magnetico generato da un spira

Il campo magnetico nel centro (C) della spira può essere calcolato utilizzando la formula di Laplace e risulta avere valore assoluto:

$$H = \frac{I}{2R} \quad (1.3)$$

Mentre, allontanandosi dal centro lungo l'asse si ha:

$$H(x) = \frac{2\pi R^2 I}{4\pi(x^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{R^2 I}{2(x^2 + R^2)^{3/2}} \quad (1.4)$$

dove x indica la distanza dal centro rispetto al punto in cui si calcola H .

Altra grandezza utile per capire i concetti del magnetismo è il flusso magnetico Φ . Per definizione Φ è l'integrale della componente normale dell'induzione magnetica (B) valutato su una superficie:

$$\Phi_{Sup A} = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1.5)$$

$d\mathbf{A}$ rappresenta il vettore orientato lungo la normale alla superficie infinitesima di area dA e \mathbf{B} è la densità di flusso magnetico valutato sulla superficie stessa. Nel caso in cui il flusso magnetico sia uniforme su tutta la superficie, l'integrale si riduce al solo prodotto scalare:

$$\Phi = BA_c \cos \alpha \quad (1.6)$$

dove α è l'angolo fra le linee di campo e la normale della superficie attraversata dal flusso.

Si osservi ora che campo H è legato all'induzione magnetica B da un coefficiente di proporzionalità: la *permeabilità magnetica*, il cui valore dipende dalle caratteristiche e dalle condizioni del materiale attraversato dal campo. Nel caso dell'aria o del vuoto la formula è:

$$B = \mu_0 H \quad (1.7)$$

Dove μ_0 è una costante nota come la permeabilità magnetica del vuoto e vale $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] (henry per metro).

La permeabilità magnetica dei materiali viene invece indicata con μ e si esprime come prodotto della permeabilità magnetica relativa μ_r e di μ_0 . μ_r ,

caratteristica del tipo di materiale in cui si vuole calcolare il campo magnetico, è fortemente influenzata dalla temperatura:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.8)$$

La seconda legge fondamentale, per la descrizione del principio di funzionamento dei sistemi RFID, è la legge di Faraday:

se un circuito è concatenato con un campo magnetico variabile nel tempo, allora nel circuito sorge una forza elettromotrice indotta (f.e.m.) v_i uguale all'opposto della variazione del campo attraverso un'area circoscritta da una linea chiusa (ad esempio un avvolgimento).

$$v_i = - \frac{d\Phi_B(t)}{dt} \quad (1.9)$$

Ogni variazione nel tempo del flusso di campo magnetico ($d\Phi/dt$) genera, quindi, un campo elettrico che, tende a contrastarne la variazione.

Ciò è illustrato dagli esempi teorici riportati in Fig. 3 dove il flusso di campo magnetico è, diretto lungo la normale alla superficie individuata da una spira. Il campo elettrico indotto dalle variazioni di intensità del flusso si svilupperà circolarmente generando la corrente i nella spira. La corrente i avrà verso secondo la regola della mano destra, tale da opporsi alla variazione producendo un flusso *indotto* che contrasta o sostiene quello iniziale.

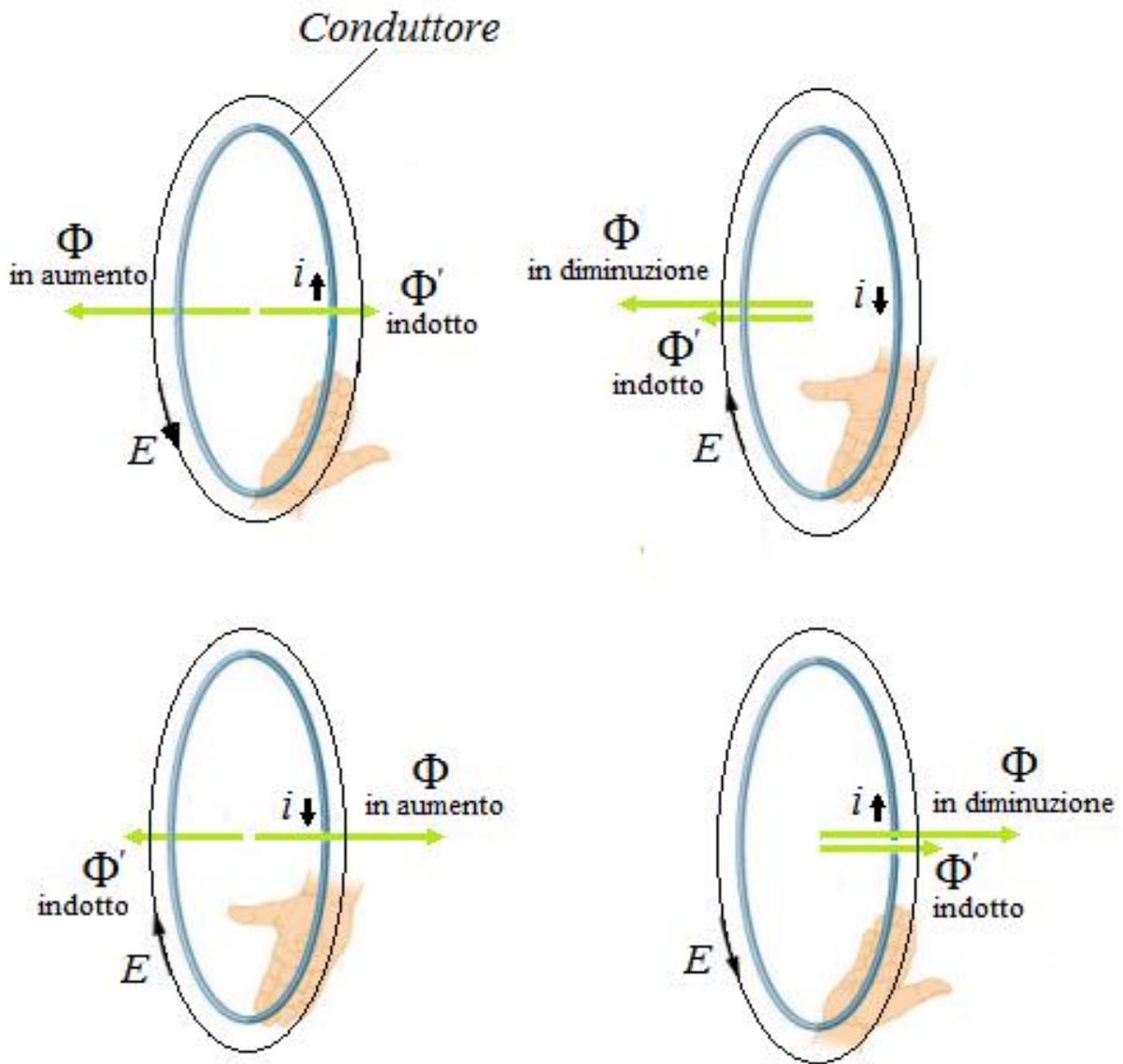


Fig. 3 Caso d'esempio per spiegare la Legge di Faraday

1.2 I solenoidi e l'induttanza

Formando più spire affiancate con un unico conduttore, si ottiene un *solenoid* come rappresentato in Fig. 4.

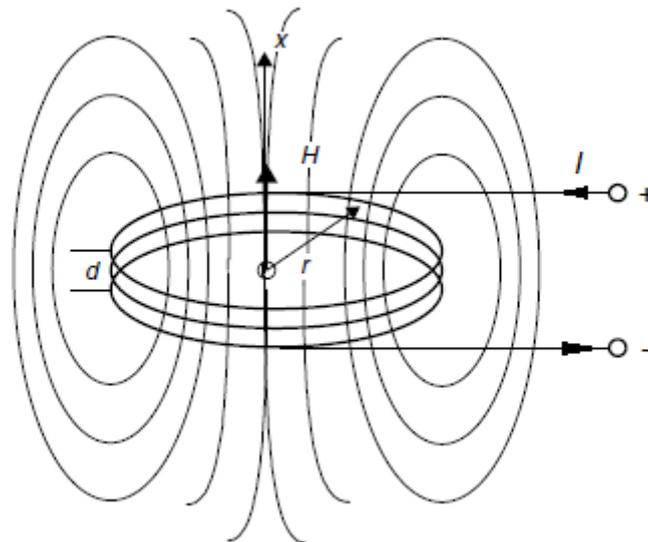


Fig. 4 Solenoide con relativo campo magnetico

Il solenoide può essere utilizzato come un generatore di campo magnetico variabile lungo l'asse x sfruttando la corrente impressa nel conduttore I . Questo elemento può essere utilizzato nella tecnologia RFID come antenna, è possibile infatti generare un intenso campo magnetico senza dover ricorrere a correnti elevate ma creando un adeguato numero di spire.

Si nota infatti che per calcolare il campo magnetico generato dal solenoide si può utilizzare la formula del campo generato da una spira (1.3) e moltiplicare per il numero di spire che lo compongono (N) ottenendo, al centro del solenoide:

$$H = \frac{NI}{2R} \quad (1.10)$$

mentre sull'asse x si ottiene dalla 1.4:

$$H = \frac{R^2 NI}{2(x^2 + R^2)^{3/2}} \quad (1.11)$$

Si evince che allontanandosi dal centro, a parità di raggio R , numero di spire N e corrente I , il campo magnetico diminuisce.

Per mostrare più chiaramente quale sia l'andamento del campo magnetico al variare della distanza dal centro si sono presi in considerazione tre esempi di solenoidi con lo stesso numero di spire N , percorsi dalla stessa corrente I ma con raggi diversi ($R_1=0,08\text{m}$, $R_2=0,02\text{m}$, $R_3=0,6\text{m}$). Come si può notare dal grafico in Fig. 5, all'aumentare del raggio diminuisce il valore del campo magnetico al centro e su brevi distanze ma aumenta la distanza assiale per la quale il campo scende sotto una determinata soglia.

Questa osservazione sull'andamento risulta utile per decidere quale tipo di solenoide utilizzare come antenna per uno specifico sistema RFID.

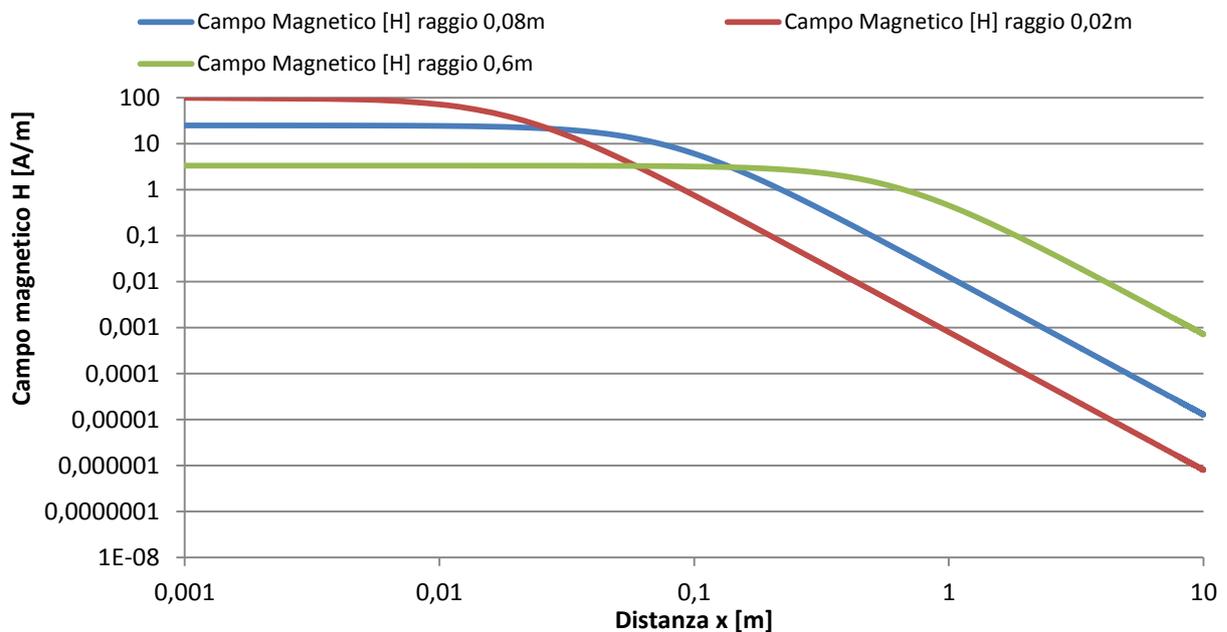


Fig. 5 Grafico del campo magnetico H per 3 solenoidi con raggi differenti.

Per introdurre una nuova variabile caratteristica dei solenoidi, si parte dal flusso totale di campo magnetico che scorre all'interno del solenoide: Ψ .

Quest'ultimo è dovuto alla corrente che circola nel solenoide ed è pari alla somma algebrica dei singoli flussi delle singole spire:

$$\Psi = \sum_N \Phi_N = N\Phi \quad (1.12)$$

ricordando che il flusso può essere scritto in funzione di B e quindi di H (formula 1.7 e 1.8) allora si può ottenere:

$$\Psi = N\Phi = NH\mu A \quad (1.13)$$

Dal flusso si definisce la nuova variabile che prende il nome di induttanza e si indica con L . Essa è il rapporto tra il flusso magnetico totale e la corrente che lo ha generato:

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (1.14)$$

Nel caso del singolo avvolgimento (vedi Fig. 6), effettuando le opportune sostituzioni si ottiene (con l lunghezza della spira $\gg R$):

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{H\mu A}{I} = \frac{H\mu\pi R^2}{I} = \frac{\mu\pi R^2}{l} \quad (1.15)$$

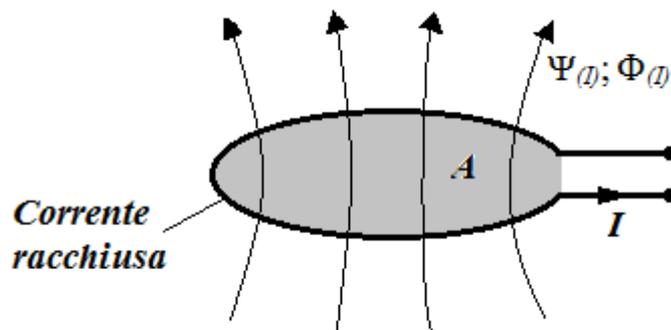


Fig. 6 Definizione di Induttanza L con il singolo avvolgimento

Quindi l'induttanza dipende solo dalla geometria del circuito e dal materiale in cui si genera il campo. Infine nel caso del solenoide con N avvolgimenti l'induttanza vale:

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{NH\mu A}{I} = \frac{\mu\pi N^2 R^2}{l} \quad (1.16)$$

1.3 Accoppiamenti induttivi

Si analizza ora il fenomeno fisico che si instaura quando un avvolgimento (o più in generale un circuito) percorso da corrente viene avvicinato ad un secondo avvolgimento e quest'ultimo sarà investito da parte del flusso magnetico generato dal primo; tale fenomeno prende il nome di “*accoppiamento induttivo*”.

Si prenda come esempio l'accoppiamento di Fig. 7, con l'avvolgimento 1 percorso dalla corrente I_1 . Tale corrente produce un flusso totale $\Psi_1 = N_1 \Phi_1$ la cui parte Φ_{11} si concatena esclusivamente con l'avvolgimento 1 e la parte rimanente Φ_{12} (*flusso di accoppiamento*) si concatena anche con l'avvolgimento 2. La concatenazione avviene in proporzione alle geometrie dei due avvolgimenti, alla loro posizione reciproca e al mezzo di conduzione del campo magnetico.

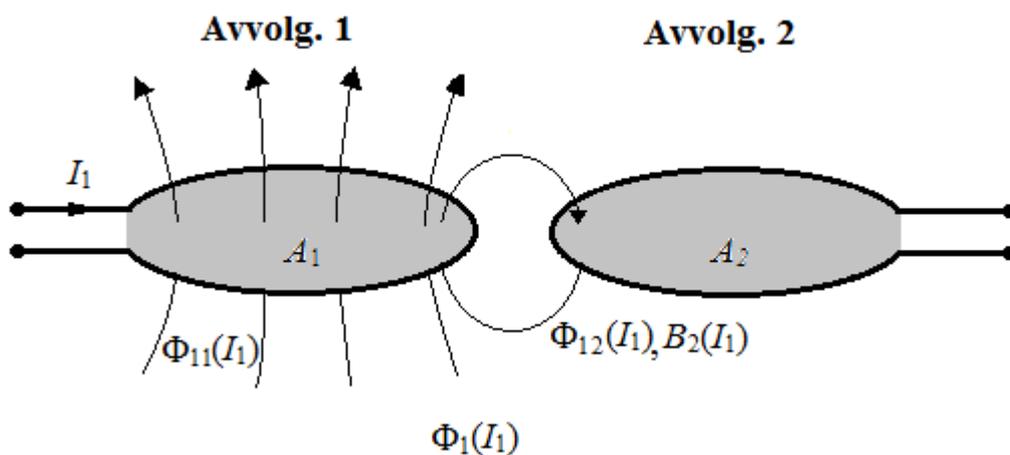


Fig. 7 Accoppiamento induttivo fra due avvolgimenti

Per valutare l'interazione fra i due avvolgimenti si definisce un coefficiente detto **mutua induttanza** (M) che mette in relazione il flusso concatenato con la corrente che lo ha generato.

Considerando ancora i due avvolgimenti circolari complanari di Fig. 7, la mutua induttanza M_{12} (si osservi l'ordine degli identificativi nel pedice che indicano: induttanza mutua riferita all'avvolgimento 2, dovuta all'avvolgimento 1) si definisce come:

$$M_{12} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{I_1} = \oint_{A_2} \frac{B_2(I_1)}{I_1} dA_2 \quad (1.17)$$

Risolvendo l'integrale e sostituendo B_2 con il campo magnetico H (formula 1.7) si ottiene:

$$M_{12} = \frac{B_2(I_1) \cdot N_2 \cdot A_2}{I_1} = \frac{\mu_0 \cdot H(I_1) \cdot N_2 \cdot A_2}{I_1} \quad (1.18)$$

Si evince che M_{12} ha la stessa unità di misura [henry] dell'induttanza L .

Nel caso che i due avvolgimenti siano sullo stesso asse x allora si può sostituire la 1.11 nella 1.18 si ottiene la dipendenza di M_{12} dalla distanza x (si è sostituito A_2 con $R_2^2 \pi$)

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2 \cdot \pi}{2\sqrt{(R_1^2 + x^2)^3}} \quad (1.19)$$

In questo modo si ottiene la formula che espleta la dipendenza della mutua induttanza dalla geometria dei due circuiti, dal mezzo di conduzione del campo magnetico e dalla distanza.

La stessa formula può essere usata analogamente nel caso in cui fosse l'avvolgimento 1 ad essere avvicinato all'avvolgimento 2 percorso da corrente I_2 . Più in generale si può dimostrare che il coefficiente di mutua induttanza è unico per ogni coppia di avvolgimenti (o più in generale circuiti):

$$M = M_{12} = M_{21} \quad (1.20)$$

La mutua induttanza è sempre presente fra due circuiti vicini percorsi da corrente e ne descrive quindi l'accoppiamento attraverso il campo magnetico.

Come anticipato, è appunto l'accoppiamento induttivo il principio fisico alla base della tecnologia RFID, che prevede la presenza di una “*antenna trasmittente*” (circuito 1) e una “*antenna ricevente*” (circuito 2) accoppiate fra loro da una relativa mutua induttanza.

Occorre quindi ora approfondire l'andamento della mutua induttanza al variare della distanza e delle caratteristiche delle antenne. Si prendono a tal fine, come esempio, i tre avvolgimenti già usati in precedenza che fungeranno da antenne riceventi, avvicinandoli singolarmente al medesimo solenoide con le seguenti caratteristiche:

- $R = 5 \text{ cm}$
- $N = 2$

che invece lavorerà come antenna trasmittente.

Gli avvolgimenti si considerano con assi coincidenti.

Dal grafico in Fig. 8 si evince che per brevi distanze alla configurazione con antenna ricevente di raggio più piccolo è associata una maggiore mutua induttanza che però al crescere della distanza risulta assumere prima valori inferiori.

L'andamento risulta analogo a quello visto per il campo magnetico nel grafico di Fig. 5.

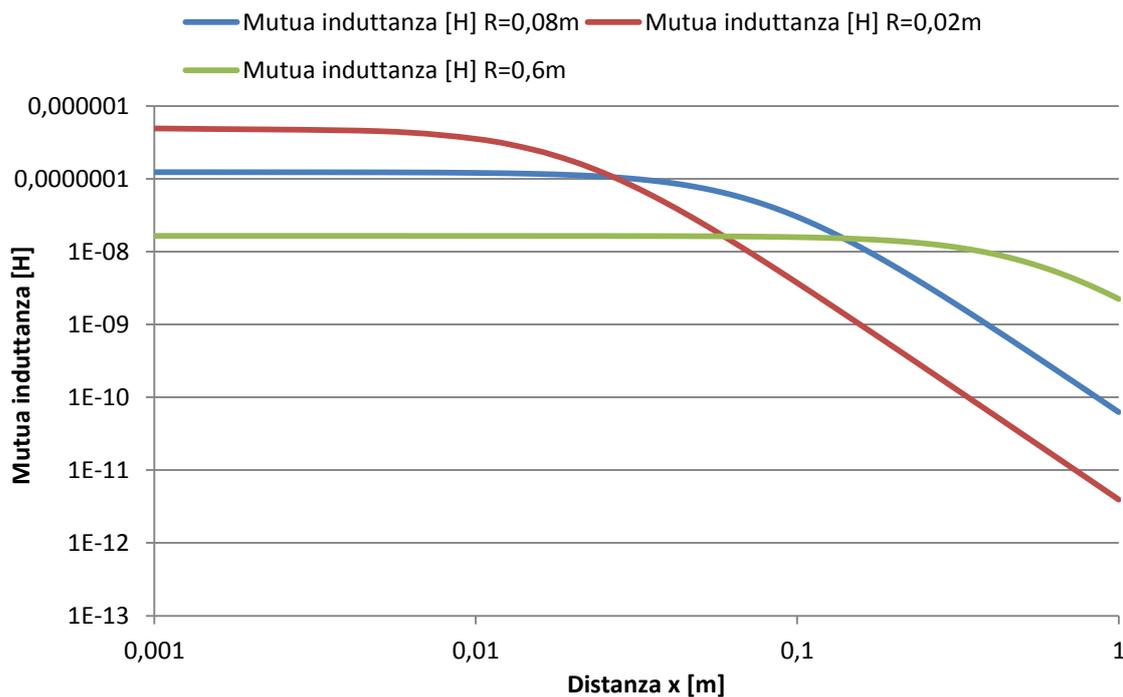


Fig. 8 Grafico dell'andamento di M al variare della distanza

1.4 Coefficiente di accoppiamento

Il coefficiente di mutua induttanza è identificabile come una descrizione *quantitativa* dell'accoppiamento di campo magnetico fra due avvolgimenti.

Parallelamente ad esso si definisce anche un coefficiente che permette una descrizione *qualitativa*, in termini di efficienza, dell'accoppiamento.

Questo coefficiente chiamato **fattore di accoppiamento** k è definito come rapporto fra la parte di flusso che investe mutuamente i due circuiti e il flusso totale iniziale. Si può dunque scrivere:

$$k = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_1} = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_1} \leq 1 \quad (1.21)$$

Per ricavare il legame con la mutua induttanza si moltiplicano M_{12} e M_{21} (vedi formula 1.17) ottenendo:

$$M^2 = \frac{N_2 \Phi_{12}}{I_1} \frac{N_1 \Phi_{21}}{I_2} = \frac{N_2 k \Phi_1}{I_1} \frac{N_1 k \Phi_2}{I_2} = k^2 \frac{N_2 \Phi_1}{I_1} \frac{N_1 \Phi_2}{I_2} = k^2 L_1 L_2 \quad (1.22)$$

$$M = \pm k \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (1.23)$$

- M è positivo quando il flusso induttore (Φ_1) e quello indotto (Φ_{21}) sono concordi
- M è negativo quando il flusso induttore (Φ_1) e quello indotto (Φ_{21}) sono discordi.

In generale si considerano concordi, quindi risulta essere:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (1.24)$$

Dalla formula si evince che k possa assumere solo valori compresi fra 0 e 1:

- $k = 0$ totale disaccoppiamento (eventualmente dovuto a grandi distanze o a schermatura magnetica),

- $k < 0,5$ si parla di basso accoppiamento,
- $k > 0,5$ si parla di accoppiamento stretto,
- $k = 1$ si dice accoppiamento perfetto.

Il caso auspicabile è ovviamente quello di $k = 1$, nel quale non si ha “spreco” di energia in porzioni di flusso non accoppiate, che si configura quando i due avvolgimenti sono attraversati dal medesimo flusso magnetico Φ .

Per ricavare la dipendenza di k dai soli parametri geometrici si sfrutta il modello teorico del trasformatore (vedi Fig. 9) ideale che, in “sintesi”, rappresenta i due avvolgimenti (antenne) di un sistema RFID.

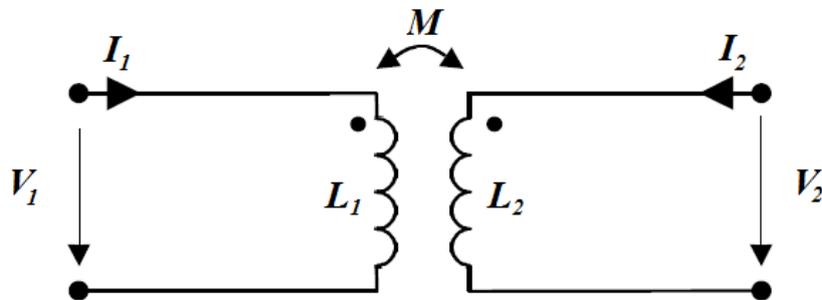


Fig. 9 Circuito teorico equivalente del trasformatore

Le formule risolutive del trasformatore sono:

$$\begin{cases} V_1 = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \\ V_2 = j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 \end{cases} \quad (1.25)$$

Per parametrizzare k si può utilizzare la “legge di Faraday” che permette di quantificare la tensione, ai capi dell’avvolgimento, indotta, dalle variazioni di flusso magnetico. Nel caso di un solenoide con N spire, la f.e.m. indotta è data da:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{dB}{dt} A \cos \theta \quad (1.26)$$

dove A è l’area investita dal flusso, il $\cos\theta$ è l’angolo di inclinazione dell’avvolgimento rispetto all’asse orizzontale e dB/dt è la variazione istantanea nel tempo del campo magnetico.

Combinando le formule 1.24,1.25 e 1.26, si ottiene:

per il caso $R_1 < R_2$:

$$k = \frac{R_1^2 R_2^2 \cos \theta}{\sqrt{R_1 R_2} \cdot (x^2 + R_2^2)^{3/2}} \quad (1.27)$$

dove R_1 è il raggio dell'antenna trasmittente e R_2 è il raggio dell'antenna ricevente (vedi Fig. 10).

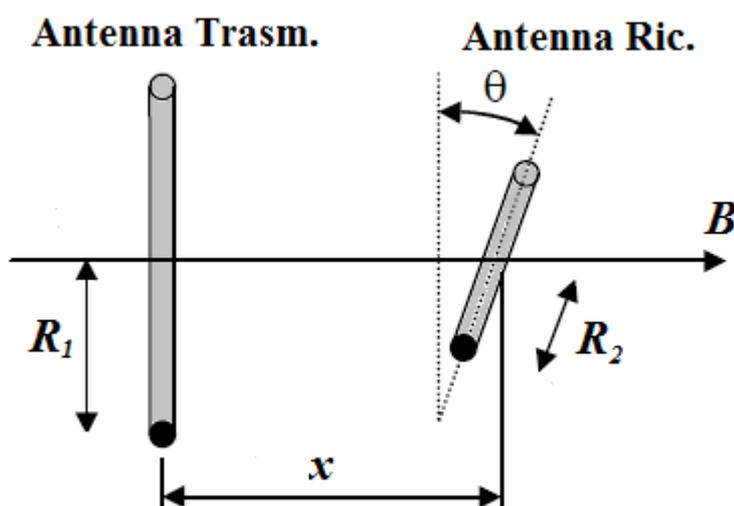


Fig. 10 Antenna trasmittente e antenna ricevente accoppiate

Per il caso $R_1 > R_2$ la formula risulta essere:

$$k = \frac{R_1^2 R_2^2 \cos \theta}{\sqrt{R_1 R_2} \cdot (x^2 + R_1^2)^{3/2}} \quad (1.28)$$

Per avere l'accoppiamento perfetto si dovrà quindi avere:

- $\cos \theta = 1$, antenna ricevente parallela a quella trasmittente
- $R_1 = R_2$, i due raggi devono essere uguali
- $x = 0$, la distanza fra le due antenne deve essere nulla.

Anche per il coefficiente di accoppiamento k è riportato in Fig. 11 il grafico della dipendenza da x . Nell'esempio sono stati utilizzati i seguenti valori: $R_1 = 4\text{cm}$ e $R_2 = 12\text{cm}$, $R_1 = 9\text{cm}$ e $R_2 = 2\text{cm}$, $\theta = 0$.

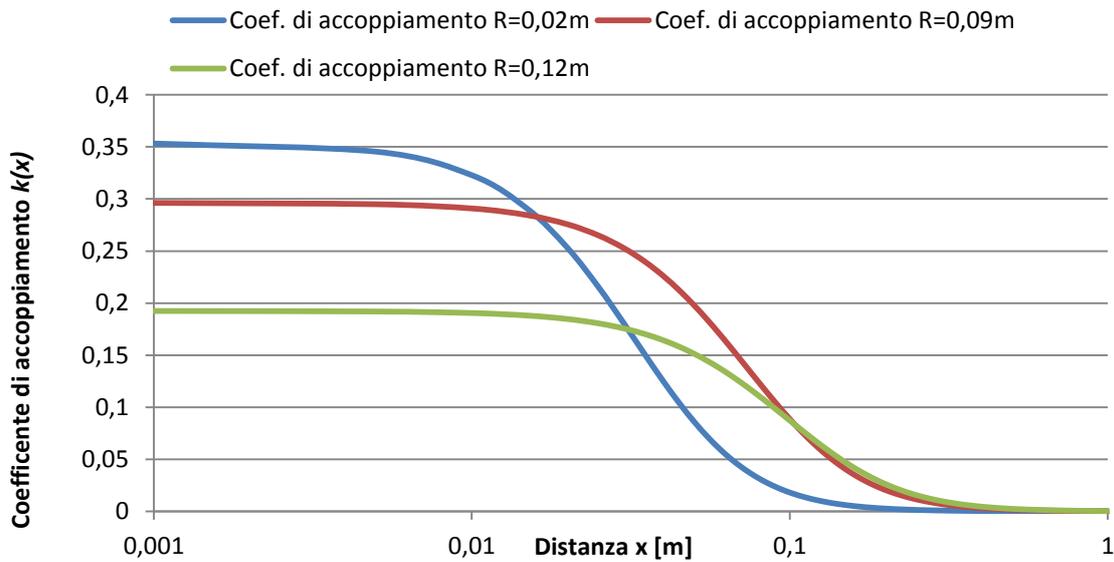


Fig. 11 Grafico dell'andamento di k al variare della distanza

Al crescere di x il coefficiente tende a diminuire in tutti e tre i casi, più velocemente nel caso in cui la differenza fra i raggi (R_1 e R_2) è minore. Più è alta la differenza fra i raggi più è basso il coefficiente.

1.5 Applicazione della legge di Faraday (induzione magnetica)

Nei sistemi RFID la legge dell'induzione viene sfruttata per la trasmissione dei dati, si vede ora come.

Si impone nel circuito di antenna trasmittente una corrente variabile $i_1(t)$ che a sua volta genera un campo magnetico variabile $\Phi(t)$. Parte del campo magnetico generato, indicata con Φ_{12} e dipendente dal coefficiente di mutua induttanza M , investe l'antenna ricevente dove, per la legge di Faraday, induce una differenza di potenziale $v_2(t)$ e una relativa corrente $i_2(t)$ che, in definitiva, sarà proporzionale alla variazione della $i_1(t)$ da cui trae origine.

Si intuisce che il risultato macroscopico ottenibile è una trasmissione dati, infatti ai capi dell'antenna ricevente si ottengono tutte le informazioni

necessarie e sufficienti per ricostruire le variazioni di corrente imposte su quella trasmittente.

Per analizzare questo sistema di trasmissione, si può strutturare un primo circuito equivalente di un sistema basilare composto da due avvolgimenti (antenne) accoppiati (Fig. 12):

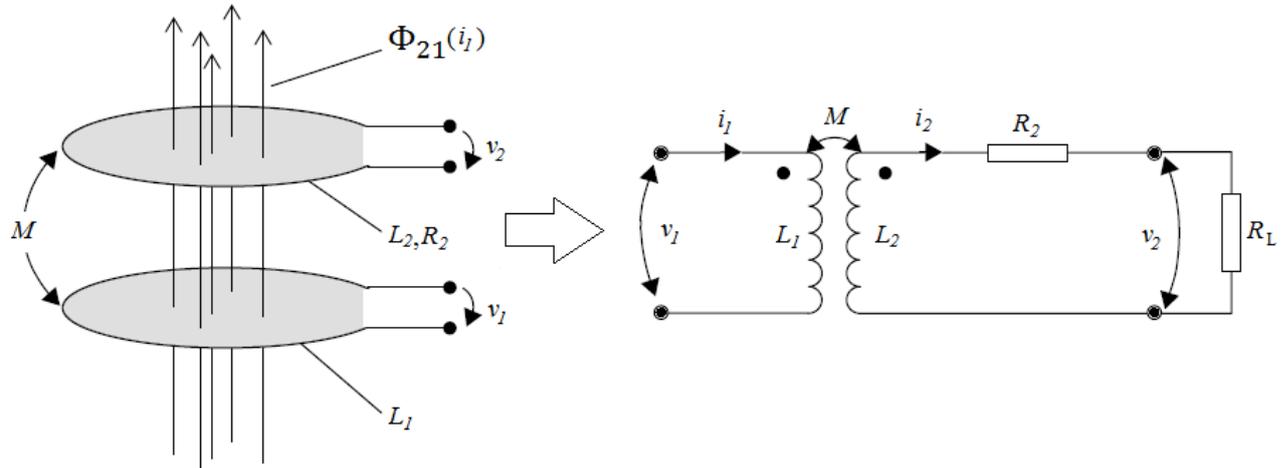


Fig. 12 Circuito equivalente di due avvolgimenti accoppiati

Sono stati aggiunti:

- R_2 , resistenza elettrica dell'avvolgimento 2,
- R_L impedenza che simula il carico, cioè il circuito che trasporta le variazioni di corrente nel formato desiderato.

La tensione $v_2(t)$ sul carico si può calcolare come:

$$v_2(t) = i_2(t) \cdot R_L \quad (1.29)$$

se si considera il flusso allora si può anche scrivere come:

$$v_2(t) = + \frac{d\Phi_2(t)}{dt} = M \frac{di_1(t)}{dt} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - i_2(t)R_2 \quad (1.30)$$

- Il primo termine rappresenta la componente di mutua induzione dovuta alla corrente che circola nell'avvolgimento 1;
- il secondo termine è invece la componente dovuta al fenomeno di autoinduzione sull'avvolgimento 2, legata alla corrente i_2 che genera un flusso magnetico Φ_{22} , si nota che è negativo perché si oppone a quello utile Φ_{12} ;

- il terzo termine infine rappresenta le perdite dovute alla resistenza non nulla del conduttore che compone l'avvolgimento 2.

Si fa l'ipotesi di correnti i_1 e i_2 sinusoidali la formula 1.30 può essere vista anche nella sua forma complessa:

$$v_2 = j\omega M \cdot i_1 - j\omega L_2 i_2 - i_2 R_2 \quad (1.31)$$

La tensione v_2 è il dato cruciale perché rappresenta l'informazione trasmessa al circuito di carico (nella pratica tipicamente un microchip), il sistema nel suo complesso deve quindi essere configurato e dimensionato in modo tale da permetterne la corretta lettura del chip al lato ricevente.

1.6 Circuito risonante

Per migliorare le prestazioni del circuito minimale di Fig. 12, si può inserire una capacità (C_2) in parallelo al carico (R_L) ottenendo così un circuito risonante parallelo (RLC), con frequenza di risonanza ($f_0 = \omega/2\pi$). A detta frequenza il circuito si comporta come la sola componente resistiva poiché la reattanza capacitiva e quella induttiva si annullano divenendo uguali in modulo ma di segno opposto. Si intuisce perciò che la frequenza di risonanza permette il massimo trasferimento di potenza ed è quindi quella di migliore operatività per il sistema RFID.

Per introdurre la miglioria del circuito sarà quindi necessario avere una formulazione precisa di questa frequenza che dovrà essere quella di lavoro.

In un generico circuito RLC parallelo, per ricavare la formula della frequenza di risonanza si parte dall'ammettenza di circuito:

$$Y = \frac{1}{R} - j \frac{1}{\omega L} + j\omega C \quad (1.32)$$

la cui parte reattiva (parte immaginaria) si annulla alla pulsazione ω_0 :

$$\omega C - \frac{1}{\omega L} = 0 \rightarrow \omega C = \frac{1}{\omega L} \rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.33)$$

di conseguenza la frequenza di risonanza f_0 [Hz] è:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \rightarrow f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.34)$$

Inserendo la modifica il circuito equivalente, partendo da quello in Fig. 12, si presenta come in Fig. 13.

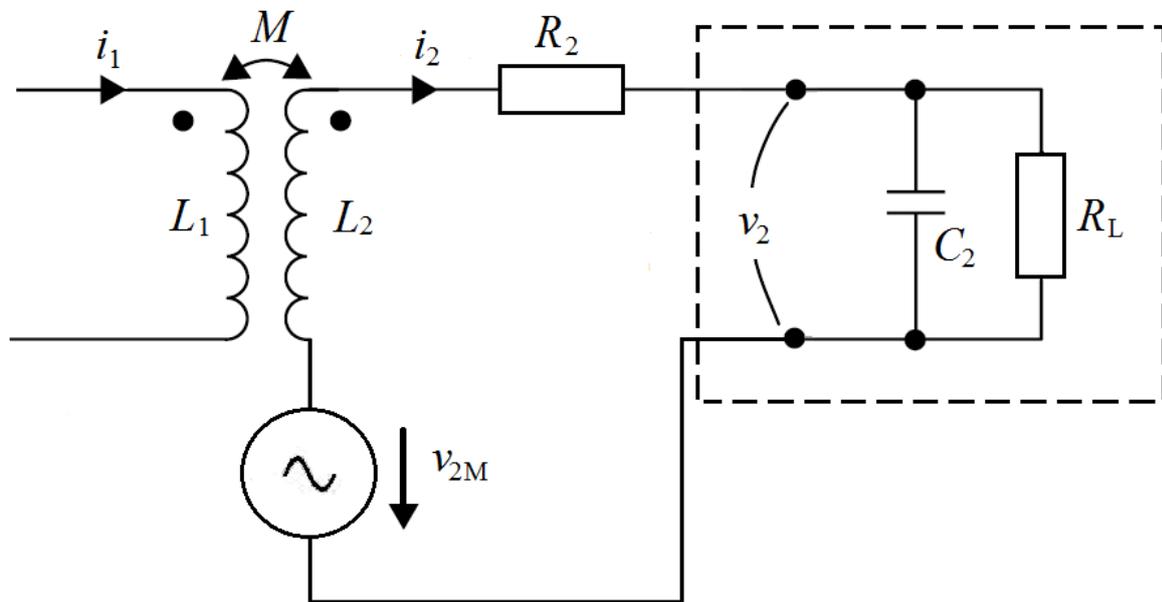


Fig. 13 Circuito equivalente con l'aggiunta di C_2 per creare il risonatore

Il generatore di tensione v_{2M} rappresenta la componente f.e.m. di mutua induzione.

Per ricavare la formula della tensione v_2 sul carico si procede come segue:

- essendo L_2 e R_2 in serie l'impedenza equivalente Z_2 risulta:

$$Z_2 = j\omega L_2 + R_2 \quad (1.35)$$

- essendo C_2 in parallelo con R_L l'impedenza equivalente Z_L risulta:

$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{R_L} + j\omega C_2 \rightarrow \frac{1}{Z_L} = \frac{1 + j\omega C_2 R_L}{R_L} \quad (1.36)$$

$$Z_L = \frac{R_L}{(1 + j\omega R_L C_2)} \quad (1.37)$$

Il circuito semplificato appare come in Fig. 14:

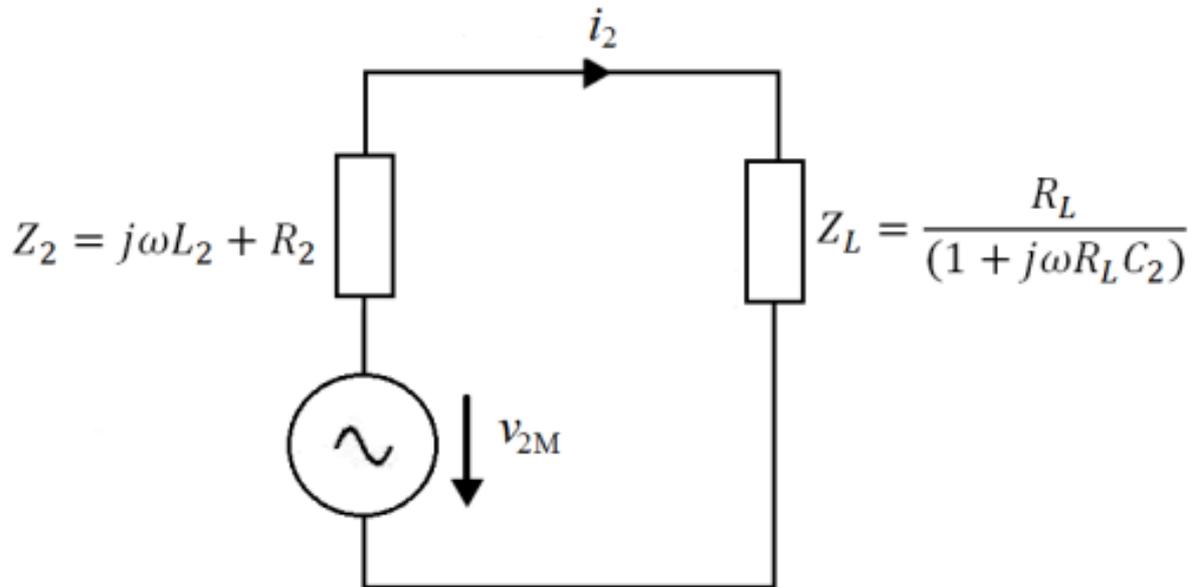


Fig. 14 Circuito equivalente risolutivo con le impedenze Z_2 e Z_L

- si calcola i_2 con la legge di ohm (Z_2 e Z_L sono in serie):

$$i_2 = \frac{v_{2M}}{(Z_2 + Z_L)} \quad (1.38)$$

- e di conseguenza la v_2 (tensione ai capi del carico) vale:

$$v_2 = i_2 Z_L = \frac{v_{2M}}{(Z_L + Z_2)} \cdot Z_L = \frac{v_{2M}}{(1 + Z_2/Z_L)} \quad (1.39)$$

- sostituendo le impedenze si ottiene:

$$v_2 = \frac{v_{2M}}{1 + (j\omega L_2 + R_2) \cdot \left(\frac{1}{R_L} + j\omega C_2\right)} \quad (1.40)$$

La v_{2M} dipende direttamente dalla corrente che percorre l'avvolgimento 1 secondo la formula:

$$v_{2M} = j\omega M \cdot i_1 \quad (1.41)$$

e utilizzando la (1.23) si può anche scrivere:

$$v_{2M} = j\omega k \sqrt{L_1 \cdot L_2} \cdot i_1 \quad (1.42)$$

quindi la relazione fra la corrente in ingresso i_1 (dovuta al flusso Φ_1) e la tensione di uscita v_2 è:

$$v_2 = \frac{j\omega k \sqrt{L_1 \cdot L_2} \cdot i_1}{1 + (j\omega L_2 + R_2) \cdot \left(\frac{1}{R_L} + j\omega C_2\right)} \quad (1.43)$$

Vale la pena di valutare l'andamento della tensione di uscita al variare della frequenza con un grafico del modulo. Ricordando che la formula del modulo di un numero complesso è:

$$z = a + jb \quad |z| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1.44)$$

allora dalla 1.43:

$$|v_2| = \frac{\omega k \sqrt{L_1 \cdot L_2} \cdot i_1}{\sqrt{\left(\frac{\omega L_2}{R_L} + \omega R_2 C_2\right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_2 C_2 + \frac{R_2}{R_L}\right)^2}} \quad (1.45)$$

Per realizzare il grafico in Fig. 15 è stato scelto l'intervallo di frequenze da 1 MHz a 100MHz e i seguenti valori d'esempio per le componenti:

- $k = 0,05$
- $f_0 = 13,56$ MHz
- $R_2 = 1 \Omega$

- $R_L = 2000 \Omega$
- $L_1 = 2 \mu\text{H}$
- $L_2 = 1 \mu\text{H}$
- $C_2 = [(f_0 \cdot 2\pi)^2 \cdot L_2]^{-1} = 138 \text{ pF}$
- $i_1 = 0,5 \text{ A}$

tali valori si considerano costanti sull'intero intervallo di frequenze.

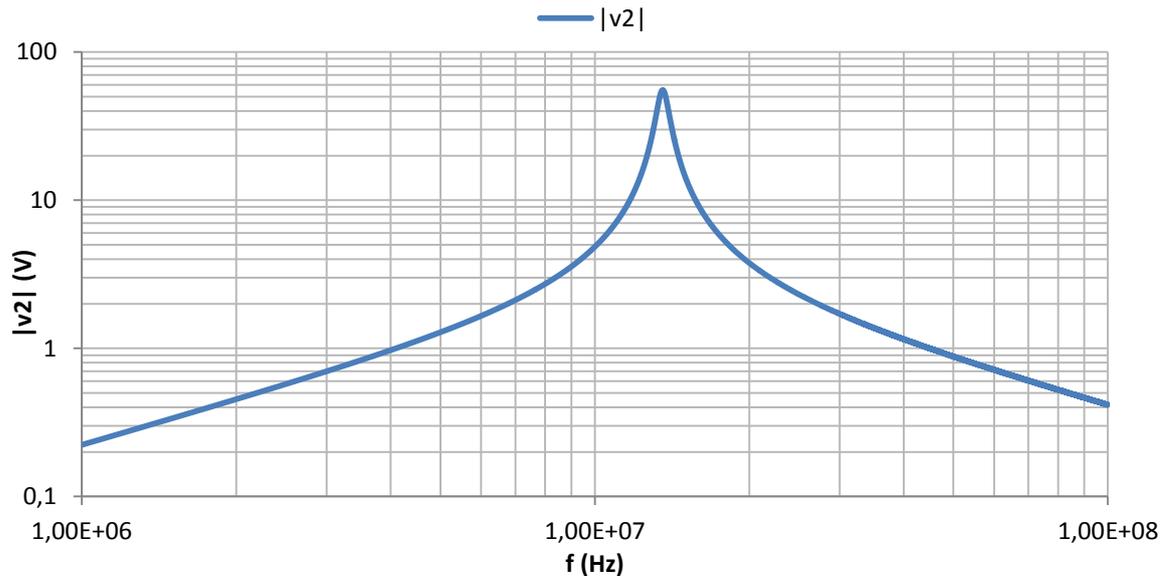


Fig. 15 Grafico dell'andamento del modulo di v_2 in funzione della frequenza

Come atteso, il grafico si presenta con una cuspide alla frequenza di risonanza f_0 .

A tale frequenza il circuito “risuona”, in una condizione di scambio perfettamente bilanciato delle energie immagazzinate fra i componenti capacitivi e induttivi senza richiederne all'esterno, permettendo così di avere la maggiore efficienza nel trasferimento di energia ovvero la massima tensione possibile sul carico.

Occorre dunque dimensionare debitamente il condensatore C_2 da inserire in modo che, stabilita la frequenza di lavoro del sistema di trasmissione RFID, quest'ultima coincida con quella di risonanza.

Capitolo 2: I sistemi RFID

2.1 Cenni storici

La RFID (Radio Frequency IDentification) è una tecnologia che, come suggerisce l'acronimo, sfrutta le onde radio per riconoscere la presenza o meno di un oggetto a distanza semplicemente mettendo in comunicazione la parte ricevente con la parte trasmittente.

Come buona parte delle tecnologie odierne, anche l'RFID, trae origine da ricerche in campo militare, il primo prototipo risale infatti alla seconda guerra mondiale.

Si tratta dell'IFF (Identification Friend or Foe), sviluppato ed utilizzato dalle forze alleate per il riconoscimento "alleato-nemico" dei mezzi militari, in particolare aerei e navi.

Era un sistema composto da un radar installato a terra o a bordo di un veicolo (vedi Fig. 16 - A) e, per controparte, da apparati posizionati a bordo dei velivoli o delle navi. Grazie all'emissione ("chiamata") e ricezione di particolari impulsi elettromagnetici, il radar era in grado di rilevare, entro una certa distanza, la risposta o meno da parte del dispositivo di identificazione a bordo dei mezzi, consentendo così, con un certo margine di sicurezza, di verificarne la natura rispettivamente di alleato o nemico.

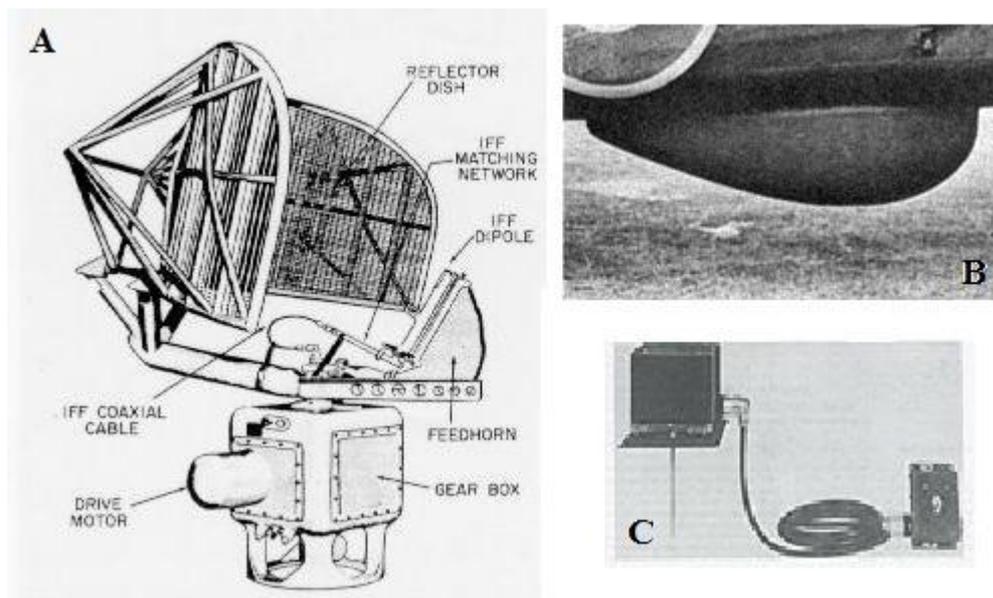


Fig. 16 A) Radar IFF a terra B) Radar home di un aereo in cui era contenuto l'apparato IFF
C) Apparato IFF, Model XAE ideato dagli americani e installato a bordo dei velivoli

Successivamente, nel 1940, fu introdotto da Watson-Watt un sistema più evoluto: l'MK III, un sistema IFF con un'architettura diversa che gettò le basi degli attuali "transponder" (un ricetrasmittitore che invia un segnale in risposta ad una interrogazione da parte di una stazione di rilevamento).

L'innovazione consisteva nell'apporre il sistema IFF sull'antenna rotante del radar per poter ricevere la risposta dagli obiettivi con maggior precisione e determinarne velocità e distanza; tale sistema fu denominato "interrogatore-risponditore".

I vantaggi portati da questa miglioria erano: maggior precisione con cui si riconoscevano i mezzi alleati, operatività su più bande di frequenza per permettere il riconoscimento in svariati scenari sia di navi che aerei e sviluppo di decodifiche dei segnali trasmessi che rendevano la comunicazione più sicura.

Dopo la fine del conflitto bellico, su queste tecnologie venne scritto un primo articolo scientifico intitolato "*Communication by Means of Reflected Power*" (di Harry Stockman, 1948) che ne prevedeva, seppure ancora si trattasse di tecnologie con dimensioni e costi troppo elevati per poter trovare applicazioni in campo civile, un potenziale sviluppo futuro purché fossero progettati e realizzati componenti adeguati e definite teorie concrete sulle reti di inter-comunicazione.

In effetti, nel successivo ventennio non si ebbero concreti sviluppi della tecnologia RFID che finì in ombra, ma nel campo della componentistica elettronica nacquero transistor e circuiti integrati (Clair Kilby, 1958) che permisero di miniaturizzare i componenti del sistema e rendere via via più economica la realizzazione.

Nascono a fine anni '60 gli EAS (*Electronic Article Surveillance*), i sistemi, diffusamente utilizzati tutt'oggi, che prevedono l'applicazione di "tag" (letteralmente "etichette", piccoli transponder) sugli articoli in vendita per la prevenzione delle azioni di taccheggio. All'uscita dei negozi il "gate" di rilevamento (vedi Fig. 17) attiva un allarme, tipicamente sonoro, se rivela tag attivi, non disattivati o rimossi dai commessi al momento dell'acquisto dell'articolo.

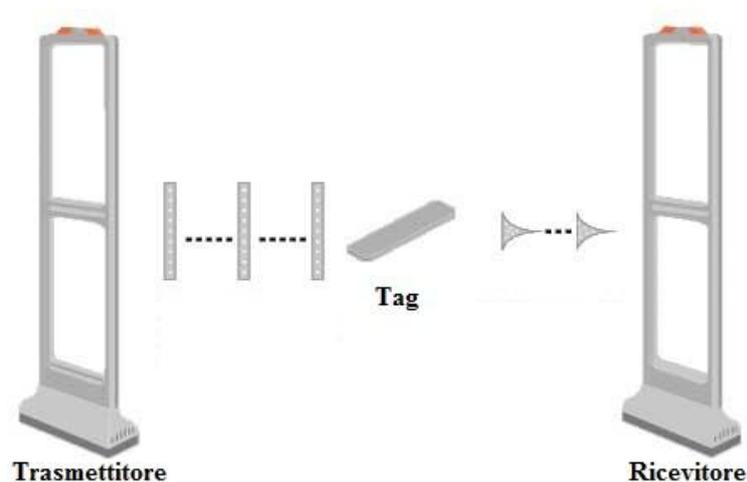


Fig. 17 Sistema EAS che rileva la presenza di tag attivi

Questa applicazione poneva le basi dell'odierna RFID in campo civile, prevedeva infatti la presenza dei componenti canonici: l'elemento tag e un transponder che gestisce una notifica di presenza/assenza (codifica con 1 unico bit).

Negli anni '70 i centri scientifici e le aziende del settore investirono molto sullo sviluppo della tecnologia RFID e dei suoi componenti, vennero messe a punto le prime applicazioni nel settore del lavoro, dei trasporti e dell'allevamento.

La tecnologia non era ancora però abbastanza "matura" da renderne opportuna una standardizzazione internazionale che avrebbe potuto

rallentare o inibire sul nascere tutte le potenziali idee e innovazioni di anno in anno sviluppate e prodotte.

Il primo predecessore della moderna RFID fu brevettato da Mario Cardullo nel 1973 e prevedeva un transponder di tipo passivo dotato di memoria a 16 bit.

Negli anni '80 vennero creati i primi sistemi di lettura/scrittura con microprocessori e batterie, che portarono un'affermazione dell'RFID su scala mondiale per la sua versatilità e funzionalità.

In Europa vennero sviluppate soprattutto applicazioni per l'identificazione del bestiame, per le attività industriali e per il controllo di accesso alle autostrade mentre negli USA trovò prevalentemente impiego nel controllo delle merci, dei mezzi di trasporto e dell'accesso del personale negli ambienti di lavoro.

Il primo modello con la sigla odierna di RFID nel nome e fu brevettato da Charles Walton nel 1983.

Infine, negli anni '90, sovvennero le condizioni di evoluzione tecnologica tali da portare all'RFID attuale.

In particolare, l'ulteriore miniaturizzazione e ottimizzazione dei componenti elettronici raggiunta (vedi Fig. 18) permise una sensibile riduzione dell'energia necessaria al funzionamento dei transponder consentendo di prescindere dalla necessità di una batteria interna per il funzionamento, sfruttando anche per l'alimentazione l'energia dell'onda elettromagnetica di comunicazione emessa dall'interrogatore.

Inoltre le memorie volatili RAM (*Random Access Memory*), utilizzate fino a quel momento, furono sostituite con memorie non volatili di tipo EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) evitando così di dover consumare ulteriore energia per il mantenimento in memoria dei dati.



Fig. 18 Inserimento di un transponder tramite siringa, per l'identificazione di un cavallo.
Sulla destra le dimensioni del transponder (11-12 mm).

Nel corso nuovo millennio i costi di realizzazione dei transponder si sono abbassati drasticamente (fino a 5 centesimi di euro) e le dimensioni si sono a tal punto ridotte che un singolo elemento può essere stampato su fogli piccoli e sottilissimi chiamati *smart label* (vedi Fig. 19).

La tecnologia RFID vive ad oggi probabilmente la fase di più elevata espansione commerciale ed applicativa trovando impiego in molteplici e disparati settori della società. Questa diffusione da un lato porta ad un abbattimento dei costi di acquisizione della tecnologia e dall'altro ne sprona l'evoluzione, ponendo le basi di un futuro sistema di interconnessione globale che permetta l'identificazione e la distribuzione di informazioni riguardanti tutti gli elementi sui quali potenzialmente può essere applicato un transponder. Un sistema chiamato: *Internet alle cose*.



Fig. 19 Circuito di un transponder stampato su foglio di plastica: smart label.

2.2 Composizione dei sistemi RFID

Di seguito si analizzano gli elementi che costituiscono un tipico sistema RFID.

Vale la pena sottolineare che, come anticipato nel paragrafo precedente, è il transponder (o tag) l'elemento cruciale perché è quello che viene applicato agli oggetti da tracciare e deve dunque assumere caratteristiche specifiche in base all'ambito o condizione di utilizzo.

TAG

Transponder a radiofrequenza di piccole dimensioni (vedi Fig. 20 e Fig. 21) composto da almeno:

- chip dotato di memoria che ha il compito di gestire la parte di comunicazione e identificazione;
- antenna adibita alla comunicazione con il “reader” e all'alimentazione del chip (se sprovvisto di batteria);
- supporto, ovvero il materiale/oggetto su cui sono montati chip e antenna. Può essere delle più svariate tecnologie (chiavi, Smart Card, etichette adesive, banconote, biglietti, ecc.).

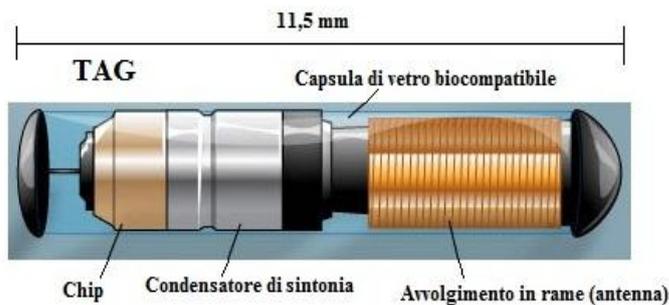


Fig. 20 TAG in tubo di vetro utilizzato, tipicamente, nelle chiavi delle auto

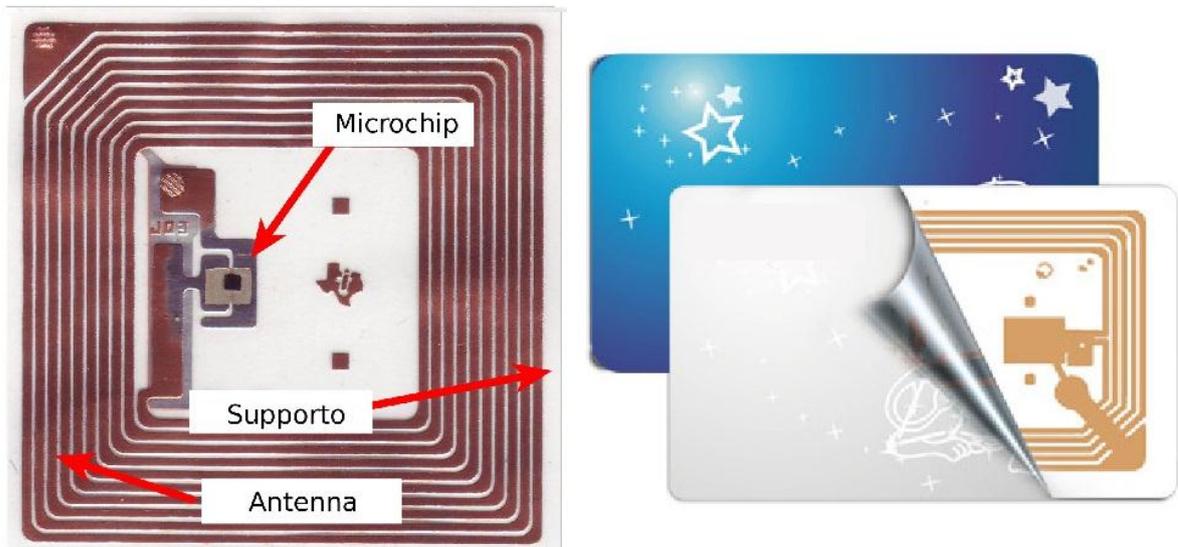


Fig. 21 TAG su etichetta utilizzato, tipicamente, nelle Smart Card

READER

Antenna ricetrasmittente (vedi Fig. 22) che realizza l'interfaccia fisica fra il *sistema di gestione* (o unità di controllo) e il Tag.

Genera il campo magnetico all'interno del quale i tag vengono individuati ed interrogati e ne rileva la risposta.

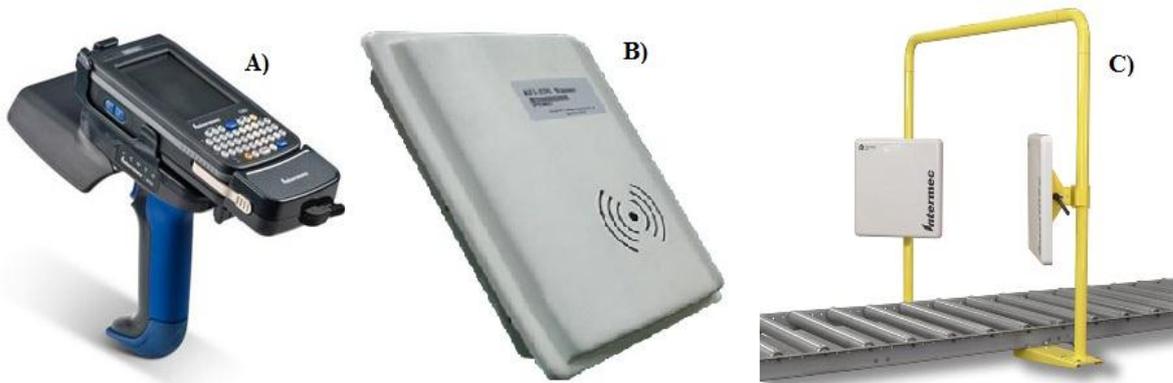


Fig. 22 A) Reader "a mano" B) Reader per Smart Card C) Reader per nastro trasportatore

SISTEMA DI GESTIONE

Calcolatore connesso, tipicamente via rete, al reader che consente di elaborare le informazioni associate al rilevamento dei TAG secondo lo scopo applicativo preposto.

Solitamente gestisce dati provenienti da più reader, anche eterogenei, risolve le collisioni fra i messaggi in arrivo e ne definisce il significato logico in base alla mappatura nota della posizione fisica dei reader stessi (ad es. “attraversamento del gate posizionato in uscita → abbandono del locale”).

A completamento delle informazioni derivate dalle interfacce RFID vengono spesso rilevati dati ambientali provenienti da altre fonti (es. sensori di temperatura, ecc.).

Le informazioni elaborate vengono poi inoltrate ai sistemi informativi relativi al contesto di installazione.

Per talune applicazioni reader e sistema di gestione possono essere accorpati nello stesso apparato.

Si possono osservare in Fig. 23 alcuni esempi esemplificativi di sistemi RFID completi.



Fig. 23 Esempi di sistemi RFID

2.3 Classificazione dei TAG

Sia i reader che i tag vengono progettati in base all'ambito in cui verranno impiegati ma, mentre i primi subiscono poche variazioni strutturali (tipicamente limitate alle specifiche d'antenna) i tag vengono sviluppati tenendo conto di una molteplicità di parametri: distanza di lettura, sicurezza di decodifica, memorizzazione dei dati, ambiente esterno, ecc..

In particolare i tag si possono classificare in base ai criteri di seguito riportati.

Sorgente di energia

- **Passivi**, non hanno al loro interno una batteria e rimangono quindi inattivi fino a quando non entrano nel campo prodotto da un reader da cui trarre l'energia per attivarsi ed inviare quindi i dati in memoria. Sono i più diffusi per la loro economicità ma hanno il limite della distanza che varia da pochi centimetri a qualche metro a seconda della frequenza.
- **Attivi**, vengono alimentati da batterie interne e sono dei veri e propri ricevitori-trasmittitori che possono inviare segnali anche se non interrogati e fino a grandi distanze (dell'ordine del chilometro). Sono dotati di grandi quantità di memoria e possono contenere dei sensori ambientali, assumono evidentemente un costo molto più elevato.
- **Semi-passivi o Battery-Assisted Passive (BAP)**, il transponder si comporta come nel caso dei tag passivi ma sono comunque dotati di una batteria che alimenta gli altri componenti (memoria, microchip ed eventuali apparati accessori). Sono degli ibridi che permettono di ottenere prestazioni intermedie fra quelle viste nei precedenti due tecnologie, con buone capacità di memoria, distanze di lettura dell'ordine di decine di metri e costi contenuti.

In Fig. 24 si possono notare i tre tipi di tag.

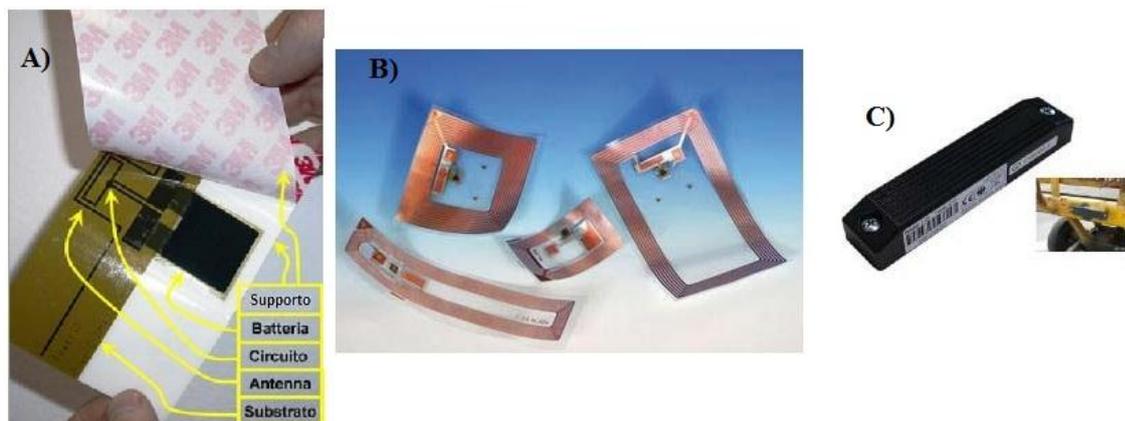


Fig. 24 A) Tag semi-passivo stampato su etichetta dotato una batteria estremamente sottile. B) Tag passivi sprovvisi di batteria. C) Tag attivo con batteria e relativo utilizzo su un carrello da trasporto.

Tipo di memoria

- **Tag a bit unico** (vedi Fig. 25), sono i più semplici e conseguentemente anche i meno costosi. Sono solitamente in materiale magnetico che rappresenta tramite il proprio stato, magnetizzato o meno, l'unico bit di memoria a cui associare la condizione "attivato" o "disattivato". Vengono tipicamente utilizzati nei sistemi antitaccheggio (EAS). Come noto nel caso in cui non vengano smagnetizzati o rimossi dai commessi al momento dell'acquisto risultano "attivi" al passaggio vicino al reader in uscita e fanno scattare l'allarme.



Fig. 25 Esempio di tag a bit unico

- **Read only**, sono più costosi perché dotati di una memoria ROM (*Read Only Memory*) che viene programmata al momento della loro creazione e contiene le informazioni sul prodotto. Come suggerisce il nome però, tale memoria potrà essere solamente letta e mai più modificata, a necessità dovrà essere sostituita. Come variante alla memoria ROM, da predestinare al momento della produzione, può

essere impiegata la versione, più costosa, *WORM (Write Once Read Many)* originariamente vuota e poi scrivibile una sola volta dall'utilizzatore secondo esigenza.

- **Read and Write**, contengono una memoria che può essere riscritta a piacimento. Possono essere *RAM (Random Access Memory)*, memorie con grande capacità di memorizzazione, basso costo ma che necessitano di una fonte di energia (batteria) per mantenere i dati in memoria. Oppure possono essere *EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)*, memorie che non necessitano di alimentazione, possono mantenere i dati per 10 anni e resistono a centinaia di migliaia di cicli di programmazione; ma sono più costose e hanno una capacità di memorizzazione inferiore.

Nel caso dei *Read and Write* si deve tenere conto di diversi fattori di controllo, per evitare perdite di dati o scritture errate. I tag di questo tipo hanno dunque strutture più complesse e debbono essere dotati di:

- un *circuito di ricezione* per identificare i dati provenienti dal reader che debbono essere scritti in memoria;
- di un *codice unico (UIId)* per far in modo che i dati di scrittura vengano scritti sul tag giusto evitando i problemi di collisione fra i segnali;
- una codifica (ad esempio Manchester) di *sincronizzazione fra clock* del tag e del reader;
- un circuito di *modulazione/demodulazione* per trasmettere e ricevere correttamente le informazioni.

Principio fisico utilizzato per la comunicazione:

- **Magnetici**, sono tag che sfruttano l'accoppiamento magnetico (principio dei trasformatori) per trasferire e ricevere energia e dati dal reader. Hanno il vantaggio di poter essere applicati ad una gamma estesa di oggetti grazie alla capacità del campo magnetico di attraversare facilmente tutti i materiali ad eccezione di quelli magnetici o altamente conduttivi. Hanno lo svantaggio di funzionare solo con l'antenna sullo stesso asse di quella del reader e possono essere influenzati da altri campi magnetici nelle vicinanze.

Nel caso di tag passivi la distanza di operatività dell'antenna del lettore può andare tipicamente da 1 cm ad 1m, oltre questa portata il campo magnetico si riduce notevolmente, in ragione di $1/distanza^3$. Va considerato anche che l'eventuale scrittura su memoria necessita di più energia (per il chip) della sola lettura, quindi la distanza ammessa in si riduce ulteriormente del 30-50%.

- **Elettromagnetici**, sono tag che sfruttano l'accoppiamento elettromagnetico (come nei tradizionali sistemi di radiocomunicazione). Non necessitano di un determinato orientamento rispetto al reader e hanno un range di operatività da 1m a 10m che può essere però aumentato fino all'ordine dei chilometri utilizzando batterie incorporate nei tag. Sono fortemente influenzati da altri segnali radio aventi la stessa frequenza operativa e limitati da materiali impenetrabili dalle onde radio. La quantità di energia captata (e di conseguenza la distanza di lettura) dipende dal diagramma di radiazione dell'antenna del tag e dalla densità di potenza del campo irradiato dal reader. In particolare, il diagramma di radiazione dell'antenna è correlato con le dimensioni dell'antenna e con la lunghezza d'onda del segnale ($\lambda = v_{luce}/f$). Ad esempio, se si considera la frequenza di 900MHz la lunghezza d'onda è circa 33cm e l'antenna può essere a mezz'onda (16,5cm) o ad un quarto di onda (8,3cm).

Chip

- **Senza chip**, sono tag destinati alla sola identificazione di prodotti su larga scala che necessitano solamente di un codice fisso, che può variare da 24 a 96 bit.
- *Con chip*, sono tag contenenti un chip che gestisce un elevato numero di bit di codice e possiede una logica di controllo per gestire la protezione dell'informazione attraverso funzioni di sicurezza.

2.4 Bande di operatività

Le bande di frequenza utilizzate nei sistemi RFID dipendono sia dal tipo di tag che dall'ambito di applicazione.

L'utilizzo delle frequenze è regolamentato da leggi emanate dagli organismi istituzionali preposti in base alle indicazioni date dalle commissioni tecniche competenti in materia (in Italia l'Istituto Superiore delle Telecomunicazioni) al fine di evitare interferenze e mantenere controllate le emissioni di potenza. Tuttavia attualmente le bande riservate ai sistemi RFID ancora si differenziano da paese a paese e questo comporta una non compatibilità dei rispettivi sistemi.

Negli ultimi anni però gli organismi internazionali stanno cercando di stabilire degli standard per rendere globale l'utilizzo di un singolo sistema RFID.

Tipicamente le bande dedicate sono tre:

- Nella gamma delle **LF** (*Low Frequency, 30-300kHz*) si sfrutta la sotto-banda da 120 a 135 kHz; queste sono, temporalmente, le prime frequenze utilizzate per l'identificazione e tutt'ora i tag che utilizzano queste frequenze costituiscono una cospicua fetta di mercato sia per il loro costo relativamente basso che per la poca influenza che subiscono a contatto con dai tessuti organici. Hanno velocità trasmissione dati fra i 200 e i 1000 bit al secondo e distanze di operatività a corto raggio. Vedi Fig. 26.



Fig. 26 Esempi di tag a 125 KHz o 134,2 KHz. A sinistra un tag avvolto da un contenitore ceramico che viene fatto ingoiare ai bovini e rimane all'interno di un loro stomaco. A destra un tag avvolto da plastica chirurgica iniettabile in prodotti alimentari.

- Nella gamma delle **HF** (*High Frequency*, 3-30MHz) si sfrutta la sotto-banda da 3 a 15 MHz; fra queste va menzionata quella centrata su 13,56 MHz che è l'unica mondialmente riconosciuta e condivisa da tutti i paesi ed è conseguentemente la più diffusa. I tag che sfruttano i 13,56MHz come frequenza di operatività sono generalmente di tipo passivo con distanze di lettura dai 2 ai 90 centimetri, capacità di memoria da pochi kbyte a 1 Mbyte e offrono algoritmi crittografici per scambi di informazioni in sicurezza. Vedi Fig. 27.

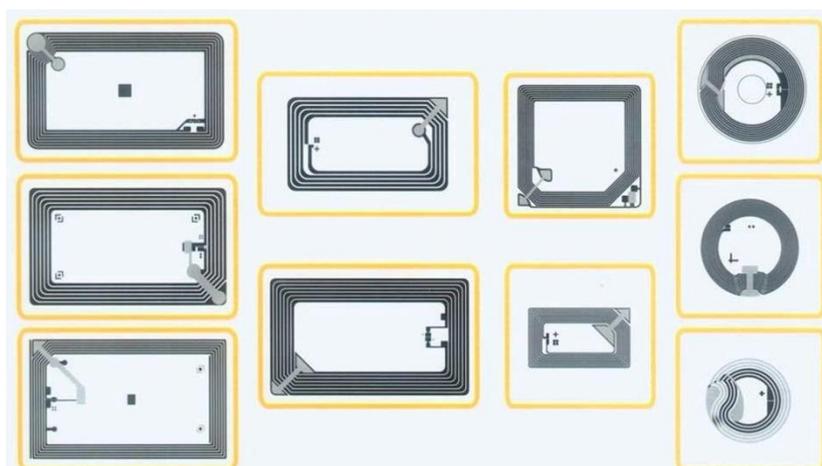


Fig. 27 I tag ad HF vengono prodotti in forme diverse a seconda della loro più svariate applicazioni.

- Nella gamma delle **UHF** (*Ultra High Frequency, 300MHz – 3GHz*) si sfrutta la sotto banda da 850 a 950MHz e quella da 2 a 3 GHz. Su queste frequenze vengono utilizzati tag elettromagnetici e si possono avere distanze di lettura e scrittura anche molto grandi con velocità elevate. Risentono delle interferenze esterne (problemi di riflessione delle onde) e delle condizioni atmosferiche (presenza di liquidi che assorbono le onde). Per queste bande risulta particolarmente difficile la standardizzazione a livello mondiale perché concomitanti con frequenze già occupate dalla telefonia e quindi immutabili. Vedi Fig. 28.



Fig. 28 Esempio di tag operante UHF.

2.5 Standard ISO ed EPC e applicazioni

Sebbene, come già sottolineato più volte, gli impieghi dei sistemi RFID possano essere i più svariati, sono stati preposti organismi adibiti alla definizione degli standard tipologici le cui specifiche vengono costantemente aggiornate.

I criteri di individuazione dei vari standard sono i tipi di tag e la loro frequenza di operatività.

Gli standard vengono elaborati sia dalla *EPCglobal nato*, che opera come associazione privata, sia dalla ISO (*International Organization for Standardization*) che è l'ente mondiale di riferimento per gli standard in quasi tutti i campi della tecnologia.

La EPCglobal definisce standard per i tag destinati alla gestione di oggetti e alla logistica in base a classi:

- Classe 0 – Generation 1, tag passivi a banda 900 MHz con memoria read-only scritta al momento della creazione. Sono compresi anche i

tag a bit unico utilizzati nei sistemi EAS (*Electronic Article Surveillance*) di antitaccheggio.

- Classe 1 – Generation 1, tag passivi a banda 900 MHz o 13,56 GHz con memoria WORM.
- Classe 1 – Generation 2, tag passivi a 900 MHz con memoria WORM, standard innovativo che incorpora ed amplia le caratteristiche delle classi 0 e 1.

La ISO definisce standard in base a codici (spaziando su tutti i campi):

- ISO 11784, ISO 11785 ed ISO 14223 definiscono tag utilizzati per *l'identificazione degli animali* con bande al di sotto di 135 kHz. Lo standard ISO 14223 è più recente e aggiunge all'identificazione anche blocchi di dati riscrivibili.
- Serie ISO/IEC 18000 che definisce l'interfaccia radio, i meccanismi anticollisione, i protocolli di comunicazione su diverse bande per i tag adibiti alla *identificazione di oggetti e alla logistica*:
 - Parte 1 – definisce la base per l'interfaccia radio di tutta la serie
 - Parte 2 – definisce i tag a frequenze inferiori a 135kHz (simile a ISO 14223)
 - Parte 3.1 – definisce i tag a 13,56 MHz (simile a ISO/IEC 15693)
 - Parte 3.2 – definisce sistemi RFID di nuova generazione a 13,56 MHz con una maggior velocità di trasferimento dati (fino a 848 kbit/s)
 - Parte 4.1 – definisce tag passivi in riflessione a 2,45 GHz. A tale frequenza operano già le reti senza fili (WLAN, Bluetooth, ZigBee) con cui è necessario programmare la compresenza.
 - Parte 4.2 – definisce tag attivi ad alta velocità di trasmissione a 2,45 GHz.
 - Parte 6 – definisce tag passivi in riflessione a 900 MHz
 - Parte 7 – definisce tag attivi a 433MHz per sistemi a lungo raggio

Una sezione di standard particolare riguarda le Smart Card (tag operanti a 13,56 MHz), carte elettroniche con microchip utilizzate senza contatto:

- ISO/IEC 10536 **Close-coupled cards**, hanno una distanza di lettura dell'ordine di 1 cm, quindi rispetto a standard più recenti sta diventando obsoleto e verrà totalmente rimpiazzato.
- ISO/IEC 14443 **Proximity cards**, sono dotate di microprocessore con una complessa logica di controllo per la gestione di difficili algoritmi di accesso (maggior sicurezza) e hanno distanze di lettura inferiori a 10 cm. Tale standard è suddiviso in 4 parti:
 - Parte 1 – descrive le caratteristiche fisiche
 - Parte 2 – descrive l'interfaccia radio
 - Parte 3 – descrive l'inizializzazione e l'anticollisione
 - Parte 4 – descrive il protocollo di trasferimento datiSu queste card vengono spesso creati dei protocolli proprietari creati dalle aziende produttrici come il "MIFARE" della Philips o il "FeliCa" della Sony.
- ISO/IEC 15693 **Vicinity cards**, sono dotate di una logica di controllo più semplice rispetto alla controparte sopra citata però hanno una distanza di lettura maggiore, fino a 1,5 m. Vengono utilizzate per il controllo di accesso e identificazione.

Infine:

- ISO/IEC 18092, ISO/IEC 21481 e ISO/IEC 28361 sono standard che definiscono un sistema in rapido sviluppo denominato **NFC (Near Field Communication)**. Sono sistemi che si basano sulle tecnologie RF di prossimità senza contatto e sfruttano il modello delle Smart cards. Gli apparati (terminali fissi e mobili) NFC superano l'idea di Reader e tag perché ognuno di essi può essere sia passivo che attivo generando una comunicazione fra pari (peer-to-peer) particolare. Un apparato gestito da un utente può "svegliare" il suo corrispondente (come farebbe un reader con un tag passivo) e a questo punto la comunicazione può essere o di sola acquisizione di informazioni o con scambio di dati su un canale sicuro (pagamenti, biglietteria, ecc.). Questi sistemi operano alla frequenza di 13,56 MHz e sono totalmente compatibili con le carte senza contatto (ISO/IEC 21481).

Nella tabella di Fig. 29 si può notare uno schema riassuntivo degli standard ISO ed EPC in base alle bande e alla loro applicazione.

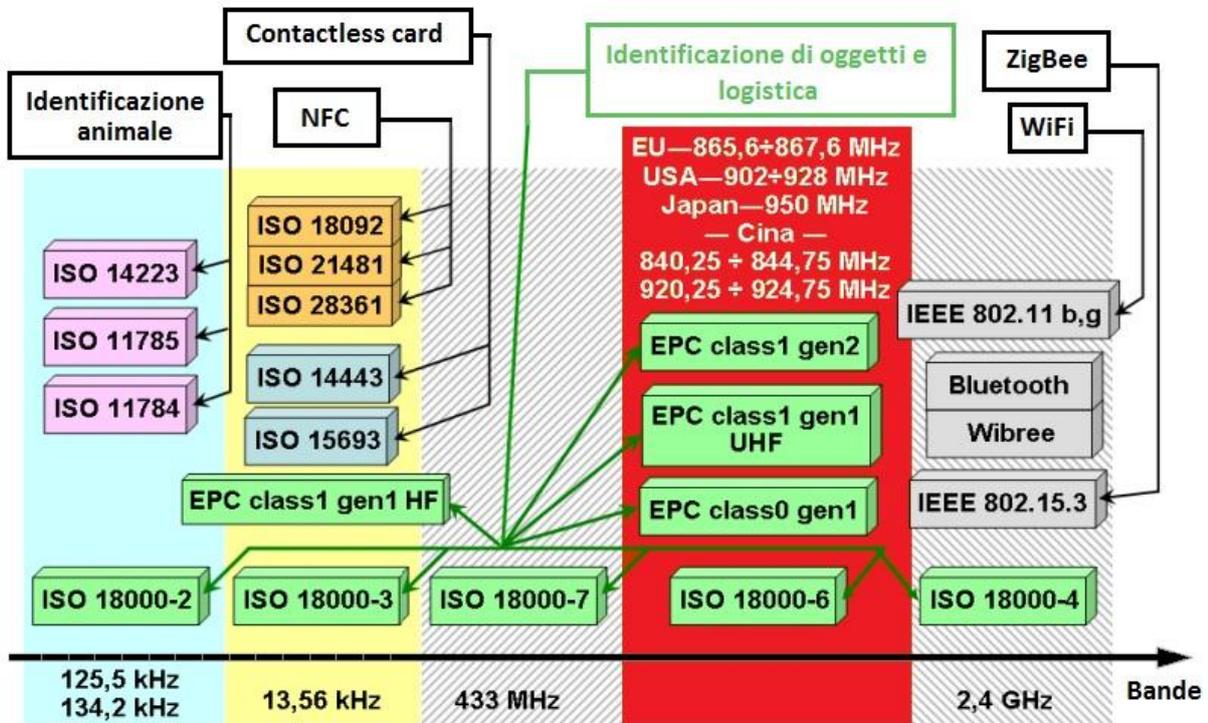


Fig. 29 Schema riassuntivo degli standard ISO e EPC.

2.6 Riassunti di confronto fra classificazioni di tag

Si riassumono in questo paragrafo i confronti i vari tag in base alla frequenza, alle prestazioni, alla funzionalità, alla tecnologia e alla capacità di memoria.

Accoppiamento magnetico		Accoppiamento elettromagnetico	
LF	HF	UHF media	UHF alta
Sensibilità all'orientamento fra le antenne di reader e tag			
Molto sensibili, mancate letture		Sensibili, attenuazione ed eventualmente mancate letture	Poco sensibili
Velocità di trasferimento dati			
Minore <-----> Maggiore			
Velocità di lettura di più tag			
Minore <-----> Maggiore			
Capacità di lettura di tag in prossimità di metalli o liquidi			
Migliore <-----> Peggior			
Capacità di lettura di tag attraverso tessuti o superfici umide			
Migliore <-----> Peggior			
Assorbimento di energia			
Minore <-----> Maggiore			

Tabella che confronta i tag in base alla frequenza.

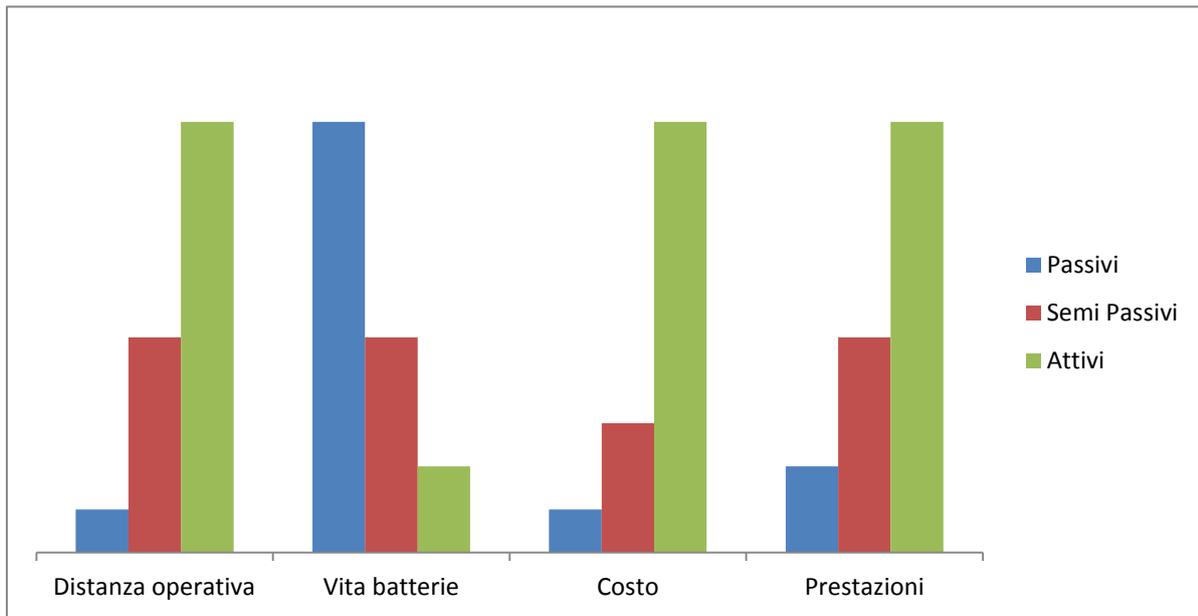


Fig. 30 Grafico che mette a confronto i tag in base alla tecnologia.

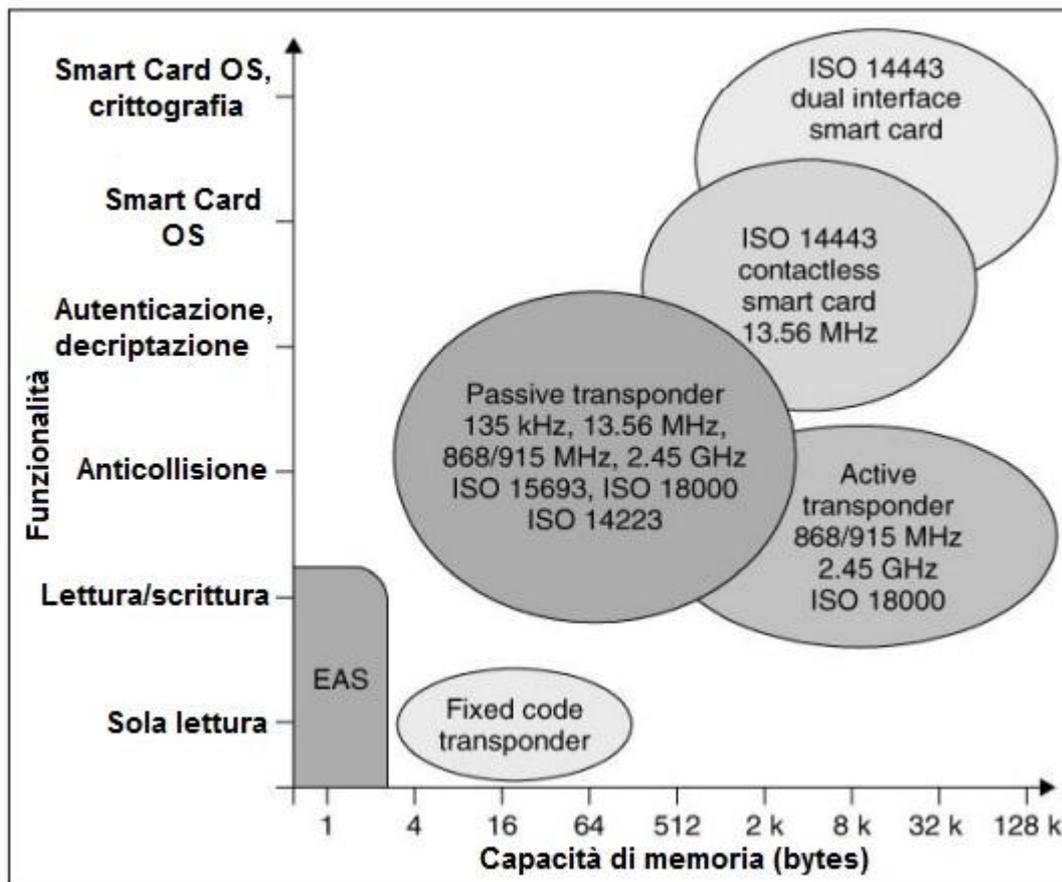


Fig. 31 Grafico di confronto fra tag per capacità di memoria e funzionalità.

Capitolo 3: Misure su sistema RFID

3.1 Premessa

Nei capitoli precedenti sono stati trattati a livello teorico i principi fisici sui quali si basano i sistemi RFID, dettagliate le specifiche tecnologiche e introdotte le valutazioni sulle tipologie e gli ambiti di impiego.

Scopo del presente capitolo è presentare i risultati di misurazioni strutturate condotte su uno specifico sistema RFID reale, completo di tutti gli elementi principali e già progettato in ogni sua parte.

In particolare ci si soffermerà sulle caratteristiche tecniche dei vari tag (“*Smart Cards*”) presi in esame, sulla distanza di rilevazione da parte dei reader e sulla potenza ricevuta dai tag stessi durante la comunicazione.

Nella prima parte verranno esposti i risultati relativi alle misure sulla distanza di lettura al variare dei tag e dei reader, mentre nella seconda parte quelli derivati dalle misure di potenza ricevuta sul singolo tag fissato un unico reader.

3.2 Prima I – Misure sulla distanza di lettura

Lo scopo di questa prima gamma di misure è di mettere a confronto le prestazioni ottenibili da quattro diversi tag di uso comune. Ciascuno dei 4 tag verrà valutato in altrettante distinte condizioni operative identificabili con precise configurazioni del reader. Il parametro di confronto adottato è la distanza massima di lettura dei singoli tag. Verranno conseguentemente affrontate e quantificate le flessioni di prestazione che comporta la presenza della cosiddetta “finestra” (supporto metallico del reader).

3.2.1 Composizione del sistema RFID

Di seguito si definiscono le specifiche progettuali, realizzative e di configurazione del sistema completo RFID, utilizzato per le misurazioni. Il progetto era già esistente ed è era già stato settato.

TAG

In questa prima fase di misurazione sono stati utilizzati quattro differenti tag (vedi Fig. 32) accomunati dalle caratteristiche tecniche di appartenenza alle classi:

- passivi di tipo magnetico
- dotati di memoria EEPROM integrata in un chip
- frequenza operativa di 13,56 MHz (HF)
- montato su di una struttura di tipo Smart Card.

Ogni tag è stato selezionato secondo specifiche singolari e si differenzia dai restanti per le proprie peculiarità tecnologiche, nel particolare legate al protocollo di comunicazione adottato e alle prestazioni della memoria.

Si considerino le “smart card” utilizzate in questa esperienza:

- *MIFARE Classic 1K*, la tecnologia *MIFARE* è di proprietà della Philips e comprende diversi tipi di card. Il modello *Classic 1K*, utilizza un protocollo di tipo ISO/IEC 14443 tranne per la parte 4 che è sostituita da un protocollo (*Crypto 1*) di sicurezza proprietario. Ha una memoria EEPROM da 1kbyte e una velocità di trasferimento dati fino a 106 kbit/s. I tipici utilizzi sono: trasporto pubblico, parcheggio auto, internet caffè.
- *MIFARE Plus X 4K*, questo modello è l'evoluzione del modello *Classic* della Philips. Utilizza un protocollo di tipo ISO/IEC 14443 ma ha una maggior sicurezza per l'accesso dati perché utilizza un codice *AES-128 (Advanced Encryption Standard)*. Ha una memoria EEPROM da 4 kbyte e una velocità di trasferimento fino a 848 kbit/s. I tipici utilizzi sono: trasporto pubblico, gestione accessi dipendenti, circuiti di pagamento.

- *Jaycos2*, è una tecnologia creata dalla InSeal SAS (ditta francese). Utilizza un protocollo di tipo ISO/IEC 14443 con un protocollo di sicurezza che sfrutta un codice *AES-128*. Ha una memoria EEPROM da 4 kbyte e una velocità di trasferimento fino a 424 kbit/s.
- *Calypso*, è una tecnologia creata dagli operatori di trasporto di Parigi (RAPT). Utilizza un protocollo di tipo ISO/IEC 14443-B per l'interfaccia comunicazione e un protocollo ENV 1545 per la struttura dati. Ha una memoria EEPROM da 4 kbyte e una velocità di trasferimento dati fino a 424 kbit/s.



Fig. 32 I quattro tag passivi con struttura di Smart card

READER

Il reader utilizzato, opportunamente progettato e configurato a priori, risulta suddiviso in tre parti principali come si può osservare da relativo circuito equivalente in Fig. 33:

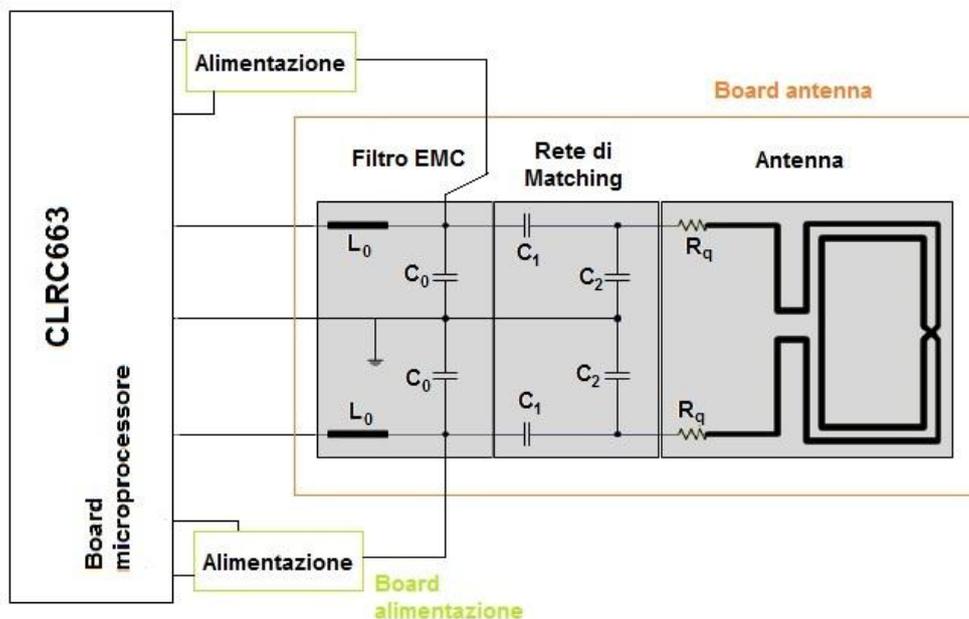


Fig. 33 Circuito equivalente reader

- **Alimentazione** (vedi Fig. 34)

Realizzata con una board in grado sia di gestire i parametri di alimentazione che di potersi interfacciare con l'elaboratore del reader (nel caso per il tramite di una porta seriale COM 1).

La board è dotata anche di tre led per indicare gli stati del reader:

- ✓ pronto alla lettura (led verde acceso)
- ✓ in preparazione (tre led lampeggianti in sequenza).

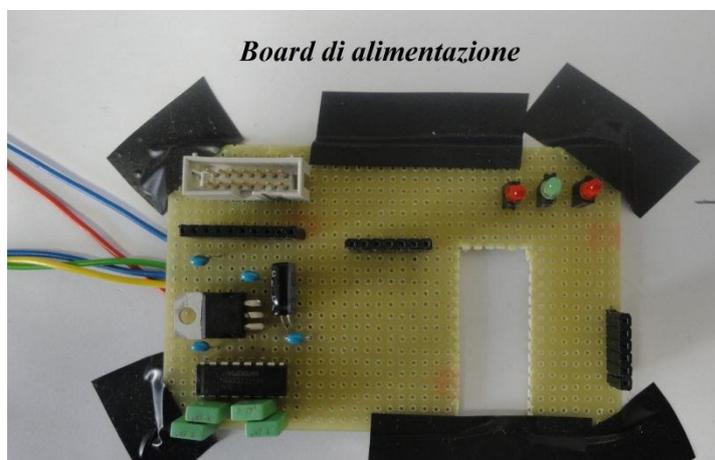


Fig. 34 Board di alimentazione con i tre led

- **Il CLRC663** (vedi Fig. 35)

Una board dotata di microprocessore programmato per la lettura dei tag, sfruttando l'antenna RF, e la comunicazione con il *sistema di gestione* software su PC.

Nello specifico, il microprocessore è un modello progettato della NXP Semiconductors (filiale della Philips) in grado di comunicare con tag che utilizzino il protocollo ISO/IEC 14443 o affini (MIFARE, FeliCa, Calypso).

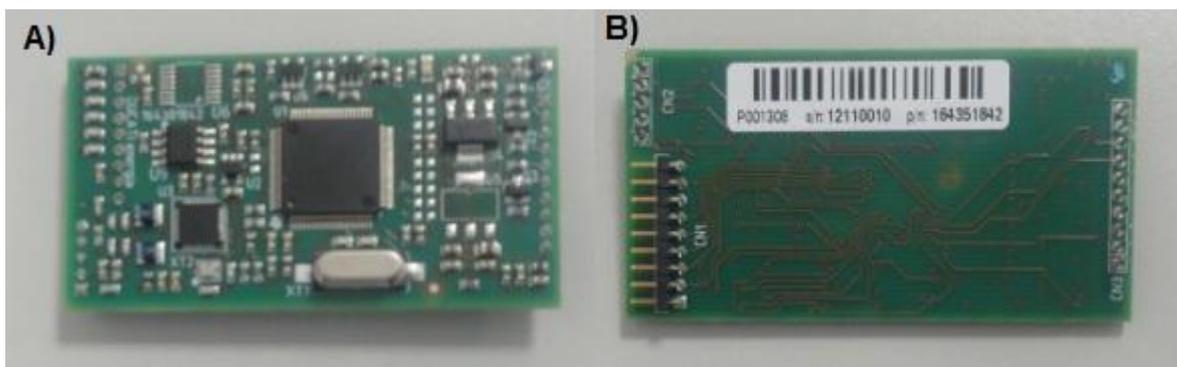


Fig. 35 A) CLRC663 Fronte. B) Retro

- **Antenna RF** (vedi Fig. 36)

Una board suddivisibile in tre parti di logiche di circuito già settate in ogni loro parte:

- *Filtro EMC* che riduce le armoniche della frequenza operativa (13,56 MHz) ed esegue la trasformazione di impedenza;
- *Rete di matching* che agisce come un blocco di trasformazione di impedenza
- *Antenna RF*, che genera il campo magnetico per alimentare e comunicare con il tag

Per le misure sono state utilizzate quattro board di antenna dimensionate per impiego in due differenti configurazioni (con finestra o senza finestra, vedi sotto) e con due tipi di condensatori.

Per finestra si intende un supporto metallico che riproduca la presenza della scatola esterna di supporto del circuito nel suo reale utilizzo.

Ad ogni antenna è stato assegnato un codice identificativo:

- C2, antenna bilanciata per configurazione senza finestra con tutti i condensatori (C_0 , C_1 , C_2) aventi tensione massima di lavoro pari a 50V.
- B1, antenna bilanciata per configurazione senza finestra con tutti i condensatori aventi tensione massima di lavoro pari a 100V
- B2, antenna bilanciata per configurazione con finestra con tutti i condensatori aventi tensione massima di lavoro pari a 50V
- B3, antenna bilanciata per configurazione con finestra con tutti i condensatori aventi tensione massima di lavoro pari a 100V

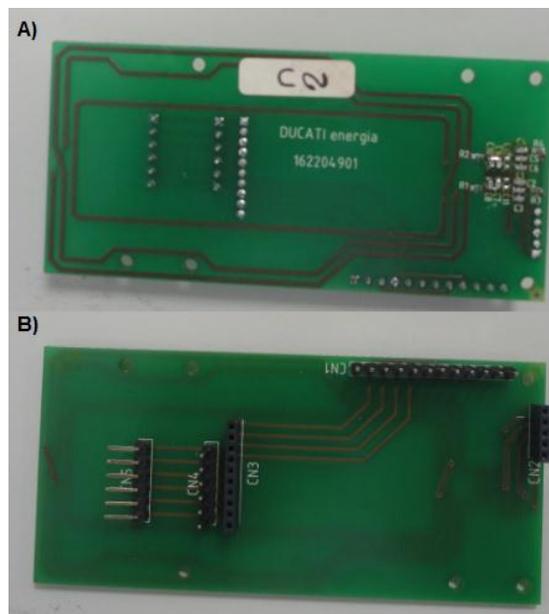


Fig. 36 A) Board antenna C2 fronte. B) Retro

SISTEMA DI GESTIONE

Il sistema di gestione utilizzato è un Personal Computer portatile collegato al reader attraverso una porta USB interfacciata come seriale COM 1.

Sul PC è stato installato e configurato il software “*Reader RFID HF Protocol Tester Vers.1.4.2*” dotato di una semplice interfaccia (vedi Fig. 37) che consente di comandare il reader e riceverne le informazioni. Sviluppato appositamente per il sistema in esame, questo applicativo permette, in particolare, di avviare e fermare la lettura da parte del reader e constatare a video l’avvenuta lettura del tag.

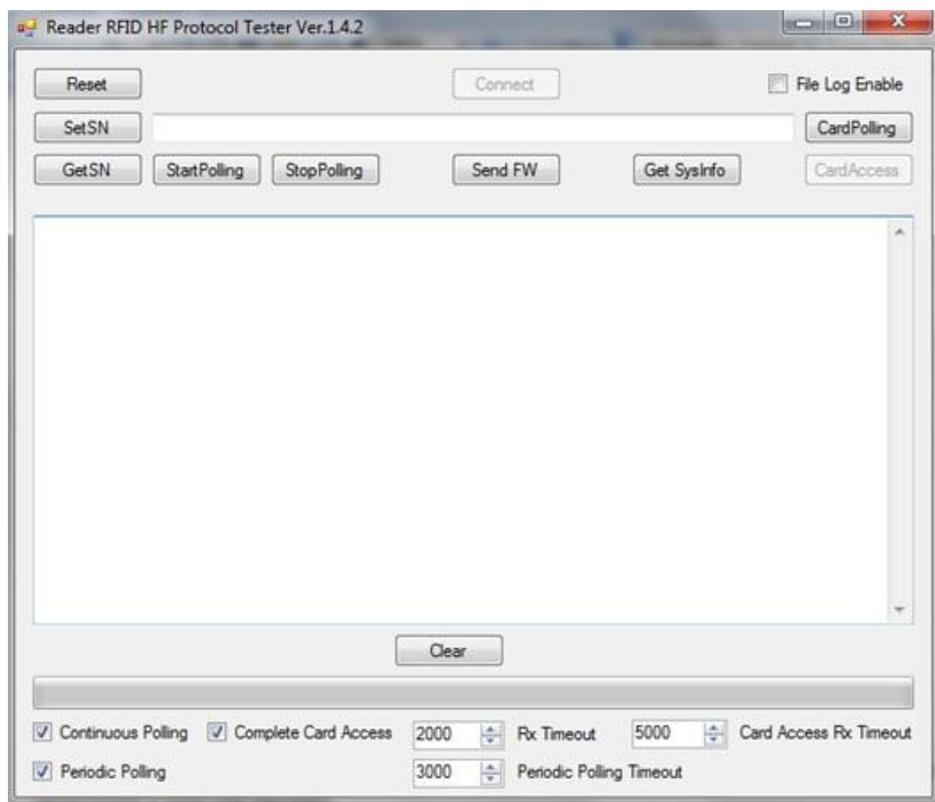


Fig. 37 Interfaccia del programma *Reader RFID HF Protocol Tester Vers.1.4.2*

3.2.2 Strumentazione

Oltre al sistema RFID descritto sopra, per eseguire le misure sono stati necessari altri strumenti:

- *Colonnina di supporto* per il reader e i tag, per evitare problemi di interazione e dispersione di campo magnetico è stata costruita interamente in legno. Per agevolare e ridurre il margine di errore delle misure sulle distanze di lettura è stata graduata (scala in millimetri) lungo il verso dell'altezza.
- *Generatore di tensione Agilent E3630A* (vedi Fig. 38), dotato di tre uscite di tensione DC (+6V, $\pm 20V$), uscita comune (COM) e di terra. Permette di regolare la tensione di uscita con una precisione pari al centesimo di volt.

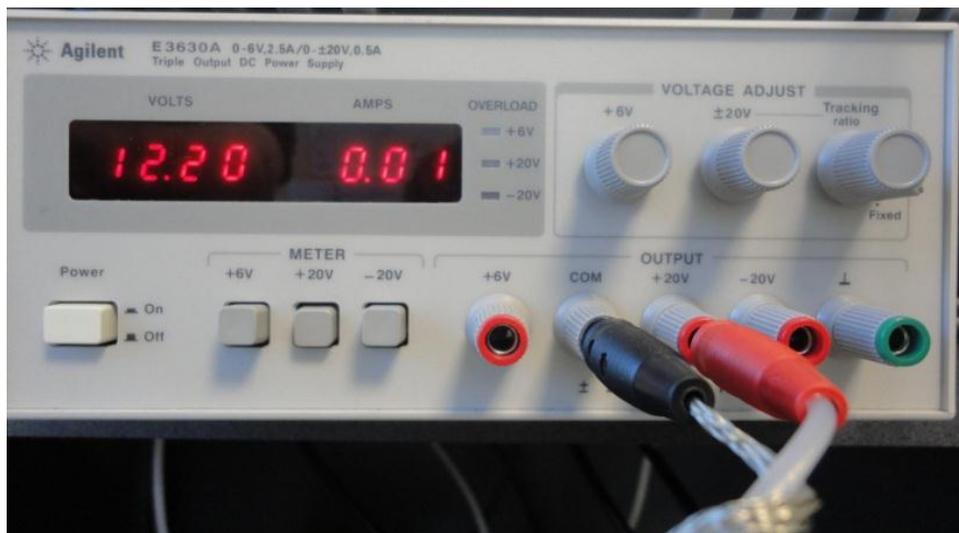


Fig. 38 Generatore di tensione DC Agilent E3630A

- *Multimetro Agilent 34401A* (vedi Fig. 39), in grado dunque di operare sia come Voltmetro che come Amperometro, sia in DC che in AC. Dotato degli ingressi necessari a misurare anche resistenza, continuità e frequenza.

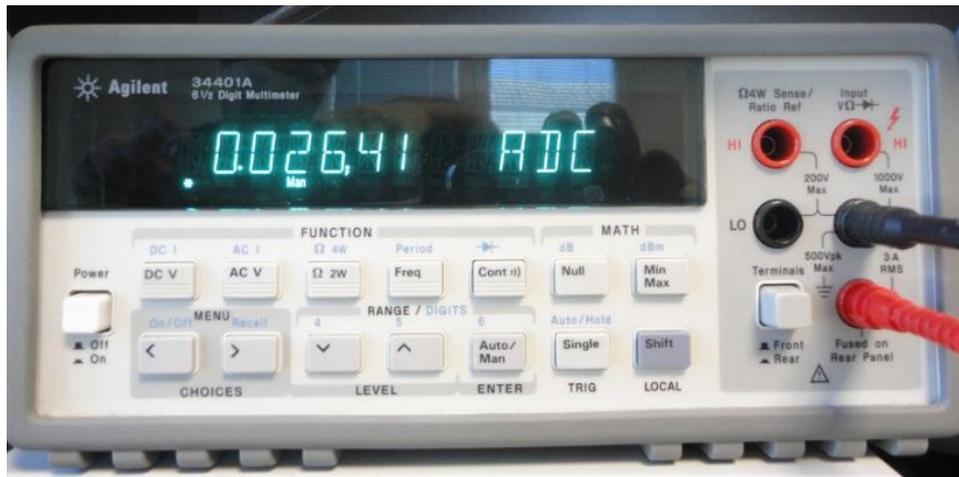


Fig. 39 Multimetro Agilent 34401A

3.2.3 Set-up di misura

Iniziati i rilievi con la configurazione senza finestra, il set up di misura adottato è di seguito definito (vedi Fig. 40):

- La board antenna (C2) è stata collegata alla board microprocessore. Il blocco composto dalle due è stato quindi inserito nella board di alimentazione posizionata sulla base della colonnina di legno graduata;
- La board completa è stata dunque collegata tramite la porta seriale COM 1 al PC portatile, sfruttando un adattatore USB, ed infine connessa ed alimentata dal generatore di tensione sul quale sono stati impostati 12,2V in DC;
- La card (tag) è stata fissata orizzontalmente, tramite un blocchetto di polistirolo, ad un supporto di legno in grado di scorrere verticalmente lungo la colonnina graduata, in modo da permettere di regolare la distanza della card dall'antenna misurandone contestualmente il valore con precisione al millimetro;
- Infine è stato collegato il multimetro con funzione di amperometro in serie al generatore di tensione, per misurare la corrente assorbita dall'intero circuito.

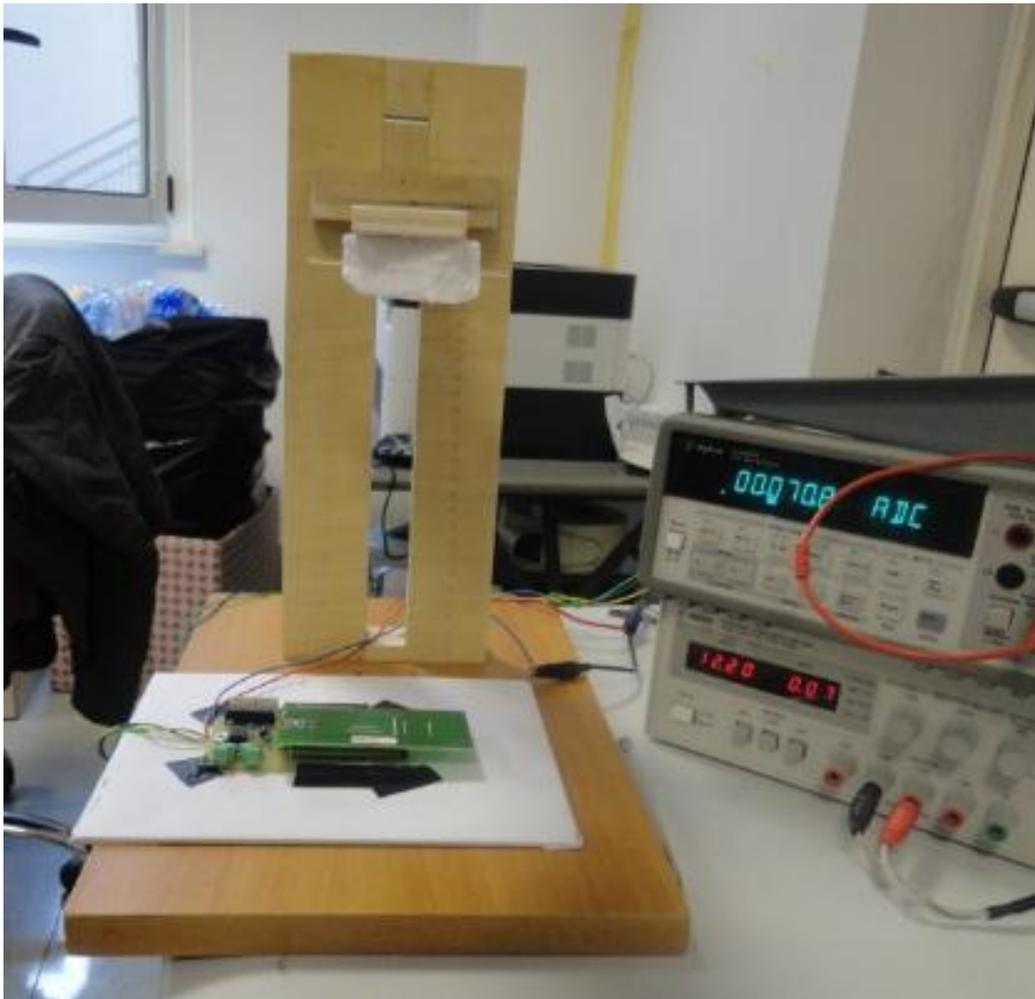


Fig. 40 Configurazione senza finestra

Il set up descritto è stato utilizzato per misurare la distanza di lettura di ognuna delle quattro card nei due casi delle diverse antenne progettate per l'utilizzo senza finestra (C2 e B1).

In seconda battuta è stata realizzata la configurazione con finestra (vedi Fig. 41), il set up utilizzato (vedi Fig. 42), simile al precedente, differisce solo per l'aggiunta del supporto di installazione del reader denominato appunto finestra e l'utilizzo delle due antenne dedicate al caso in analisi (B2 e B3). Tale supporto metallico è atto a simulare il reale apparecchio che conterrà il dispositivo reader.

La postazione completa per le misure risultante è documentata in Fig. 43.



Fig. 41 Configurazione con finestra

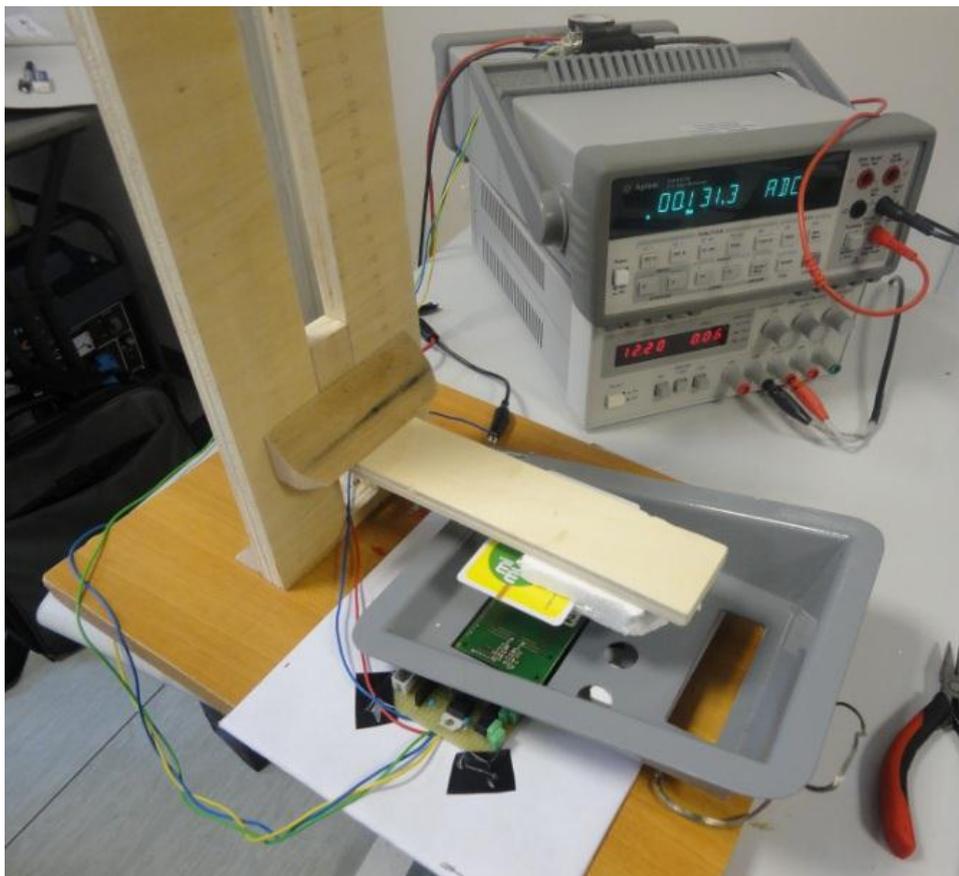


Fig. 42 Set up di misura



Fig. 43 Postazione di misura completa

3.2.4 Risultati di misura

Prima di parlare dei risultati ottenuti è opportuno dare la definizione dei due seguenti tipi di accesso ai singoli tag:

- Si parla di *distanza di lettura del solo ID*, quando il reader riesce a leggere i soli dati identificativi contenuti nella memoria del tag.
- Si parla di *distanza di lettura completa* (“*Complete access*”), quando il reader riesce a leggere tutti i dati contenuti nella memoria del tag.

Realizzato e impostato il set-up, le misurazioni sono state effettuate seguendo la seguente procedura:

- 1) attivazione, da generatore di tensione, dell'alimentazione al circuito reader;
- 2) connessione logica al reader del sistema di gestione direttamente tramite software (tasto “*Connect*” dell'interfaccia applicativa);
- 3) avvio del “*Card Polling*” (tentativi ciclici di lettura della card) da interfaccia software;
- 4) partendo dalla posizione più elevata sulla colonnina di supporto, avvicinamento lento e graduale della card all'antenna fino alla segnalazione di avvenuta lettura dell'ID della card (identificativo numerico della card stessa) a video sul programma;
- 5) annotazione della **distanza di lettura (D_{max} acc. solo. ID [mm])** raggiunta;
- 6) avvicinamento progressivo ulteriore della card fino al segnale (schermata “*verde*”, vedi Fig. 44) di completo accesso
- 7) annotazione della **distanza di completo accesso (D_{max} acc. compl. [mm])** raggiunta, unitariamente al valore della **corrente assorbita (I_{max} ass. “lettura” [mA])**.

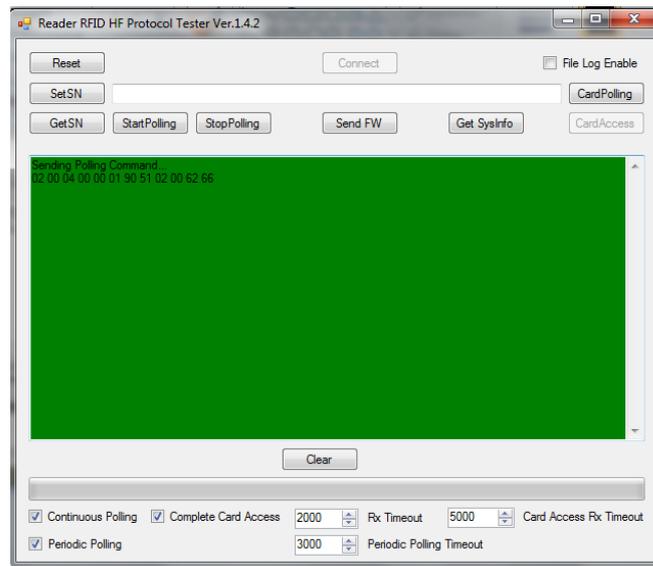


Fig. 44 Segnale di completo accesso

Nota: per ottenere una maggior accuratezza sulla misura del valore della distanza di completo accesso, veniva ripetuta per tre volte la lettura solo accendendo e spegnendo il generatore di tensione (lasciando la card alla distanza raggiunta) e verificando di ottenere il segnale di avvenuto accesso al primo tentativo.

Il procedimento di misura è stato reiterato per tutte e 4 le card e con ogni antenna. I risultati ottenuti sono dettagliatamente riportati nelle seguenti tabelle e relativi grafici:

Si può osservare dai dati delle tabelle che per tutte le card, tranne la MIFARE Plus X, la distanza massima di ID Access coincide con la distanza massima di Complete Access.

CONFIGURAZIONE SENZA FINESTRA

Antenna C2 con condensatori aventi V_{max} 50V			
Tipo di card	D_{max} acc. solo ID [mm]	D_{max} acc. compl. [mm]	I_{max} ass. "lettura" [mA]
MIFARE Classic 1K	69	69	112,9
MIFARE Plus X 4K	49	37	126,6
Jaycos2	39	39	126,2
Calypso	37	37	113,1
Antenna B1 con condensatori aventi V_{max} 100V			
Tipo di card	D_{max} acc. solo ID [mm]	D_{max} acc. compl. [mm]	I_{max} ass. "lettura" [mA]
MIFARE Classic 1K	71	71	121,5
MIFARE Plus X 4K	49	37	123,8
Jaycos2	39	39	129,2
Calypso	37	37	121,2

CONFIGURAZIONE CON FINESTRA

Antenna B3 con condensatori aventi V_{max} 50V			
Tipo di card	D_{max} acc. solo ID [mm]	D_{max} acc. compl. [mm]	I_{max} ass. "lettura" [mA]
MIFARE Classic 1K	57	57	141,1
MIFARE Plus X 4K	40	30	132,4
Jaycos2	28	28	140,5
Calypso	30	30	129,3
Antenna B2 con condensatori aventi V_{max} 100V			
Tipo di card	D_{max} acc. solo ID [mm]	D_{max} acc. compl. [mm]	I_{max} ass. "lettura" [mA]
MIFARE Classic 1K	57	57	132,7
MIFARE Plus X 4K	40	30	139,4
Jaycos2	28	28	141,7
Calypso	30	30	129,3

Tabella raccolta dati misure

Per mettere a confronto con maggior chiarezza le caratteristiche delle 4 card, sono state messe a grafico solamente le distanze massime di Complete Access per ogni antenna utilizzata (Grafici 1, 2, 3, 4).

Antenna C2, capacità aventi V_{max} 50 V

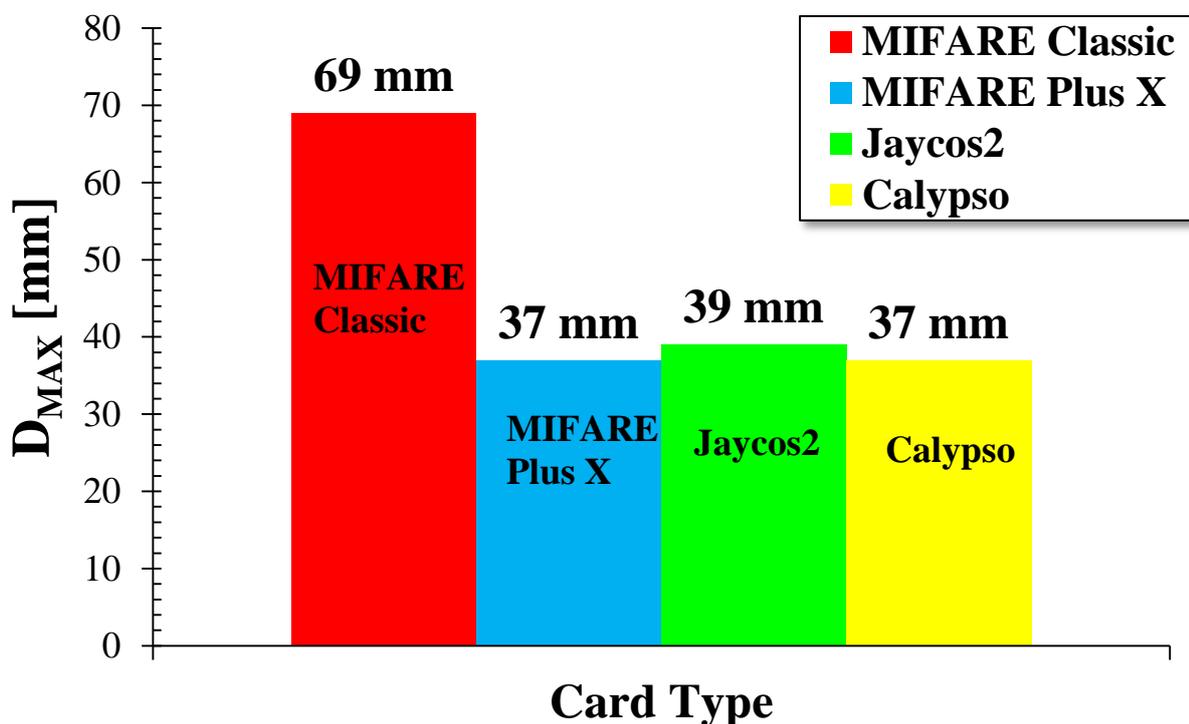


Grafico 1. A confronto le distanze di Complete Access delle singole card con l'antenna C2 in configurazione Senza Finestra

Antenna B1, capacità aventi V_{max} 100 V

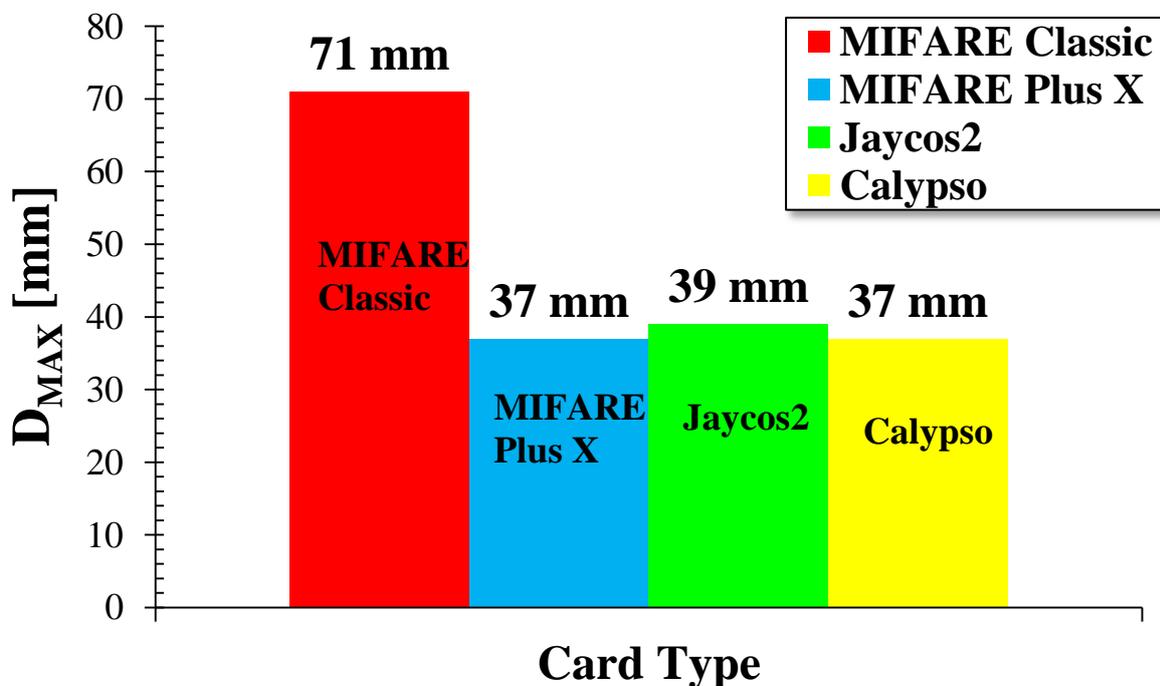


Grafico 2. A confronto le distanze di Complete Access delle singole card con l'antenna B1 in configurazione Senza Finestra

Antenna B3, capacità aventi Vmax 50 V

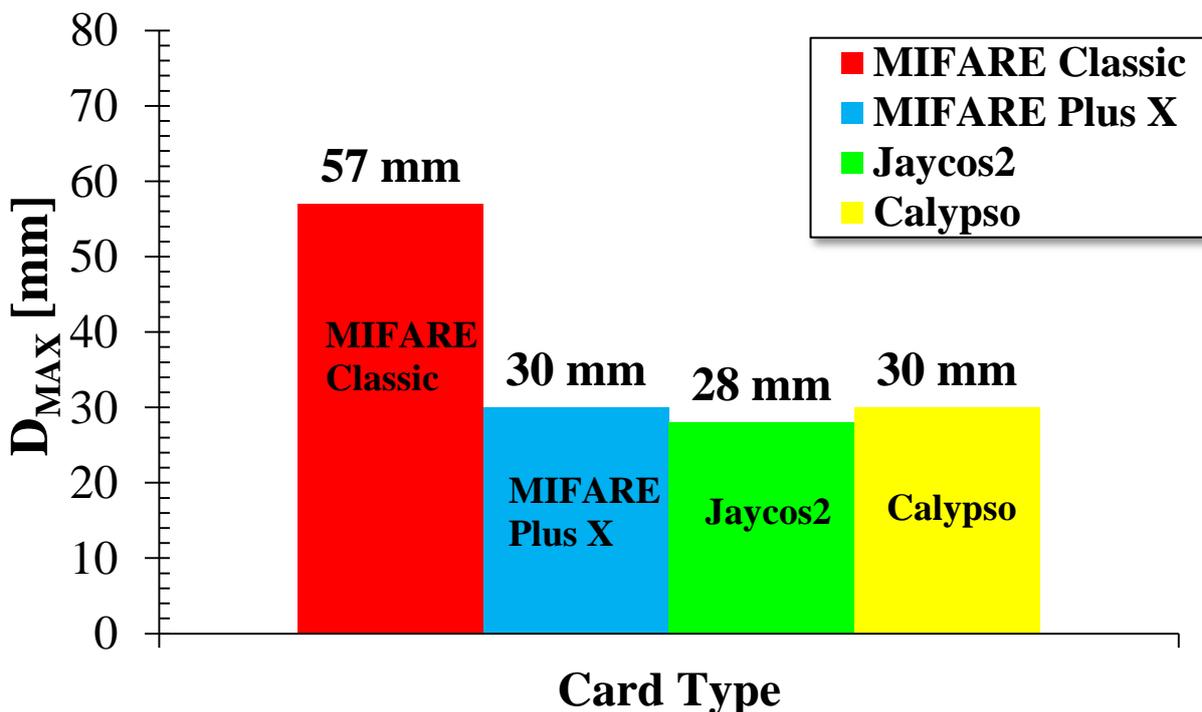


Grafico 3. A confronto le distanze di Complete Access delle singole card con l'antenna B3 in configurazione Con Finestra

Antenna B2, capacità aventi Vmax 100 V

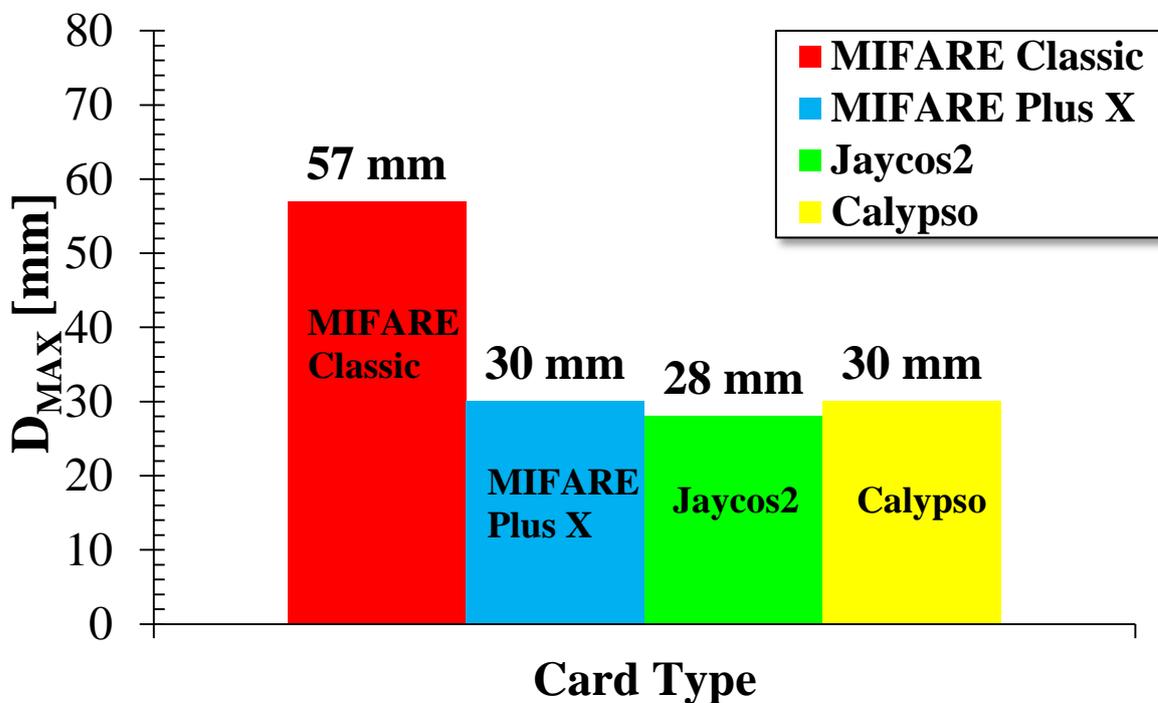


Grafico 4. A confronto le distanze di Complete Access delle singole card con l'antenna B2 in configurazione Con Finestra

3.2.5 Osservazioni e conclusioni

Dai valori in tabella e, ancora più palesemente, dal grafico si possono condurre le seguenti osservazioni:

- con le antenne B1 e C2 (configurazione senza finestra) le distanze di lettura risultano, come prevedibile, più elevate.
- con le antenne B3 e B2 (configurazione con finestra) le distanze di lettura risultano più basse perché la finestra, realizzata in materiale conduttore, va ad interferire con il campo magnetico generato dall'antenna riducendone la potenza irradiata nella direzione di lettura
- La card *MIFARE Classic* ha una distanza massima di lettura sensibilmente più elevata rispetto alle altre. Il risultato è imputabile alla necessità di una potenza, proveniente dal reader, più bassa per essere letta. Ovvero, specularmente, a parità di potenza trasmessa dal reader la distanza di lettura sarà più elevata. Questo valore prestazionale della card *MIFARE Classic* è consequenziale all'utilizzo da parte del chip interno di algoritmi di sicurezza più semplici rispetto alle altre card. Quindi la distanza di lettura maggiore va a discapito di una sicurezza della comunicazione proporzionalmente inferiore.

Nel Grafico 5 sono state messe a confronto le due card: “MIFARE Classic” e “MIFARE Plus X” con le rispettive distanze rilevate.

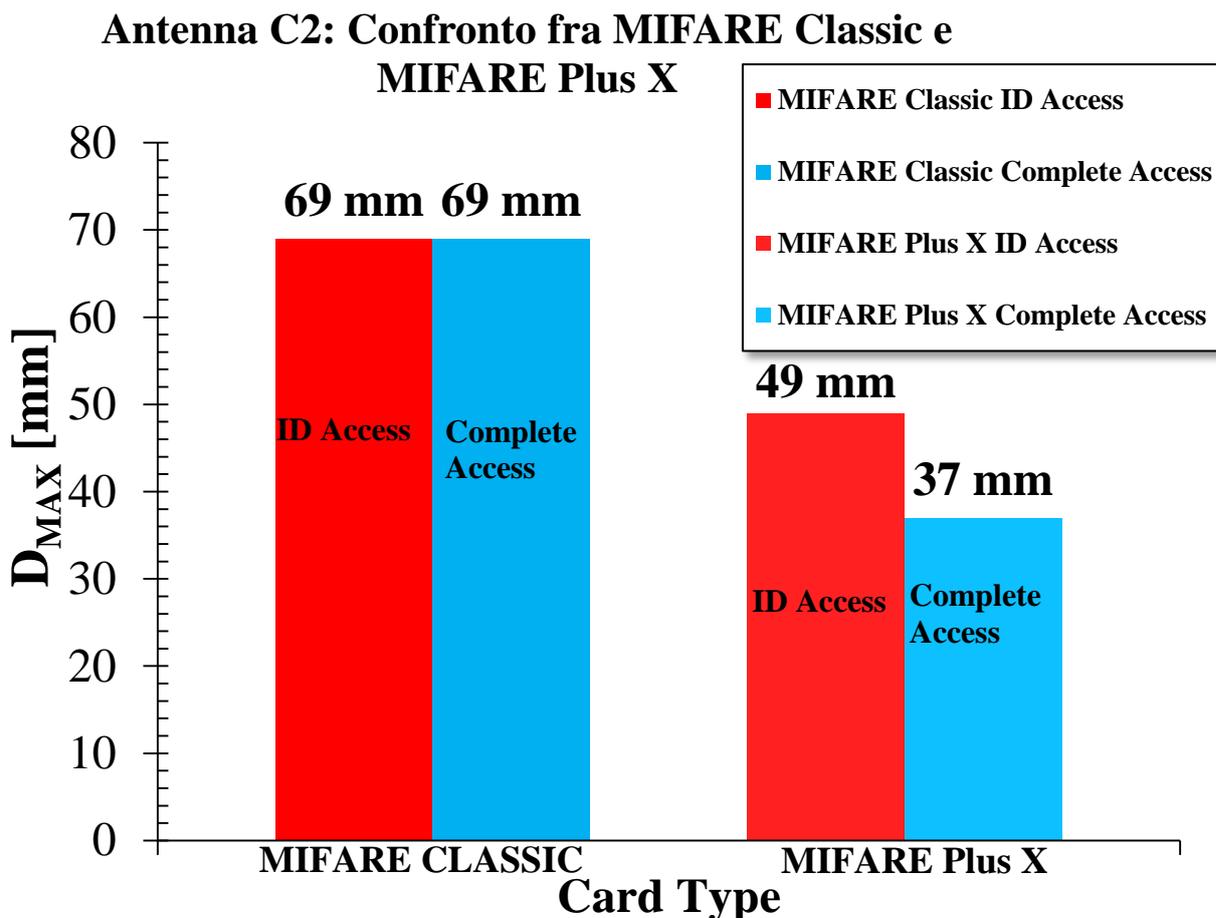


Grafico 5. A confronto le distanze di Complete Access e ID Access delle card MIFARE Classic MIFARE Plus X con l'antenna C2 in configurazione Senza Finestra

Si può notare che la MIFARE Classic ha il vantaggio di riuscire a fare contemporaneamente l'ID Access e il complete Access e a distanza superiore ma, come anticipato, questo va discapito di una minor sicurezza dell'algoritmo di accesso. Alla versione MIFARE Plus X invece compete una distanza di Complete Access inferiore, a favore di un algoritmo di sicurezza più complesso, tuttavia è prevista nello stesso algoritmo una sottoparte di identificazione semplificata che consente una distanza di ID Access è maggiore.

3.3 Parte II – Misure di potenza ricevuta da antenna

Scopo di questa seconda sezione di test è la misurazione della potenza ricevuta da un avvolgimento (antenna A1), che simula la presenza di un generico tag, sottoposto al campo magnetico generato dal sistema RFID descritto al paragrafo 3.2. L'antenna in questione è stata adottata per le misure nelle veci del tag in quanto, evidentemente, risulta più pratico misurarne la potenza assorbita.

E' stata presa in considerazione la configurazione senza finestra, simulata nella condizione operativa più sfavorevole identificata nella prima parte di misure per i tag di maggior diffusione commerciale, ovvero scegliendo fissata pari a 37 mm la distanza fra antenna e reader, valore corrispondente alla distanza massima di complete acce della MIFARE Plus X.

L'obiettivo è chiaramente stabilire l'entità della potenza necessaria ad un tag passivo di uso comune, come la smart card, per attivarsi e comunicare con il reader. Naturale conseguenza della misura di potenza sopra descritta è la valutazione, al fine di ridurne quanto più possibile il valore, dell'ottimizzazione del sistema in modo da ottenere una maggior efficienza.

A tale scopo, sono state effettuate misure di potenza ricevuta sull'antenna di simulazione al variare della capacità di un condensatore posto in parallelo all'antenna stessa. L'inserimento del condensatore è teso a bilanciare la natura prettamente induttiva dell'avvolgimento che realizza l'antenna ricevente, permettendo di ottenere un circuito complessivo RLC risonante e quindi, come visto nei precedenti capitoli, maggiormente efficiente.

Vale la pena di annotare che, nel caso reale delle odierne smart card, vengono sfruttate a tal proposito le capacità parassite associate alle memorie dati presenti sul dispositivo stesso.

3.3.1 Strumentazione

Oltre agli strumenti già utilizzati nella prima parte sono stati impiegati:

- *Analizzatore di spettro Hewlett Packard 8596E* (vedi Fig. 45), che permette di selezionare banda e frequenza di centro banda, eseguire campionamenti, visualizzare la forma dello spettro su griglia graduata in modo da poterne rilevare i valori numerici.

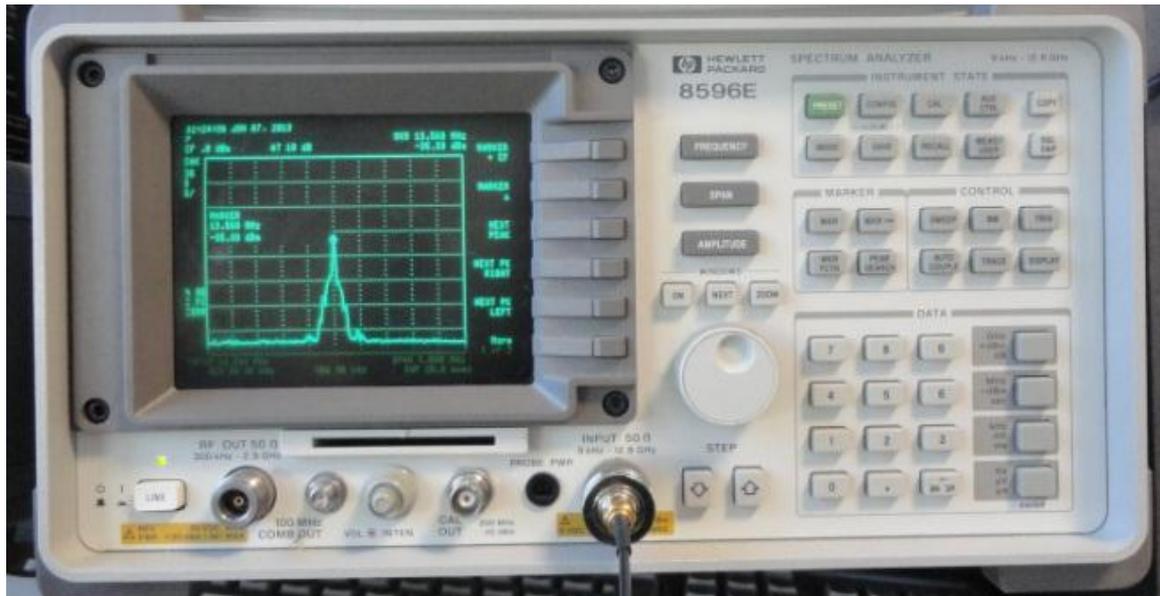


Fig. 45 Analizzatore di spettro Hewlett Packard 8596E

- *Misuratore LCR Agilent U1731C* (vedi Fig. 46), misuratore di resistenza (R), induttanza (L) e capacità (C). Questo strumento è limitato, per i due parametri L e C , a misure in una gamma di frequenza limitata superiormente a 1 kHz.

- *Antenna A1*(vedi Fig. 46), composta da un unico avvolgimento a rappresentazione della parte antenna di un generico tag. In parallelo ai capi dell'avvolgimento, sono stati previsti due pin che consentono di poter inserire e disinserire un condensatore variabile.

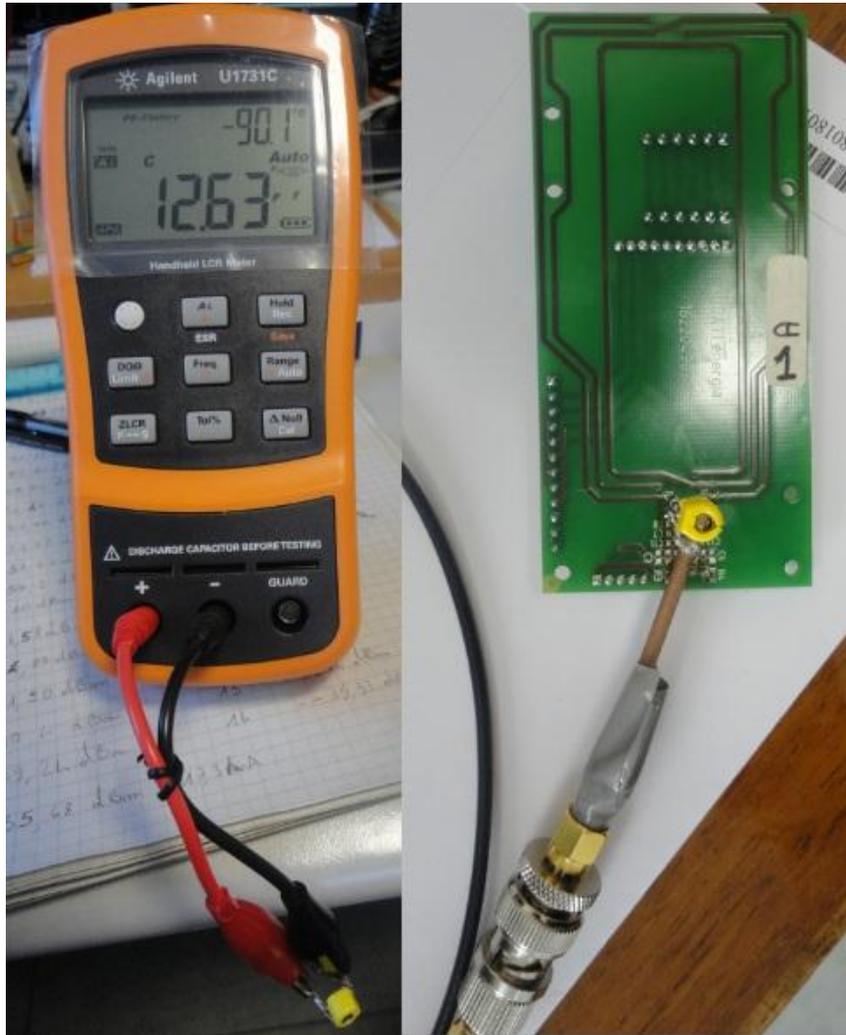


Fig. 46 A sinistra Misuratore LCR con in condensatore variabile in misura. A destra antenna A1 con condensatore variabile in parallelo e il cavo coassiale collegato per misurare la potenza.

3.3.2 Set-up di misura

Si è adottata la sola configurazione senza finestra con antenna C2 e il set up realizzato è stato così composto (vedi Fig. 47):

- La board antenna (C2) è stata collegata alla board microprocessore e il blocco composito è stato inserito nella board di alimentazione posta sulla base della colonnina di legno graduata;
- La board di alimentazione è poi stata collegata al generatore di tensione impostato su 12,2V in DC. La board è stata inoltre connessa tramite la porta seriale COM 1 al PC portatile sfruttando un adattatore USB;
- Ai capi dell'antenna A1 è stato saldato un cavo coassiale derivato all'analizzatore di spettro per misurare la potenza;
- L'antenna A1 (tag) è stata fissata orizzontalmente, tramite un blocchetto di polistirolo, al supporto di legno scorrevole lungo la colonnina graduata e quindi posizionata ad una distanza di 37 mm dal reader;
- Infine è stato inserito, in serie al generatore di tensione, l'amperometro per la misurazione della corrente assorbita dall'intero circuito.

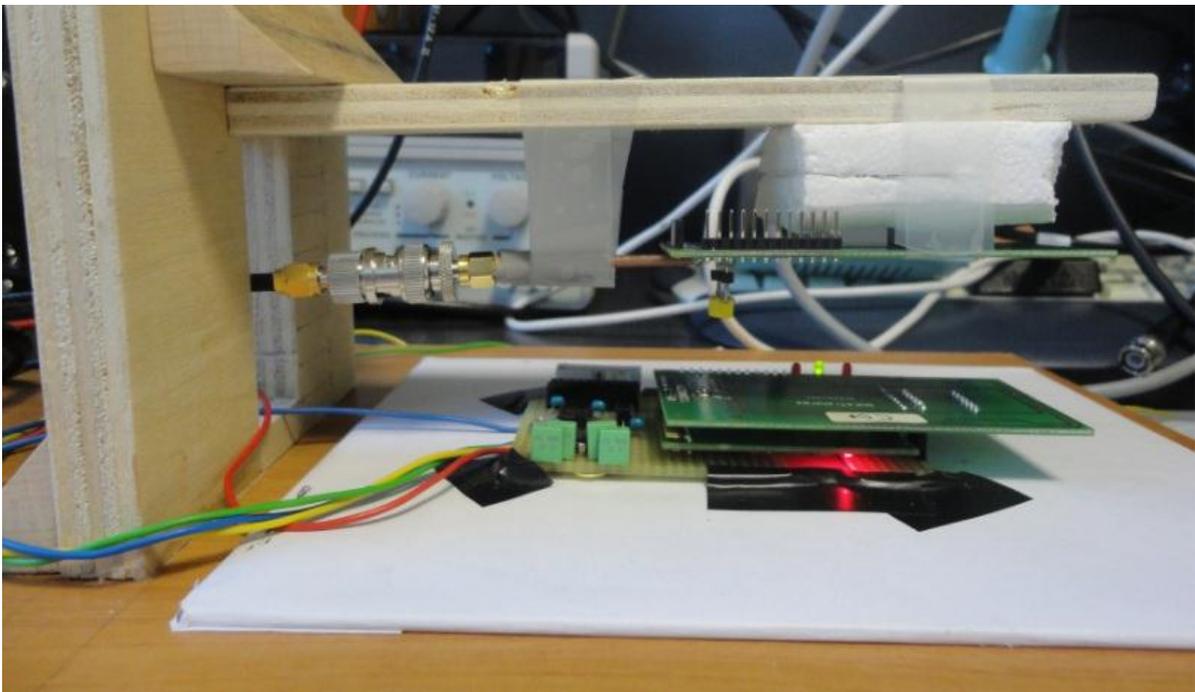


Fig. 47 Set up seconda parte di misure

3.3.3 Risultati di misura

Realizzato e impostato il set-up, le misurazioni sono state effettuate seguendo la seguente procedura:

- misura della potenza ricevuta in assenza del condensatore;
- inserimento del condensatore variabile sui pin preposti, pre-tarato su una capacità di partenza di 4pF;
- impostazione dell'analizzatore di spettro con frequenza centrale di 13,56 MHz (frequenza operativa del sistema RFID) e larghezza di banda pari a 5 MHz
- attivazione del generatore di tensione e della connessione logica, tramite il software, del circuito al computer;
- avvio del Card Polling. In conseguenza l'antenna riceve potenza per effetto dell'accoppiamento magnetico;
- lettura a schermo sull'analizzatore della **potenza massima ricevuta** (P_{rx} [dBm]) dall'antenna grazie alla funzione di ricerca automatica "Peak Search".

La postazione completa per le misure di potenza risultante è documentata in Fig. 48.

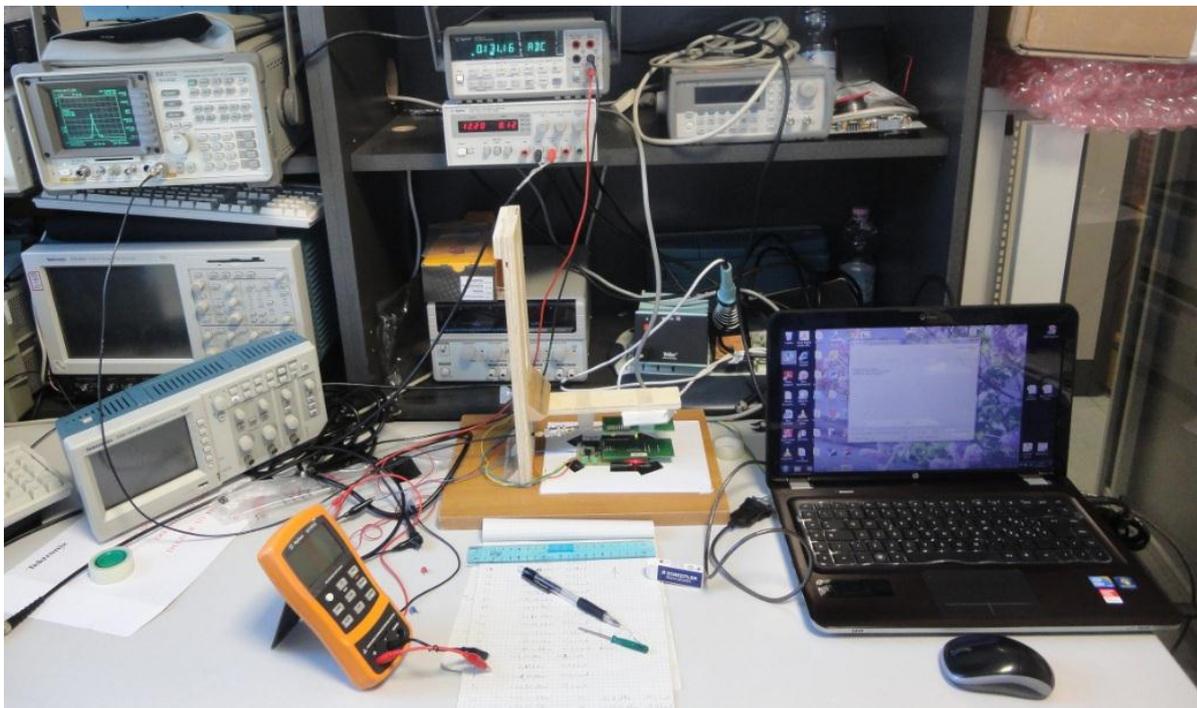


Fig. 48 Postazione completa per la misura di potenza.

Il procedimento è stato reiterato per valori di capacità crescenti con passo di 4pF (ridotto a 1pF nella gamma di frequenze vicine a quella di operatività) fino ad un massimo di 60pF. I risultati ottenuti sono dettagliatamente riportati nella seguente tabella e relativi grafici.

Legenda:

- $C^{1\text{ kHz}}$ è il valore della capacità del condensatore,
- P_{rx} [dBm] è la potenza ricevuta all'antenna A1 dal reader in dBm, letta sull'analizzatore di spettro,
- P_{rx} [μW] è sempre la potenza ricevuta all'antenna A1 dal reader ma in μW , ottenuta con la consueta formula
 - $P_{\text{rx}} [\mu\text{W}] = (10^{(P_{\text{rx}} [\text{dBm}]/10)}) \cdot (10^3)$,
- I_{ass} [mA] è la corrente totale assorbita dal circuito.

C^{1kHz} [pF]	P_{rx} [dBm]	P_{rx} [μ W]	I_{ass} [mA]
0	-48,10	0,01549	103,2
4	-46,58	0,02198	105,8
8	-43,50	0,04467	107,2
9	-41,90	0,06457	108,1
10	-40,40	0,09120	110,5
11	-39,24	0,11912	110,8
12	-37,52	0,17701	105,8
13	-36,14	0,24322	117,3
14	-35,33	0,29309	123,6
15	-35,68	0,27040	117,3
16	-37,54	0,17620	138,1
20	-43,09	0,04909	140,3
24	-46,86	0,02061	131,6
28	-49,70	0,01072	132,6
32	-51,96	0,00637	130,4
36	-53,50	0,00447	125,6
40	-55,04	0,00313	126,3
44	-56,41	0,00229	126,8
48	-57,00	0,00200	126,4
52	-57,98	0,00159	124,8
56	-58,67	0,00136	124,6
60	-59,20	0,00120	124,3

Tabella di raccolta dati: Potenza ricevuta in dBm e μ W e corrente assorbita, al variare della capacit  del condensatore

Potenza ricevuta [μW] dal loop con capacit  variabile in parallelo

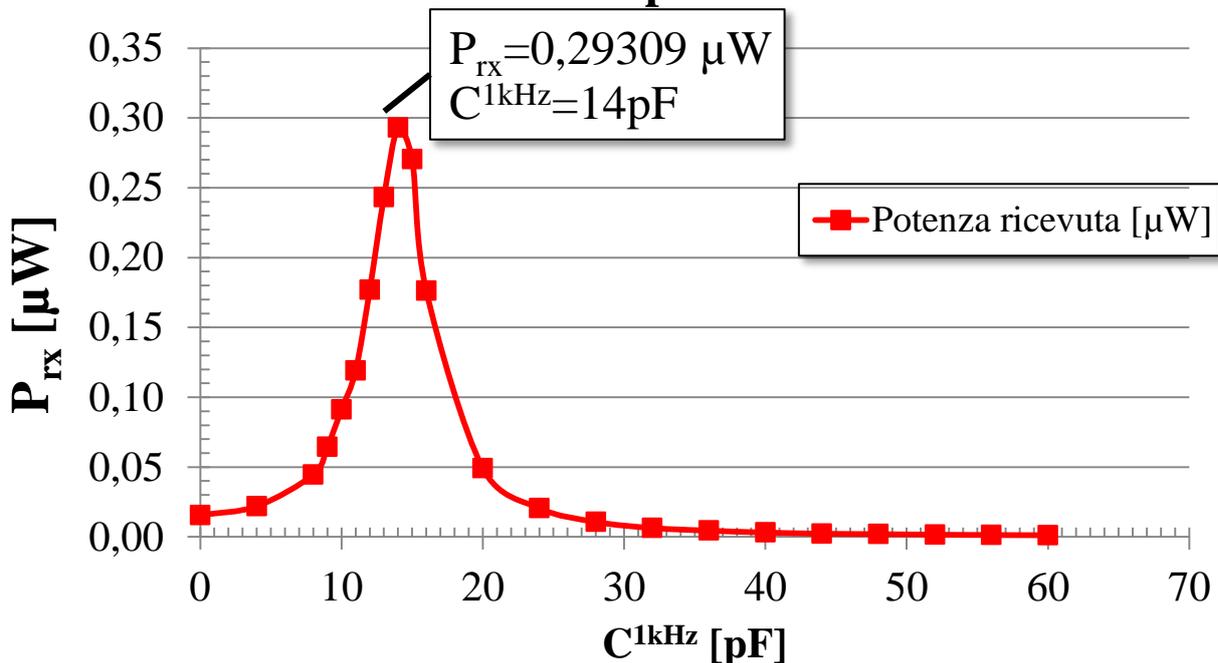


Grafico 6. Andamento potenza ricevuta [μW] al variare della capacit 

Potenza ricevuta [dBm] dal loop con capacit  variabile in parallelo

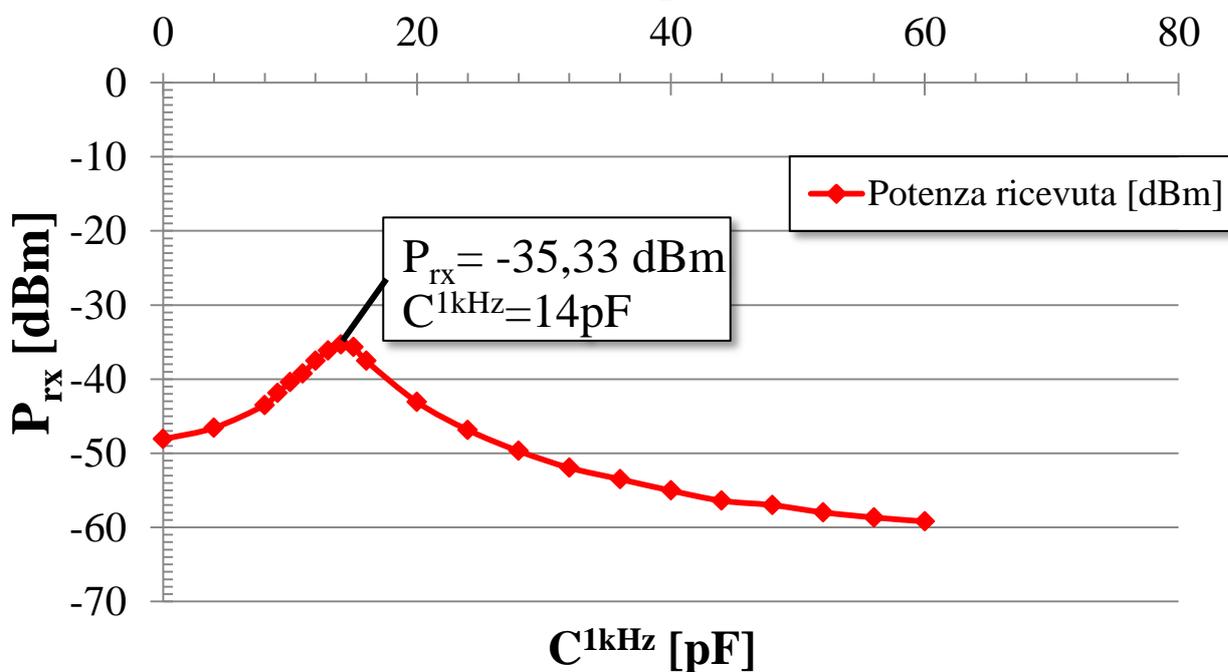


Grafico 7. Andamento potenza ricevuta [dBm] al variare della capacit 

Si evince facilmente dall'andamento a campana riportato nei Grafici 6 e 7 come il circuito antenna riceva la potenza massima in corrispondenza ad un valore della capacità ausiliaria pari a 14pF. Lo spettro a campana del circuito RLC, in condizione di risonanza, del caso specifico è visivamente riportato in Fig. 48.

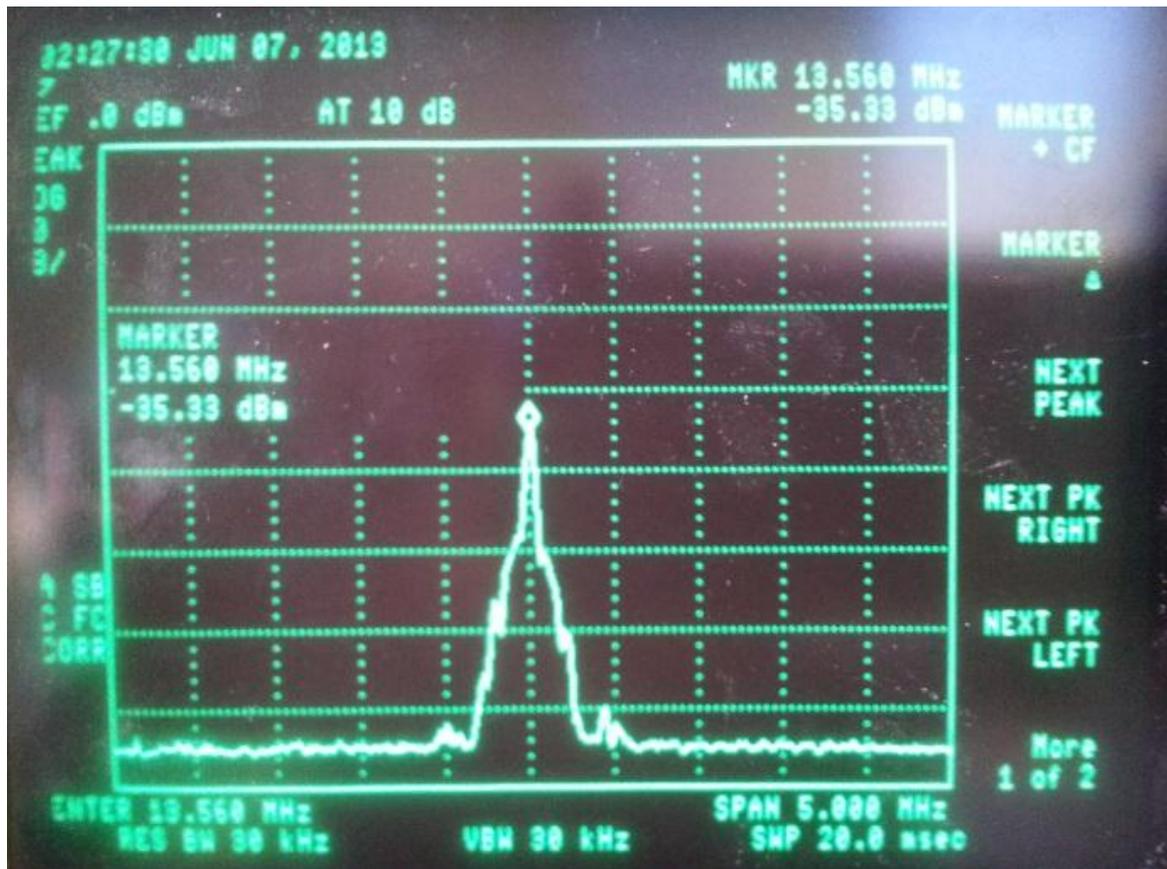


Fig. 48 Spettro di potenza del circuito RLC mostrato dall'analizzatore di spettro.

3.3.4 Osservazioni e conclusioni

L'analisi in simulazione del sistema RFID, realizzata attraverso misure di potenza sull'antenna ricevente del tag, mette chiaramente in luce come l'ottimizzazione del circuito ricevente permetta margini di miglioramento sensibili sulle prestazioni.

E' evidente infatti, dai grafici e tabelle sopra, il divario di potenza ricevuta in condizioni di risonanza e in assenza del fattore capacitivo, quantificato in un rapporto di oltre 1:10 (12,77 dBm).

Specularmente ciò si può tradurre in un considerevole scostamento della distanza di lettura ovvero, dal punto di vista pratico, in una sensibile differenza nella facilità di identificazione sul reader e quindi, generalizzando, d'uso delle smart card riscontrabile da parte dell'utilizzatore. In definitiva quindi, è stato dimostrato sperimentalmente che, nella progettazione dei tag, partendo dal fattore prestabilito di frequenza operativa, il circuito prettamente funzionale (antenna, chip e memoria) non può prescindere dall'essere debitamente adattato, tramite l'inserimento di un opportuno condensatore o lo sfruttamento di una capacità interna, in modo tale da farne coincidere la frequenza caratteristica di risonanza con quella operativa.

L'antenna A1, utilizzata in questa sezione, simula la parte antenna RF di un generico tag (smart card) che viene interrogato da un reader. Ciò ha permesso di misurare la potenza necessaria alla lettura dei dati contenuti nel tag.

Dall'osservazione dei grafici ottenuti si è individuata la capacità di 14 pF, per la quale si verifica una particolare condizione, detta di risonanza. In tale condizione il circuito complessivo (tag) raggiunge lo stato di RLC risonante, ovvero massima potenza ricevuta.

BIBLIOGRAFIA

- RFID. Identificazione automatica a radio frequenza, di Luigi Battezzati e L. Hygounet.
- RFID Handbook 2nd Edition: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Card and Identification, di Klaus Finkenzeller e Rachel Waddington.
- RFID Handbook 3rd Edition: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Card, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, di Klaus Finkenzeller e Dorte Muller.
- RFID – Fondamenti di una tecnologia silenziosamente pervasiva, di Paolo Talone e Giuseppe Russo.
- L'autenticazione negli RFID, di Giovanna Di Napoli e Giuseppina Elefante.
- RFID Made Easy, di Urs Gehrig.
- Dispense Fisica L-B del Professor Maurizio Piccinini.

PRINCIPALI SITI UTILIZZATI

- www.mondorfid.com
- www.rfid.fub.it
- www.intermatrix.blogspot.it
- www.rfid.net
- www.sony.net
- www.ask-rfid.com
- www.nxp.com
- www.rfidjournal.com
- www.thefreelibrary.com
- www.investing.businessweek.com
- www.springcard.com
- www.wikipedia.com
- www.wikipedia.org
- www.ba.infn.it
- www.unibg.it

RINGRAZIAMENTI

In primis vorrei ringraziare il Professor Mastri, per aver accolto la mia richiesta di poter fare un tesi con lui e per essermi venuto incontro nelle difficoltà che si sono presentate durante il cammino.

Un grazie sincero all'Ingegnere Massimo del Prete che, nonostante tutti i suoi impegni ha trovato un po' di tempo da dedicarmi per indirizzarmi sulla giusta via nella parte delle misure, con consigli e suggerimenti per ottenere dei buoni risultati.

Un ringraziamento senza precedenti va a mio fratello, Maurizio, che mi ha sostenuto in ogni momento e non si è mai tirato indietro quando avevo bisogno di lui. Lui è un fratello unico e insostituibile, un esempio che ho seguito con orgoglio e caparbia da quando ho memoria.

Io, lui, il babbo e la mamma saremo per sempre una grande famiglia unita! Ed ecco le altre due persone a cui vanno i miei più sentiti ringraziamenti: i miei genitori Sereno e Laura, che mi hanno cresciuto con amore e gentilezza e mi hanno fatto diventare quello che sono; io a mio modo ho sempre cercato di renderli fieri di me. Mio padre mi ha insegnato lo spirito del sacrificio, ad affrontare la vita a testa alta e a riconoscere il giusto dallo sbagliato; sicuramente non avrei potuto sperare in un padre migliore, perché lui è il migliore di tutti. Mia madre mi ha messo al mondo, mi ha insegnato ad amare, a volere bene e a dare il meglio di me nelle difficoltà; perché lei crede fermamente in me ed è sempre fiera e orgogliosa di me e di mio fratello!

Un ringraziamento, alla pari di quelli sopra citati, va alla Michela, la mia futura moglie. Lei sarà la mia nuova famiglia insieme a nostro figlio che verrà al mondo a giugno. Mi ha spronato in ogni momento di depressione e avvillimento, ha gioito con me nei momenti felici e mi ha saputo sostenere ogni giorno di più.

Un sincero grazie ai miei nipotini, la Bianca e Marcello che ogni volta che mi abbracciano e sorridono chiamandomi zio mi rendono felice. E un

abbraccio di ringraziamento all'Alberta, mia cognata, che con i suoi consigli ha saputo aiutarmi in scelte difficili.

Grazie ai miei parenti più stretti, la zia Gloria, Michele e l'Edda, che fanno parte della nostra grande famiglia, per il sostegno e il conforto.

Ringrazio tantissimo anche tutti i miei amici di sempre: Sala, Braschi, Terra, Cava, Edo e Frengo con cui passiamo e abbiamo passato giorni di allegria.

E non perdono mai l'occasione per essere dalla mia parte.

Grazie a Valeriano, la Silvi, Turz e la Franci, quattro grandi amici con cui è sempre fantastico passare momenti insieme.

Un grazie sentitissimo va all'Emanuela, la miglior collega di lavoro e amica che si possa avere. Grazie per tutto il sostegno e tutto il conforto che mi hai dato soprattutto nel periodo in cui abbiamo lavorato assieme.

Un grazie anche al Dottor Marco Maltoni che mi ha dato l'opportunità di un lavoro con cui poter continuare gli studi e poter inserirmi nel mondo del lavoro. Grazie anche a lui per tutti i consigli e il sostegno.

Un ringraziamento va anche a due buone amiche che hanno sempre speso una buona parola per me: L'ire e la Sara.

Grazie anche a due amici lontani ma comunque sempre vicini col pensiero: Mars e Laura.

Infine grazie a tutte le mie ex colleghe di lavoro che mi sono state vicino in tanti frangenti.