

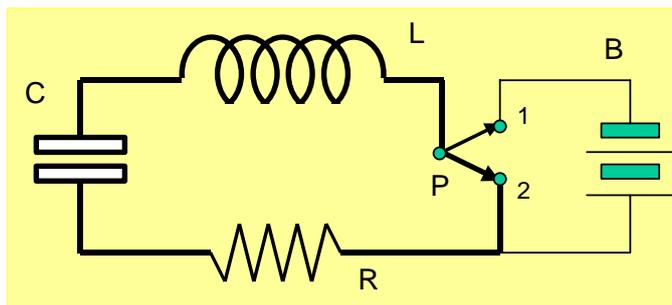
Trasmissione dell'informazione con Onde Elettromagnetiche

Evoluzione degli apparati per la radiotrasmissione

Vorremmo in questo modulo ripercorrere l'affascinante progresso delle tecniche che nel secolo 19° sancirono l'evoluzione della radiocomunicazione, dando veste concreta alle conoscenze scientifiche che in quegli anni si stavano consolidando. La retrospettiva che ne consegue va letta alla luce degli approfondimenti e delle conoscenze maturate negli anni successivi, in cui l'esplosiva diffusione della radio stimolò studi e ricerche, invenzioni e intuizioni per l'ulteriore sfruttamento delle enormi potenzialità delle onde radioelettriche. Il contenuto del modulo non intende dare una spiegazione dei principi e dei fenomeni dell'elettrotecnica, la cui conoscenza si suppone nota al lettore, bensì del modo in cui i progenitori della radiotecnica li utilizzarono per realizzare i dispositivi che permisero l'evoluzione della comunicazione senza fili.

1. I primordi: l'oscillatore di Hertz

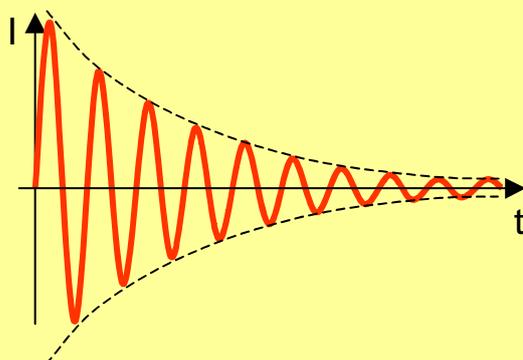
Fu il fisico tedesco Heinrich Hertz a dare per primo, nella storia scientifica, una veste sperimentale alle "onde elettriche". Nel 1879, nella sua tesi di dottorato, e sostenuto dalla benevolenza di Helmholtz, Hertz si era notevolmente interessato alle oscillazioni che si manifestavano sui fili conduttori quando veniva provocata la scarica di una bottiglia di Leyda. Vediamo di chiarire meglio la relazione tra la scarica – sotto forma di scintilla - e la produzione di onde elettromagnetiche.



Nel circuito a lato si supponga di caricare il condensatore attraverso L e R (P in pos. 1). Portando P in pos. 2, il campo elettrico in C tende ad annullarsi, producendo una corrente di scarica che attraversa L e genera quindi un campo magnetico. Ma anche l'induttanza tende a scaricarsi alimentando C che si carica con polarità opposta a quella iniziale. Il fenomeno prosegue alternativamente con un palleggio di energia tra C ed L, e ciò determina una oscillazione con andamento armonico.

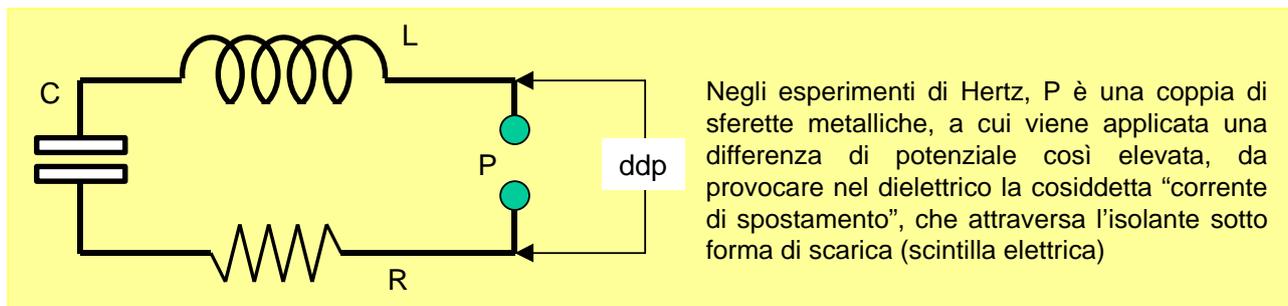
Considerando il circuito LC in figura, una volta che esso sia stato eccitato (la modalità indicata nella didascalia è una fra le numerose possibili), si stabilisce un regime oscillatorio per cui le ddp ai capi di L e C e la corrente che fluisce nel circuito presentano un andamento alternato il cui periodo dipende dai valori dell'induttanza e della capacità. Appare però evidente che l'oscillazione è destinata a smorzarsi in un tempo più o meno breve, che dipende sia dalle perdite del circuito (in figura, concentrate nella resistenza R), sia dal fatto che l'energia dell'oscillazione viene anche

Quando P passa in posizione 2, l'oscillazione che si manifesta nel circuito presenta un andamento la cui ampiezza decresce nel tempo; si tratta di un'oscillazione smorzata, il cui principio è lo stesso che presenta, per analogia, l'oscillazione meccanica di un corpo elastico.



persa per l'irradiarsi del campo elettrico e del campo magnetico nello spazio circostante ai componenti del circuito.

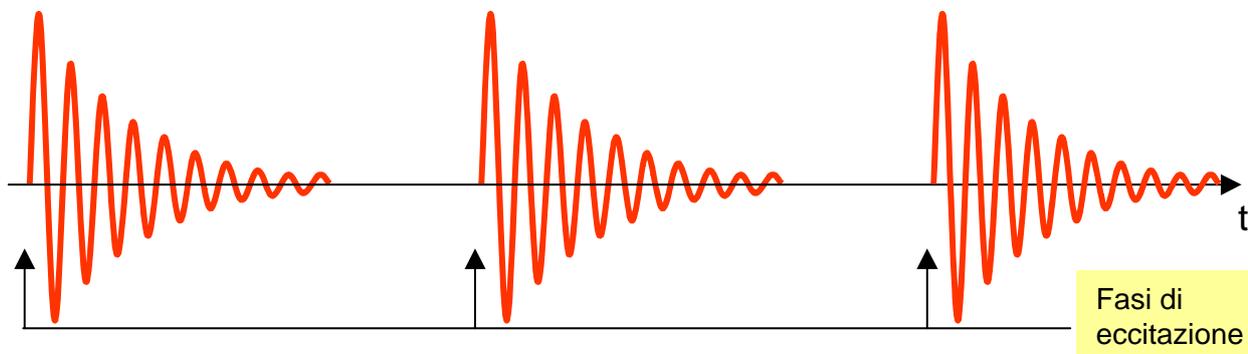
Per ottenere oscillazioni con ampiezza costante, sarebbe necessario dare energia con continuità al circuito, in modo che tutte le possibili perdite ne vengano compensate. Tutti i moderni oscillatori elettronici funzionano su questo principio, e generano oscillazioni persistenti. Ma con le conoscenze del suo tempo, Hertz utilizzò l'unico modo allora possibile per alimentare il suo risonatore: la scintilla.



Abbiamo dunque una fase di carica del condensatore, che avviene a spese della ddp applicata nel punto P; quando però la ddp supera la rigidità dielettrica dell'isolante interposto tra le sferette (cioè avviene avvicinandole al di sotto della cosiddetta "distanza esplosiva") scocca la scintilla. Da un punto di vista elettrico, la scintilla può essere vista come passaggio di una forte corrente nello spinterometro, e ciò equivale ad un cortocircuito in P. L'effetto che se ne ottiene è la scarica del condensatore e l'instaurazione nel circuito (purché R sia sufficientemente piccola) di un'oscillazione smorzata

Ciò determina un'altra conseguenza: anche la scintilla diventa oscillante. In altre parole, poiché l'oscillazione elettrica è tale da invertire sia il segno dei potenziali elettrici sulle armature del condensatore, sia il segno della corrente che circola nel circuito LC, anche la scintilla cambia direzione ad ogni periodo. Già ai tempi di Righi esistevano convincenti analisi ottenute con metodi fotografici veloci, che illustravano questo comportamento della scintilla.

Nell'oscillatore di Hertz, il ritmo con cui veniva prodotta la scintilla (quindi l'eccitazione del circuito LC) veniva controllato mediante dispositivi elettromeccanici, quindi assai lenti: difficilmente potevano superare alcune decine di impulsi al secondo. Ogni impulso determinava una scintilla, ed ogni scintilla produceva un treno di oscillazioni smorzate.

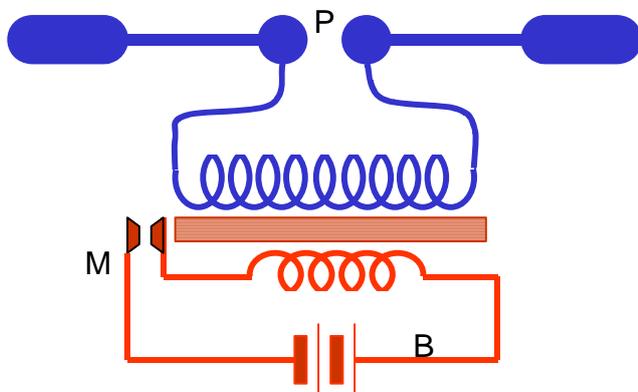


Si può facilmente intuire che il rapporto fra i due ritmi di eccitazione e di oscillazione poteva essere assai elevato: se ad esempio, consideriamo una frequenza di oscillazione pari a 100 KHz, ed una frequenza di eccitazione pari a 100 Hz, vediamo che fra un impulso e l'altro di quest'ultima ci

sarebbe posto per ben 1000 cicli di oscillazione; in pratica però era difficile ottenere più di 10 oscillazioni per ogni impulso, dato che la maggior parte di energia veniva utilizzata per essere irradiata e non rimaneva quindi disponibile all'interno del circuito. In definitiva, la durata di un treno di oscillazione smorzata risultava di gran lunga più corto rispetto al periodo di quiete del circuito, in cui questo rimaneva in attesa della scintilla successiva; e questa attesa era tanto più lunga, quanto maggiore era la frequenza di oscillazione.

Negli anni 80 del secolo 19° esistevano svariate macchine elettriche capaci di produrre scintille, ma Hertz e i fisici che ne ripeterono gli esperimenti utilizzarono soprattutto il **rocchetto di Ruhmkorff**. Questo apparecchio è sostanzialmente un trasformatore con un elevatissimo rapporto spire tra primario e secondario. Il circuito primario, avvolto su un nucleo di fili di ferro rettilinei, viene alimentato da una sorgente di tensione continua, interrotta ad intervalli brevi e regolari. L'interruzione viene attuata da un interruttore a martelletto, normalmente chiuso, che è posto sulla testa del nucleo di fili di ferro; quando questi per il passaggio della corrente si magnetizzano, il martelletto viene attratto e l'interruttore si apre. Ciò determina per induzione nel secondario una elevatissima forza elettromotrice, esaltata dal grande rapporto spire, capace di produrre nello spinterometro potenti scariche elettriche.

La scintilla scocca tra le sfere dello spinterometro P, che fa corpo unico con il cosiddetto **oscillatore di Hertz**. Questo è in realtà il cuore della grande intuizione del fisico tedesco: si tratta di un circuito risonante a costanti distribuite, nel senso che la componente induttiva e quella capacitiva non sono individuabili separatamente, ma sono entrambe contenute nella struttura lineare dell'elemento risonante, che oggi potremmo definire un dipolo simmetrico. Questa struttura, oltre a tutto, offre elevate capacità radiative, e ciò sicuramente agevolò le esperienze di Hertz circa le proprietà delle onde elettriche che dal suo oscillatore venivano irradiate.



In rosso il circuito primario, composto da poche spire di filo grosso, avvolte attorno ad un nucleo di fili di ferro rettilinei.
 In blu, il circuito secondario, composto da numerose spire di filo sottilissimo, collegato allo spinterometro P.
 La batteria B alimenta il primario attraverso l'interruttore a martelletto M.

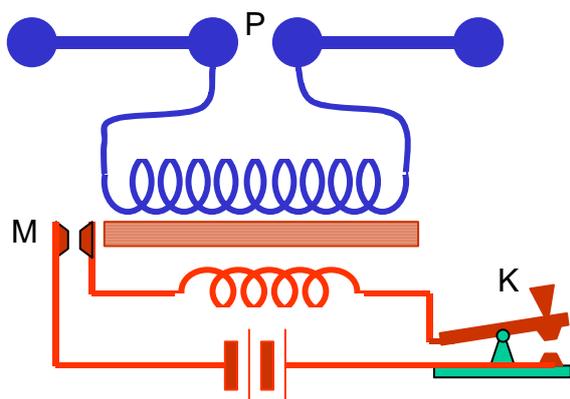
2. ***Gli esperimenti di Marconi.***

A partire dalla primavera del 1895, Guglielmo Marconi si cimentò nel ripetere gli esperimenti di Hertz, avendo avuto modo anche di vederne la replica presso il laboratorio di Augusto Righi, professore ordinario di Fisica presso l'Università di Bologna. Come già detto in altre parti, il giovane Marconi non intendeva dare contributi scientifici agli studi che fervevano in quell'epoca sui fenomeni dell'elettricità: semplicemente voleva mettere a punto un sistema capace di utilizzare in modo concreto le onde elettriche, e ciò significava sostanzialmente due cose:

1. individuare il modo per poter inviare informazione, sotto forma di messaggi intelligenti e intelligibili;
2. indagare sulla distanza a cui potevano giungere le onde elettriche, per la consegna a destinazione dei messaggi emessi in trasmissione.

Per il punto 1, Marconi applicò il criterio della telegrafia Morse, che all'epoca era estremamente diffuso come mezzo ordinario di comunicazione tra località anche molto distanti, con l'impiego di linee metalliche di comunicazione. Fili aerei in rame o bronzo fosforoso su palificazioni in legno congiungevano gli uffici postali, e anche tra i continenti le comunicazioni telegrafiche erano state rese possibili grazie ai cavi sottomarini. Inserendo il tasto K in serie alla batteria, l'emissione delle scintille avveniva secondo i tempi e i ritmi scanditi dall'operatore. In ricezione, Marconi applicò lo schema utilizzando il coherer, l'unico dispositivo conosciuto all'epoca in grado di rivelare un'onda radioelettrica. Il passaggio di corrente nel coherer agiva, attraverso un relè soccorritore, su una convenzionale macchina telegrafica scrivente che registrava il messaggio ricevuto sotto forma di punti e linee, su zona di carta. Ecco qui, dunque, il concretizzarsi della telegrafia senza filo. Indubbiamente, l'idea funzionava:

- chiudendo il tasto K, veniva alimentato il rocchetto di Ruhmkorff;
- la batteria generava la corrente che, interrotta ritmicamente dal martelletto M, determinava nel primario una corrente pulsante;
- ad ogni apertura del martelletto, si manifestava sul secondario una scarica elettrica tra le sfere P poste al centro dell'oscillatore;
- per la durata della scintilla l'oscillatore emetteva treni di onde elettromagnetiche con andamento in ampiezza smorzato e frequenza dipendente dalla geometria dell'oscillatore stesso;
- giunte sul dipolo ricevente D, le onde elettromagnetiche provocavano il passaggio di corrente nel coherer C (grazie alla coesione delle polveri in esso contenuto), e di conseguenza l'attrazione del relè soccorritore R;
- il relè soccorritore alimentava a sua volta il dispositivo elettromeccanico preposto all'utilizzazione del segnale ricevuto; in occasione dei primi esperimenti si trattava di un semplice campanello, che suonando durante il tempo in cui il tasto era abbassato, evidenziava l'avvenuta ricezione del messaggio; successivamente, nei sistemi commerciali, il campanello fu sostituito con la macchina telegrafica scrivente S;
- il secondo relè (o il campanello) avevano anche la funzione di picchiettare con un martelletto (Q in figura) il tubetto di vetro del coherer, con lo scopo di riportarlo nello stato di riposo in cui la polvere contenuta nel tubetto, priva di coesione, avrebbe cessato di lasciare fluire la corrente che manteneva in attrazione il relè soccorritore R.

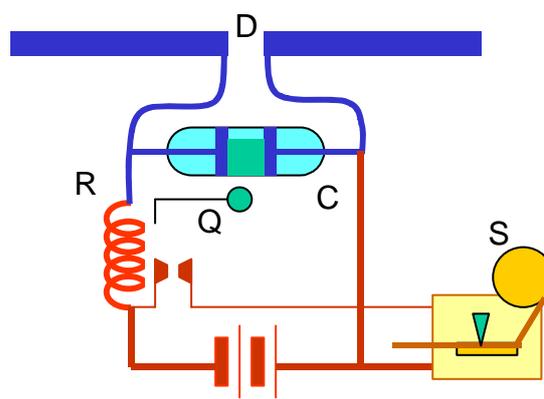


Sezione trasmittente

P = Dipolo di trasmissione

K = Tasto telegrafico

M = Martelletto elettromagnetico



Sezione ricevente

D = Dipolo di ricezione C = Coherer

R = Relè soccorritore Q = Martelletto

S = Macchina scrivente

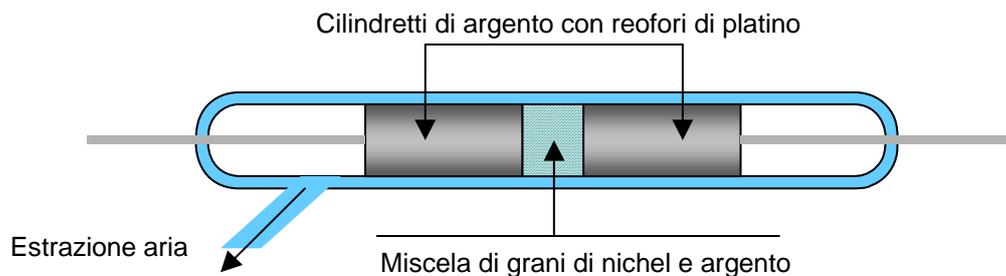
Si può quindi intuire che il sistema lavorava su tre diversi tempi:

- quello dell'operatore Morse, che chiudevà e rilasciava il tasto telegrafico con un ritmo di alcune decine di volte al minuto; a titolo di esempio, supponiamo che la durata di una linea fosse di 2 secondi;
- quello del martelletto, che determinava il numero delle scintille che intercorrevano nel tempo di chiusura del tasto; se ipotizziamo un ritmo di impulsi pari a 50 per secondo, riprendendo l'esempio precedente per la durata di una linea sarebbero occorse approssimativamente 100 scintille (ovviamente, l'operatore aveva la sensazione di una scintilla continua);
- quello dell'onda elettromagnetica; con un oscillatore lungo circa 60 cm, del tipo che Marconi utilizzò nei primi esperimenti, la frequenza corrispondeva a circa 250 MHz e quindi il numero dei treni d'onde (la cui durata era dell'ordine del microsecondo) per ogni scintilla era elevatissimo (alcuni milioni).

Il secondo punto (cioè la distanza coperta dal sistema) richiese invece un grosso lavoro, e rappresentò la parte predominante dell'attività e della genialità del giovane inventore bolognese. In realtà, dopo aver interconnesso gli "oggetti" visti sopra (così come risultavano già disponibili sulla piazza), pur in un "sistema" innovativo e funzionante, la distanza raggiungibile non avrebbe potuto superare che alcune decine di metri.

Un certo miglioramento fu ottenuto da Marconi utilizzando riflettori metallici a superficie cilindro-parabolica, nel cui fuoco stavano rispettivamente l'oscillatore da un lato, ed il dipolo ricevente avente il coherer al centro, dall'altro. Con questa disposizione la portata del sistema poté arrivare ad alcune centinaia di metri. Ma indubbiamente i miglioramenti risolutivi furono conseguiti con l'ottimizzazione del coherer e con l'introduzione dell'antenna.

Marconi migliorò dunque il coherer con un metodo tipicamente empirico: provò l'efficienza di polveri di diversi metalli, giungendo a scegliere una miscela di nichel (96 parti su 100) e argento (4%), i cui grani erano di dimensioni uniformi, ottenuta per setacciamento delle polveri.



Il contenitore era un tubetto di vetro lungo circa 5 cm, con diametro interno di 4 mm, al centro del quale i granelli metallici riempivano (senza stiparlo) lo spazio di circa $\frac{1}{2}$ millimetro compreso fra le facce di due cilindretti d'argento, che terminavano all'esterno del tubetto con due reofori metallici di platino. Altri accorgimenti consistevano nell'introduzione di una piccola quantità di mercurio, appena sufficiente per amalgamare le teste fra loro affacciate dei due cilindretti, e la riduzione della pressione interna del tubetto fino a circa un millesimo di atmosfera, ottenuta mediante una pompa aspirante che agiva attraverso una protuberanza laterale del tubetto, successivamente chiusa per saldatura del vetro.

Un coherer ben riuscito doveva mostrare una resistenza che da un valore a riposo praticamente infinito, passasse ad una resistenza di alcune centinaia di ohm quando sottoposto alle microscintille di un ordinario campanello elettrico posto ad un paio di metri di distanza. Coherer così collaudati erano il cuore del sistema marconiano, ne rappresentavano l'elemento più critico, più pregiato ed anche più costoso.

3. *Il sistema antenna-terra*

Nella ricerca di metodi per aumentare la distanza di trasmissione, nell'estate del 1895 Guglielmo Marconi fece alcune importanti scoperte.



Si accorse che i risultati sulla portata miglioravano se venivano aumentate le capacità su cui terminavano i conduttori sia dell'oscillatore che del coherer; per questa ragione, cominciò ad utilizzare grandi superfici metalliche connesse ai due poli dell'oscillatore, come lastre di ferro zincato (vedi foto a lato, Museo Marconi, Villa Griffone di Pontecchio Marconi - Bologna).

Ma il miglioramento risultava ancor più evidente qualora egli allontanasse fra loro le due lastre, e ancor più se una delle due fosse stata in contatto col suolo.

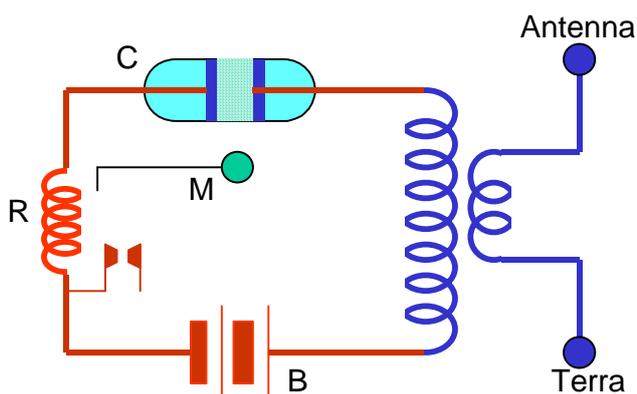
Giunse così a porre sotto terra una lastra collegata ad un polo dell'oscillatore, e sollevò l'altra su un supporto isolante realizzato con canne di bambù; questa lastra che rappresentava una capacità verso terra, fu via via sostituita con altri oggetti, come cubi metallici, che Marconi innalzò su un alto palo, e il miglioramento della portata di trasmissione risultò sorprendente, tanto da toccare la distanza di 2 km.

Con questo metodo "mediante la terra", come fu da lui definito, per distinguerlo da quello precedente "attraverso l'aria", Marconi abbandonò quello che oggi sappiamo fosse il campo delle onde ultracorte, focalizzate con metodi di ottica geometrica, per passare a lavorare con onde di lunghezza decisamente maggiore. Siamo nell'autunno del 1895, e Guglielmo Marconi aveva realizzato, con un lavoro frenetico di alcuni mesi, il nocciolo essenziale della sua invenzione: un apparato capace di trasmettere informazione, attraverso un'antenna in grado di lanciare a distanza onde elettromagnetiche.

Negli anni successivi la distanza di trasmissione aumentò progressivamente: determinanti furono le prove fatte a La Spezia con la Marina Italiana, in cui Marconi credette di poter definire una relazione tra la lunghezza del conduttore che formava l'antenna, e la portata del collegamento.

Come si può intuire, il sistema di Marconi operava su una frequenza grossolanamente definita dalle costanti distribuite dell'oscillatore e degli oggetti che vi erano connessi (sostanzialmente la lunghezza dei conduttori d'antenna). Ma egli non si preoccupava granchè di scegliere particolari lunghezze d'onda, se non in funzione dei risultati ottenuti in termini di lunghezza del collegamento. Già alcuni anni prima, però, il fisico inglese Lodge aveva affermato la necessità di "sintonizzare" i circuiti dell'oscillatore e del rivelatore. Considerando l'oscillatore di Hertz accoppiato al sistema antenna-terra, quanto più stretto è l'accoppiamento tanto maggiore è lo smorzamento dell'onda radioelettrica, e di conseguenza l'emissione dell'energia avviene entro una vasta gamma di frequenza, con un massimo in corrispondenza della lunghezza d'onda su cui l'oscillatore risuona. Su tale massimo, secondo Lodge, doveva venire sintonizzato il dispositivo ricevente, che presentava un massimo di sensibilità in corrispondenza della risonanza del dipolo che alimenta il

coherer. Lodge per primo comprese che questa "sintonia" sarebbe stato un fattore chiave per il futuro della radiotelegrafia. Guglielmo Marconi recepì l'avvertimento, e si preoccupò di fare in modo che le due antenne agli estremi dei suoi collegamenti sperimentali fossero il più possibile simili come disposizione e lunghezza dei fili. In aggiunta a ciò, con la collaborazione del prof. J.A Fleming, da lui assunto come consulente scientifico, Marconi introdusse tra l'antenna ed il coherer un avvolgimento supplementare per alzare l'impedenza del circuito d'antenna e quindi pilotare in tensione il coherer, ottenendo un effetto di amplificazione.



Il "jigger" (in blu) migliorava notevolmente l'efficienza del ricevitore: si trattava di un trasformatore in aria che, con un opportuno rapporto-spire, adattava la bassa impedenza dell'antenna a quella, assai più alta, del coherer.

L'avvolgimento lato coherer determinava anche una blanda azione di filtraggio dei segnali, in quanto con le capacità distribuite poteva essere portato a risonare sulla frequenza della portante da ricevere. Si trattava di una applicazione cosiddetta "sintonica".

Tale avvolgimento, chiamato "jigger", poteva modificare la frequenza di risonanza del sistema ricevente, realizzando dunque un "sistema sintonico". Il jigger dava quindi anche una parziale risposta al problema delle interferenze tra stazioni che stavano diventando sempre più numerose, e che si disturbavano a vicenda. Ad esempio, nel 1901 la necessità di introdurre sistemi di sintonia efficienti era diventata pressante: già le prove di trasmissione dalla stazione ad alta potenza di Poldhu per il tentativo di collegamento transatlantico interferivano con molti servizi attivi nel nord Europa.

4. *Gli apparati del collegamento transatlantico*

Determinato a tentare il grande esperimento di superare la distanza intercontinentale tra Europa e America, Marconi si affidò alla competenza di sir Ambrose Fleming, professore universitario ed esperto nelle applicazioni dell'elettricità. Se Marconi aveva dimostrato la possibilità delle onde radio di raggiungere distanze superiori alle cento miglia, nessuno ovviamente sapeva alcunché su come affrontare un collegamento di dimensione transatlantica. Per la stazione di Poldhu, che avrebbe ospitato gli apparati trasmettenti, Fleming ritenne come base di partenza che sarebbe stato necessario utilizzare una grande potenza, superiore a quella ottenibile con il classico rocchetto d'induzione, che alimentato con una ventina di celle voltaiche (circa 24 Volt), generava scintille non più lunghe di 25 cm.

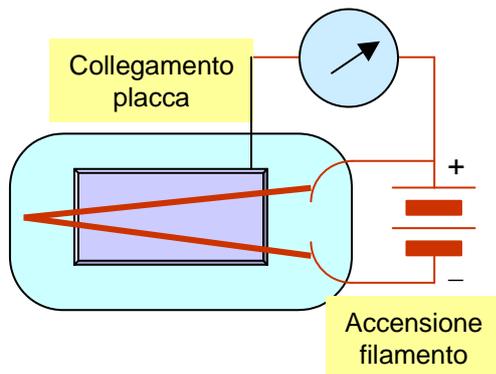
Fleming ordinò per la Marconi un motore da 25 cavalli, capace di azionare un alternatore con uscita a 2000 Volt, seguito da un trasformatore elevatore di tensione fino a 20.000 Volt. Questa tensione provocava la scarica nello spinterometro formato dalle due sfere metalliche. Lo spinterometro era quindi seguito dal "jigger", il cui secondario era poi connesso al sistema antenna-terra. In questo modo potevano essere indotte nel circuito secondario del jigger a seguito della scarica del condensatore sul circuito primario, potenti treni d'onda caratterizzati da elevate correnti sui fili dell'antenna.

La stazione ricevente era stata approntata a S. Giovanni di Terranova, un'isola sull'Atlantico prossima al confine con gli USA ma in territorio canadese,. Il coherer a polveri metalliche mostrò in questo caso tutti i suoi limiti, relativi soprattutto alla sua sensibilità alle scariche atmosferiche naturali. Fu però sostituito con esito soddisfacente da un nuovo tipo di coherer, che Marconi aveva

ottenuto dalla marina Italiana grazie all'interessamento del Tenente Solari; si trattava di un coherer in cui le polveri metalliche erano sostituite da una goccia di mercurio, sulla cui superficie galleggiava una fine polvere di carbone. A valle di questo dispositivo, che non necessitava di decoesione, venne usato un ricevitore telefonico, nel quale Marconi e i suoi assistenti poterono raccogliere, il giorno 12 Dicembre 1901, il debole suono della lettera S (punto-punto-punto nel codice Morse) inviata da Poldhu. L'esperimento era riuscito, pur utilizzando come antenna a Terranova un semplice filo appeso ad un aquilone, avendo una violenta tempesta distrutto la complessa antenna che era stata predisposta per l'esperimento transatlantico.

5. *La comparsa della valvola termoionica*

Nel 1884 Edison, noto per avere inventato la lampadina elettrica, studiava il modo per evitare l'oscuramento che si verificava all'interno del vetro a causa della progressiva evaporazione del filamento di carbone, e che produceva il noioso l'effetto di ridurre la luce emessa. Egli fissò nel bulbo, vicino al filamento incandescente, una piccola placca metallica collegata all'esterno con un filo di platino. L'effetto Edison, come fu chiamato, si manifestava in una piccola corrente che circolava tra la placca e il filamento, quando quest'ultimo era alimentato da una tensione continua.



L'effetto Edison, a cui l'inventore non seppe dare spiegazione: lo strumento rileva un piccolo passaggio di corrente quando venga connesso tra la placca e il polo positivo della batteria; nessuna corrente si ha collegandolo al polo negativo.

Oggi spieghiamo il fenomeno considerando che la tensione di placca risulta positiva rispetto al potenziale intermedio del filamento, ed attrae le cariche negative emesse da questo.

Successivamente – era il 1896 - il già menzionato prof. A. Fleming scoprì due interessanti fenomeni:

- il filamento emetteva una elevata quantità di particelle con carica elettrica negativa;
- la corrente notata da Edison poteva raggiungere la placca solo se questa veniva polarizzata con tensione positiva rispetto al filamento; nessuna corrente invece circolava se la placca era polarizzata con tensione negativa.

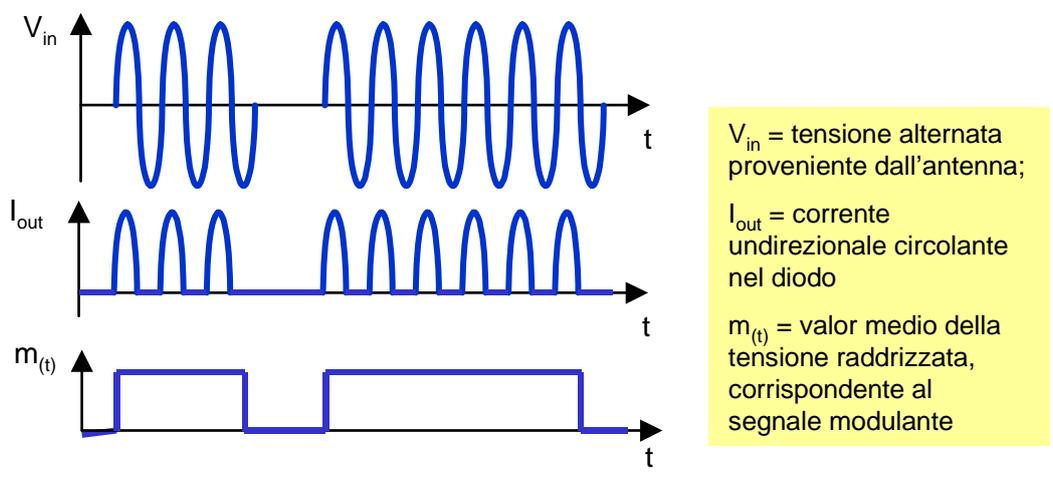
Occorre qui fare un passo indietro, per capire l'emissione termoionica. Come noto, nei materiali conduttori si manifesta la presenza di numerosi elettroni liberi, capaci di diventare portatori di corrente elettrica. Gli elettroni scorrono tra gli spazi interatomici, ma non possono uscire spontaneamente dalla superficie di separazione tra il metallo e lo spazio circostante in quanto trattenuti dal campo elettrico antagonista, una sorta di tensione superficiale, che si forma per la carica acquisita dal metallo. Esistono tuttavia condizioni in cui l'elettrone può superare il potenziale della tensione superficiale: o per l'azione di un campo elettrico intenso, oppure investendo il metallo con energia luminosa (effetto fotoelettrico), o sottoponendolo ad energia termica. (effetto termoionico).

Nella lampadina di Edison, l'emissione per effetto termoionico è secondario rispetto all'effetto principale, che è l'emissione di radiazione luminosa. Questo effetto viene ottenuto portando all'incandescenza un filamento metallico, ed evitandogli la reazione chimica con l'ossigeno dell'aria, che ne provocherebbe l'immediata fusione. Il vuoto realizzato nell'ampolla di vetro fa sì che il filamento, semplicemente, non riesca a fondersi, pur lavorando a temperature altissime.

Gli elettroni che l'emissione termoionica proietta all'esterno del metallo vi rimangono (prima di ricadervi), per un tempo brevissimo, ma ciò non evita che intorno al filamento incandescente si formi una sorta di nube elettronica detta carica spaziale.

Qualora però venga posto un opportuno elettrodo a forma di placca vicino al filamento, il quale venga polarizzato con una differenza di potenziale positiva rispetto a quest'ultimo, gli elettroni verranno attratti dalla placca, percorreranno il circuito esterno richiudendo la corrente sul filamento. Per analogia con l'elettrochimica, all'emettitore fu dato il nome di **catodo**, e alla placca quello di **anodo**.

Si trattava quindi di un effetto non lineare e unidirezionale, che trovò applicazione per rivelare i segnali telegrafici. Nel 1904 il prof. Fleming, consulente scientifico di Marconi, stava cercando di risolvere il problema di trasformare la debole oscillazione captata dall'antenna in una corrente unidirezionale capace di attivare il relè soccorritore, con un'azione quindi di "rettificazione". Come fulminea intuizione, si ricordò dei suoi studi del 1896 riguardanti il comportamento unidirezionale della lampadina di Edison con placca, studi che non avevano avuto ancora applicazioni pratiche, ed ebbe l'idea di utilizzarli per la rivelazione delle correnti oscillanti ricevute dalle antenne. Egli realizzò un dispositivo in cui, entro un'ampolla in cui era fatto il vuoto, si trovava un filamento di carbone circondato da una placca cilindrica e ne scoprì la capacità di rettificare tensioni ad alta frequenza, con eccellenti caratteristiche di sensibilità e di stabilità. Era nata l'era dei ricevitori "a valvola". Il dispositivo si comportava infatti come una valvola unidirezionale inserita in una conduttura d'acqua, cosicché fu chiamato "valvola" dallo stesso Fleming,



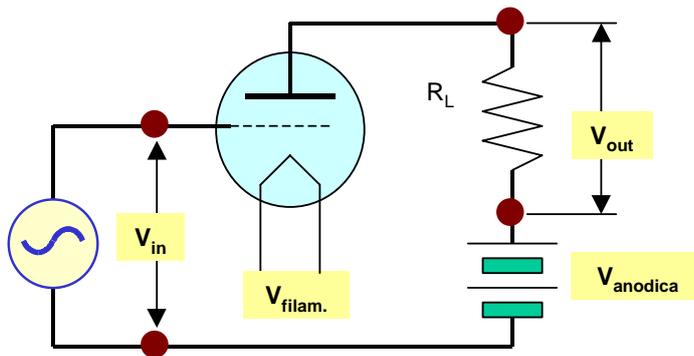
La "valvola di Fleming" riusciva dunque a trasformare le deboli tensioni ad alta frequenza ricevute dall'antenna (V_{in} in figura) in una corrente unidirezionale (I_{out}) il cui valore medio corrispondeva esattamente alla modulazione $m(t)$ (telegrafica o fonica) impressa sulla portante radio, sostituendo vantaggiosamente il coherer. Marconi intuì subito l'importanza ed il futuro di questa innovazione nel campo della TSF, e già nel 1905 il **diodo**, come fu chiamato genericamente in seguito questo dispositivo, veniva installato sui ricevitori della Marconi's Wireless Telegraph Company.

6. Dalla valvola di Fleming all'Audion di de Forest

Fu l'ingegno dell'americano Lee de Forest ad evolvere il diodo di Fleming nel **triode**, e a ciò pervenne nel 1906 aggiungendo al dispositivo un altro elettrodo, la **griglia di controllo**.

La griglia, realizzata con un sottile filo metallico a spirale interposto tra il filamento e la placca, consentiva di controllare la quantità degli elettroni che, emessi per effetto termoionico dal catodo, venivano attirati dall'anodo positivo.

All'inizio della sua storia, il triodo si dimostrò già un sensibile rivelatore di segnali a RF; solo nel 1912 lo stesso Lee De Forest, che lo aveva presentato sotto il nome di **audion**, intravvide e diffuse la possibilità di utilizzarlo come amplificatore.



Schema di amplificatore a valvola. La $V_{\text{filam.}}$ provvede a mantenere incandescente il filamento, per garantire l'emissione termoionica. La V_{anodica} mantiene la placca ad un potenziale positivo rispetto al filamento. La V_{in} applicata sulla griglia regola il passaggio della corrente anodica, e sulla placca le variazioni di corrente vengono raccolte amplificate sul carico R_L . Il rapporto $V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$ rappresenta l'amplificazione dello stadio a triodo.

Ponendo la griglia ad un potenziale uguale a quello del catodo, la sua presenza non esercita alcun effetto; dando invece alla griglia un potenziale negativo, si crea un campo elettrico che condiziona il flusso degli elettroni capaci di raggiungere l'anodo. Per valori fortemente negativi, si ottiene addirittura l'interdizione della corrente: nessun elettrone raggiunge la placca, tutti gli elettroni emessi dal filamento vi ricadono, e la corrente anodica è nulla. Polarizzando la griglia con tensioni comprese tra 0 volt e la tensione d'interdizione, piccole variazioni della tensione di griglia (quali, ad esempio, segnali alternati) ottengono forti effetti sulla corrente di placca, e in ciò si intuisce la capacità di amplificazione del triodo. Scegliendo opportunamente il punto di lavoro, il diodo agisce in modo differenziato sulle semionde positive e negative di un segnale a radiofrequenza, ottenendo l'effetto di rettificazione.

L'innovazione del triodo permise infine di ottenere oscillazioni di tipo persistente, proprio perché la sua capacità di amplificazione consentiva di compensare le perdite di un risonatore LC inserito nel circuito del triodo. Quando poi, in anni successivi, si poterono applicare le proprietà piezoelettriche del cristallo di quarzo, si poterono ottenere oscillatori ad onda continua dotati di grande purezza e stabilità.

In tempi successivi, il triodo conobbe importanti evoluzioni: per ottimizzare l'emissione termoionica le due funzioni di riscaldamento e di emissione assegnate all'elettrodo emettitore furono separate, nel senso che attorno al filamento fu posto un distinto elettrodo, il vero e proprio **catodo**, realizzato con particolari ossidi che, resi incandescenti dal filamento, presentavano ottime caratteristiche di emissione termoionica. Fu poi introdotta la **griglia schermo**, per limitare l'effetto di retroazione presentato dalla placca sulla griglia controllo, ed ottenere un funzionamento più stabile del tubo elettronico, che prese il nome di **tetrodo**; infine fu aggiunto, tra la griglia schermo e la placca, un elettrodo soppressore che collegato internamente al catodo, provvedeva a ridurre gli elettroni emessi dalla placca per emissione secondaria.

Gli elettroni emessi dal catodo pervengono con velocità assai elevata all'anodo, su cui l'energia cinetica del flusso elettronico si trasforma in calore: la placca dunque si riscalda notevolmente, e la valvola in generale richiede attenzione per la sua dissipazione termica. Il tubo elettronico completo dei cinque elettrodi descritti, prese dunque il nome di **pentodo**, che rappresentò la forma più completa ed evoluta nella storia delle valvole termoioniche.

Molti tipi di valvole furono sviluppate per impieghi specializzati:

- valvole dedicate a stadi riceventi per alta frequenza, richiesero una tecnologia utilizzando elettrodi di piccole dimensioni per limitare le capacità interelettrodiche;
- al contrario valvole per stadi trasmettenti richiesero una costruzione massiccia degli elettrodi, per facilitare lo smaltimento delle forti temperature che si creano soprattutto sull'anodo;
- valvole per utilizzo commerciale, costruite secondo schemi compatibili da molti costruttori specializzati, consentirono la realizzazione di apparati riceventi di costo contenuto, che decretarono il successo popolare della **radiofonia** a partire dagli anni 30 del 19° secolo;
- oltre ai classici triodi, tetrodi e pentodi, altre valvole più complesse vennero prodotte per raggruppare molteplici funzioni, come ad esempio doppi triodi per gli amplificatori BF e i triodi-pentodi utilizzati come oscillatori locali-convertitori nelle supereterodine;
- diodi di potenza, dotati di catodi studiati per l'emissione di forti correnti, furono realizzate per la rettificazione delle tensioni alternate industriali, al fine di ottenere tensioni continue con potenze rilevanti;
- valvole di piccolissime dimensioni furono realizzate per l'impiego in apparati ricetrasmittenti portatili, utilizzati soprattutto per scopi tattici nell'ambito delle forze Armate.



Già nella prima metà del XX secolo, tra le due grandi guerre, l'utilizzo della radio era in costante e rapida ascesa, dati i grandi interessi in campo commerciale e militare. In quegli anni, molti degli aspetti scientifici furono affrontati e approfonditi, soprattutto per dare veste scientifica alla radio-propagazione e ai dispositivi radianti.

A fianco: Museo Marconi (Villa Griffone – Pontecchio Marconi - BO) Radio rice-trasmittente Bardeloni utilizzata per i primi collegamenti tra aerei militari in volo e terra.

Le valvole termoioniche rappresentarono per almeno mezzo secolo il cuore della tecnologia elettronica, e anche per la pressione delle necessità belliche (si parla della 1^a e della 2^a Guerra Mondiale) esse consentirono un incredibile sviluppo delle potenzialità delle comunicazioni con le onde elettromagnetiche, fino al loro superamento tecnologico, decretato dall'avvento del **transistor**.

7. **Requisiti del moderno trasmettitore**

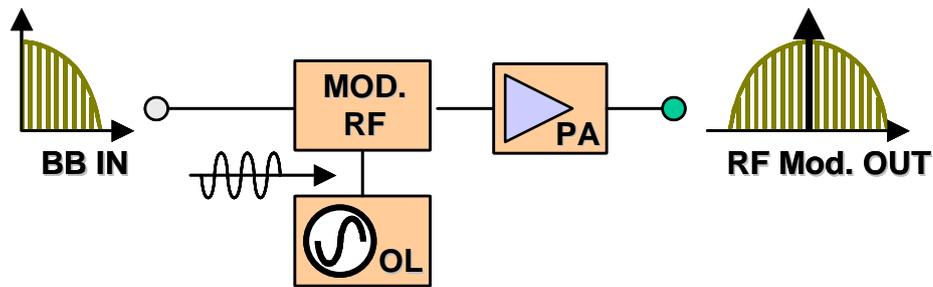
Come appendice al presente modulo, vorremmo dare alcune definizioni perché il lettore possa confrontare le attuali conoscenze con le realizzazioni tipiche dei primi tempi della radio, sopra descritte.

Il trasmettitore deve fondamentalmente rispondere ad alcuni requisiti:

- **generare una oscillazione** stabile e spettralmente monocromatica, che dovrà avere frequenza corrispondente al centro del canale radio scelto per la diffusione nello spazio dell'onda radioelettrica: a questa onda si dà il nome di **portante**.
- realizzare un'interazione tra la portante ed l'informazione che deve essere inviata a distanza. Questo interazione si attua mediante il **processo di modulazione**, nel corso del quale l'informazione, che chiameremo "modulante", deve imprimere le sue caratteristiche

sulla portante, e ciò deve avvenire mantenendo intatta la qualità dell'informazione, affinché nel processo opposto che si attua in ricezione, ovvero la demodulazione, l'informazione venga ripristinata nella forma quanto più possibile simile all'originale.

- Infine, è necessario che l'onda portante modulata disponga di un'energia sufficiente a superare la distanza che separa il trasmettitore dal ricevitore; in altre parole, la potenza con cui il trasmettitore alimenta l'antenna deve avere un livello abbastanza elevato, da superare le attenuazioni dovute sia ai sistemi radianti, sia allo spazio libero.



Nello schema a blocchi sopra riportato, i suddetti requisiti sono realizzati da tre stadi: OL è l'oscillatore locale, che genera la portante; Mod.RF è il modulatore a radiofrequenza, in cui avviene l'interazione tra la frequenza dell'OL ed il segnale modulante (BB); PA è l'amplificatore a radiofrequenza (Power Amplifier) capace di fornire all'onda modulata la necessaria potenza che alimentando l'antenna, consente al segnale modulato di superare l'attenuazione del collegamento e pervenire con livello sufficiente al ricevitore lontano.

8. *Requisiti del moderno ricevitore*

Anche un ricevitore ha alcuni fondamentali requisiti da rispettare:

- la **selettività**, una caratteristica essenziale per discriminare la portante desiderata fra i numerosissimi segnali che l'antenna ricevente può captare dallo spazio. Grazie ad una buona selettività, il ricevitore è insensibile ai segnali indesiderati, ovvero diversi da quello utile, e solo su questo punta la sua attenzione.
- La **sensibilità**, ovvero la capacità di rendere utilizzabile anche un segnale di ampiezza molto piccola, quale può essere un'onda portante che, a valle del suo tragitto tra antenna trasmittente e antenna ricevente, si presenta con una energia residua che è una parte piccolissima della potenza iniziale emessa dal trasmettitore.
- Infine, il ricevitore deve saper estrarre dalla portante modulata l'originario segnale informativo, grazie ad un **processo di demodulazione**, capace di salvaguardare nel modo migliore la qualità dell'informazione restituita.

I moderni ricevitori utilizzano quasi esclusivamente lo schema a **supereterodina**, che offre le migliori caratteristiche di selettività e sensibilità, insieme ad una grande adattabilità circuitale. Il suo principio si fonda sulla teoria della **conversione di frequenza**, che consente di trasferire lo spettro della portante ricevuta, dalla frequenza originale ad un diverso valore di frequenza, mantenendo inalterato il suo contenuto informativo.

A.M.