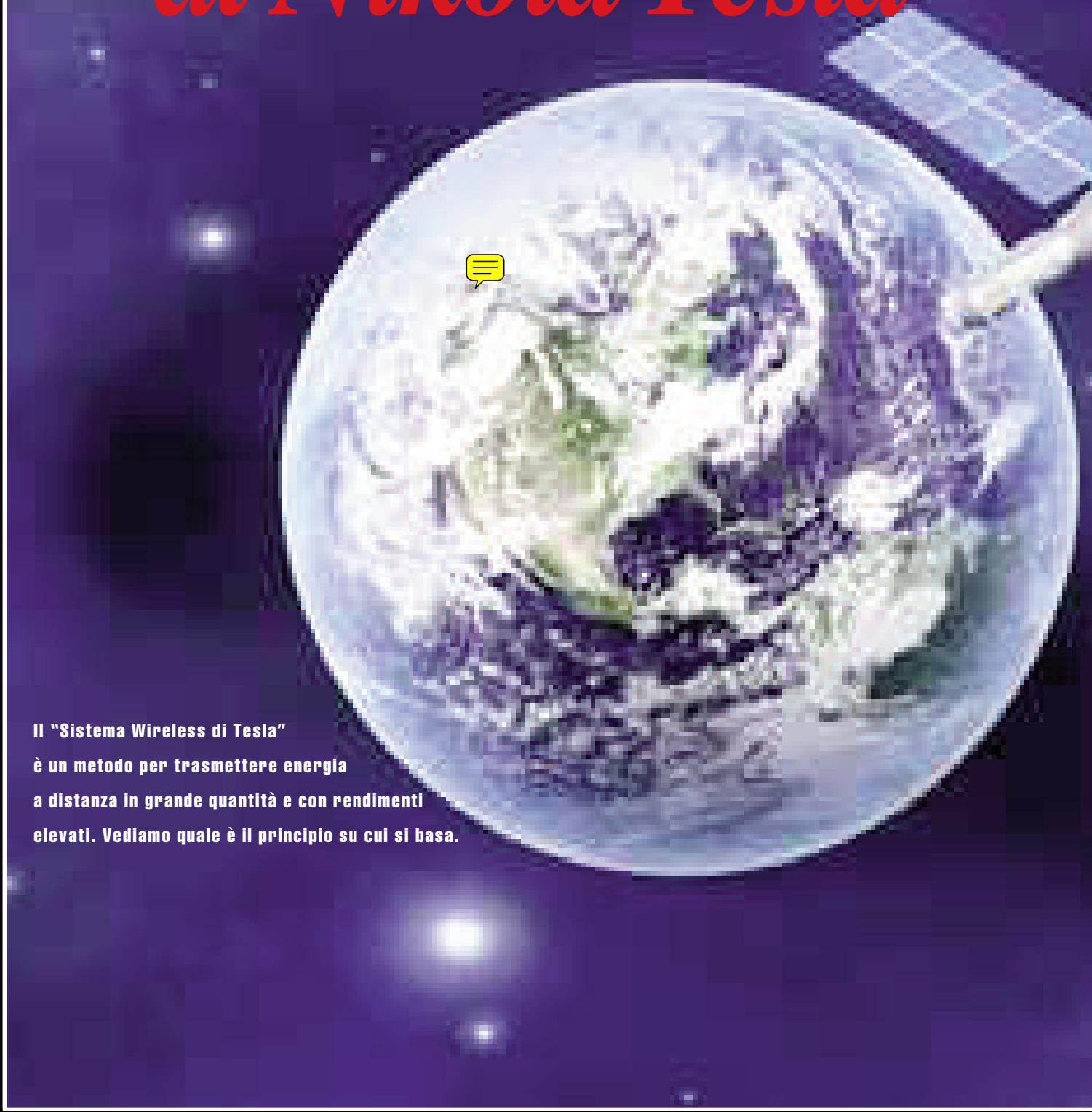
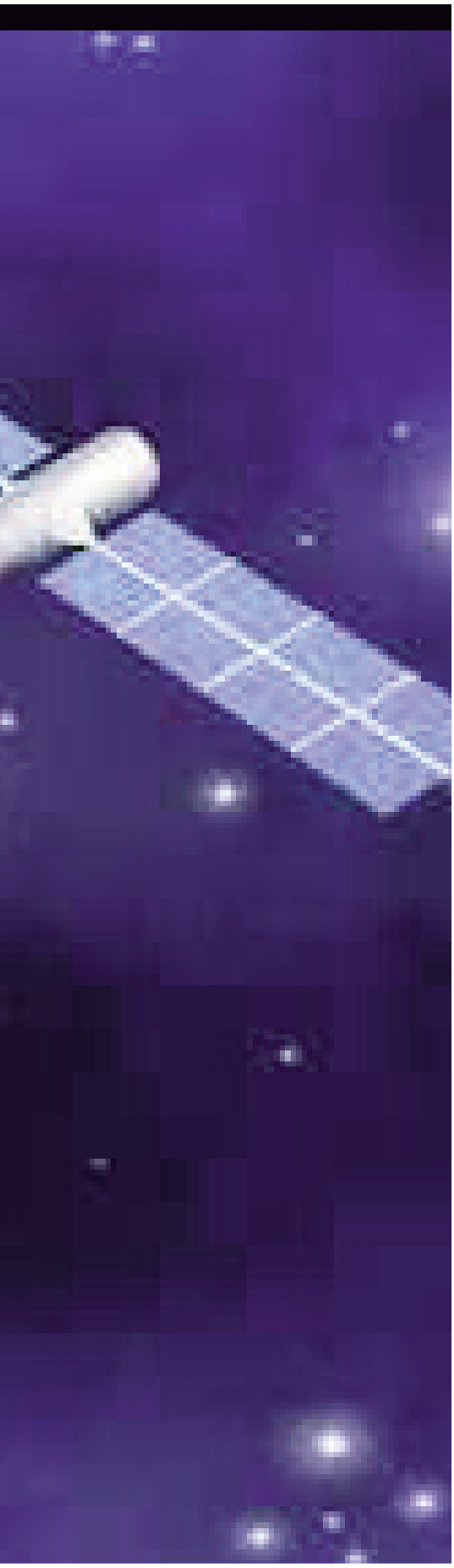
di DIEGO BARONE

Il WIRELESS di Nikola Tesla



Il "Sistema Wireless di Tesla" è un metodo per trasmettere energia a distanza in grande quantità e con rendimenti elevati. Vediamo quale è il principio su cui si basa.



Probabilmente l'idea di base prevedeva la possibilità di prendere un ricevitore adeguato, collocarlo in un qualsiasi posto ed avere l'energia elettrica di cui si aveva bisogno (un po' come in quella pubblicità dove un tizio fra tre buchi nella sabbia e attacca la spina). Detto così sembra una cosa fantascientifica, in realtà con questo articolo dimostreremo che è realmente realizzabile. Attenzione però: che sia realizzabile non vuol dire che si presti ad essere utilizzata correntemente e senza rischi! L'esperimento proposto in questo articolo utilizza tensioni estremamente elevate (dell'ordine del centinaio di kiloVolt), produce intensi campi elettromagnetici che possono alterare il funzionamento dei dispositivi elettronici fino a provocare dei guasti e, complici le scariche a corona, produce ozono. Quindi sarà necessario adottare le seguenti misure di sicurezza:

- Fate i vostri esperimenti lontani da apparecchiature elettroniche (e soprattutto da PACEMAKER)
- Evitate il funzionamento per lungo periodo in ambienti chiusi e preferite luoghi areati

RIFERIMENTI UFFICIALI: I BREVETTI E GLI ARTICOLI DI NIKOLA TESLA

A differenza di quello che si legge in rete, tutta le teoria che esporrò è basata sui brevetti di Nikola Tesla. Tali brevetti sono liberamente accessibili sia tramite wikipedia che tramite il sito dell'ufficio brevetti degli Stati Uniti (www.uspto.gov), per cui ritengo che non ci sia da discutere sulla loro attendibilità. Tesla ha ottenuto parecchie decine di brevetti, che spaziano dai generatori (e sistemi di regolazioni più o meno curiosi), ai motori, alle lampade (ad arco, a fluorescenza...), ai trasformatori (risonanti e non), ai sistemi di trasporto dell'energia elettrica. In questa sede ci interessano soprattutto i tre brevetti seguenti:

- Brevetto n°593138: "Electric Transformer" (1897)
- Brevetto n°645576: "System of transmission of electrical energy" (1900)
- Brevetto n°649621: "Apparatus for transmission of electrical energy" (1900)

A questi si aggiunge "The True Wireless": un articolo pubblicato su "The electrical experimenteer" del maggio 1919 che riassume un po' tutto l'argomento. Non so quanto sia ufficiale, anche se dal sottotitolo sembra che sia scritto dallo stesso Tesla, però quello che vi è scritto è in linea con i brevetti e fisicamente sensato. È una lettura molto piacevole, anche per via della vena marcatamente polemica nei confronti della teoria della propagazione di Hertz (che, con un po' troppo impeto, viene in qualche modo definita come una aberrazione della mente umana).

IL SISTEMA WIRELESS: LA TEORIA

Una precisazione: nel linguaggio (e nell'esperienza) di tutti i giorni associamo "wireless" con "senza conduttori". Quindi, "wireless" è il radiocomando che apre il cancello, "wireless" è il router wlan, "wireless" è il cellulare. E tutte queste cose, in effetti, funzionano senza che vi sia un vero e proprio conduttore che collega i vari apparecchi fra loro. Però, niente vieta di pensare a "wireless" come "senza fili", e non è la stessa cosa: perché ci porta diritti diritti al concetto di wireless secondo Tesla!

Tutto ha origine col brevetto n° 593138 (il primo della lista). In esso, Nikola Tesla

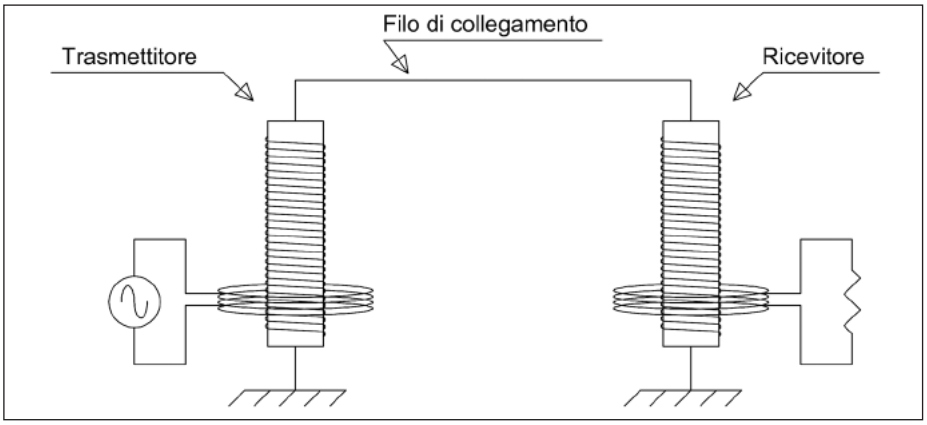


Figura 1: sistema di trasporto energia – brevetto 593138.

propone un sistema di trasporto dell'energia elettrica caratterizzato da:

- Trasporto dell'energia alla tensione più alta possibile in maniera da ridurre la corrente, poter usare conduttori di sezione inferiore e ridurre comunque le perdite. Idea semplice e geniale (usata tutt'ora negli elettrodotti di tutto il mondo) per l'epoca era innovativa e minava alle fondamenta tutto il sistema in corrente continua di Edison. Vi invito a cercare in rete la storia della "guerra delle correnti" fra Tesla ed Edison
- Utilizzo della terra (intesa come il pianeta terra) come conduttore in modo. In questo modo, poiché stiamo trattando di un sistema monofase, l'elettrodotto viene ad essere costituito da un solo conduttore (intendiamoci: "un solo conduttore" è visibile, l'altro è … "annegato" nel suolo)
- Utilizzo dei trasformatori risonanti in alta frequenza per l'innalzamento della tensione (che all'epoca erano decisamente il metodo più semplice per disporre di enormi tensioni pur contenendo i problemi dell'isolamento).

In sostanza, Tesla proponeva il sistema della **figura 1**. Il vero colpo di genio è nell'utilizzo della terra: un conduttore enorme, presente ovunque, contattabile con un semplice paletto e gratis. Perché non sfruttarlo? A questo punto, facciamo un passo avanti con un breve ragionamento:

- riusciamo a trasmettere potenza con una corrente piccola quanto vogliamo (basta salire con la tensione, almeno in linea di principio)
- in linea teorica, la corrente di cui abbiamo bisogno potrebbe anche essere ridotta quasi a zero
- sempre in linea teorica possiamo usare la frequenza che più ci aggrada
- accettando una caduta di tensione (che comunque può essere ridotta quasi a zero giocando opportunamente su frequenza di lavoro e corrente circolante) il conduttore può essere sostituito con un condensatore.

E così arriviamo ai due brevetti n° 645576 e 649621, nei quali viene proposto il sistema della **figura 2** I due elettrodi sferici sulla sommità dei trasformatori in alta frequenza costituiscono sia una capacità verso massa sia, cosa molto più importante, un vero e proprio condensatore che "collega" il circuito trasmettitore a quello ricevitore. Quanto vale questa capacità? Sicuramente dipende dalle dimensioni delle sfere, dalla distanza, dall'altezza dal suolo, ma in linea di principio il valore non ci interessa perchè, se anche fosse estremamente piccolo, sarebbe sufficiente innalzare la tensione e la frequenza per far sì che la corrente trasferibile tramite l'accoppiamento capacitivo sia sufficiente a far funzionare il carico. Questo è il SISTEMA WIRELESS di TESLA. Wireless nel senso di "senza fili". Perfettamente funzionante e giustificabile con tutte le leggi della fisica oggi universalmente accettate e riconosciute, e non tira in ballo le storie di fantafisica che si leggono in giro per la rete:

- utilizza un meccanismo di conduzione (a differenza della radio di Marconi che sfrutta la propagazione delle onde elettromagnetiche). Proprio questo fatto è alla base della polemica con Hertz (cfr. "The True Wireless") e delle affermazioni sulla teoria della propagazione

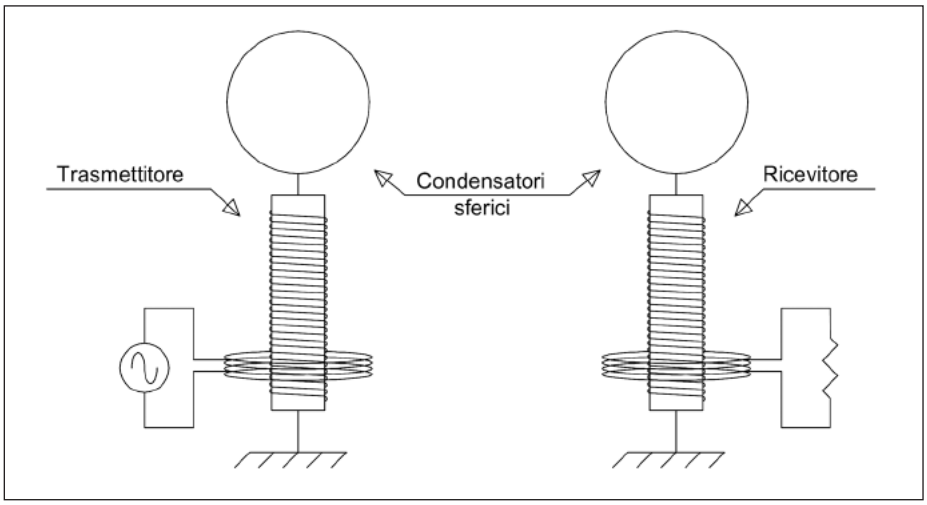


Figura 2: Sistema di trasporto energia – brevetti 645576 e 649621.

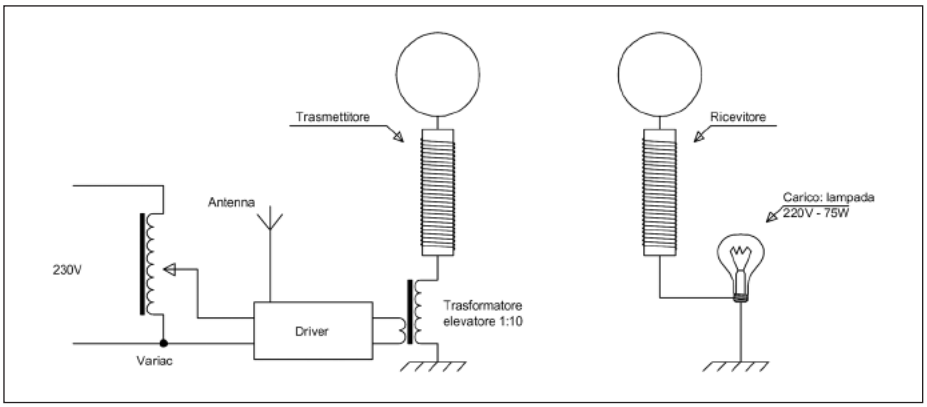


Figura 3: schema di principio dell'apparato sperimentale.

Figura 4: Foto di uno dei primi setup dell'esperimento.

Figura 5: "first lighting" dell'esperimento.

• grazie al meccanismo di conduzione può arrivare a trasferire potenze elevate con rendimenti elevati

• rendimenti elevati ma sempre inferiori all'unità, questo sia chiaro. Da molte parti sul web si legge di presunti "overunity" e di energia che si crea da sola ...

Ma è davvero tutto qui? Si e no. In realtà, nei brevetti considerati si legge anche che Tesla suggerisce la possibilità di sfruttare gli strati alti dell'atmosfera (che sono conduttori perchè ionizzati dai raggi solari e dai cosmici) per stabilire un percorso conduttore che aumenti l'accoppiamento fra trasmettitore e ricevitore. Dal punto di vista di Nikola Tesla è "semplice" perchè è sufficiente realizzare tensioni estremamente elevate. Quanto "estremamente"? Non so dirlo. Certo è che la sua torre Wardencliffe era alimentata con diverse centinaia di kW ed aveva dimensioni abbastanza imponenti, e probabilmente produceva tensioni dell'ordine dei MV. Inoltre, nei brevetti si legge che i suoi esperimenti sono stati condotti con bobine avvolte con 50 miglia di filo, pari a 80km, e che tale lunghezza doveva essere pari ad un quarto della lunghezza d'onda e questo ci porta anche un'altra considerazione. Un trasmettitore di Tesla che lavori in questo modo produce nello spazio un'onda stazionaria che ha

• massimo di tensione sull'elettrodo di alta tensione

• massimo di corrente 80km più in là ... cioè più o meno nella zona della ionosfera

Pertanto, in linea di principio, il trasmettitore di Tesla (così come suggerito nei brevetti) potrebbe funzionare da adattatore di impedenza fra il generatore e gli strati della ionosfera. A quel punto, la ionosfera diventa un conduttore che copre tutto il pianeta. Tale conduttore (connesso al generatore per mezzo del trasmettitore) è il vero e proprio elettrodotto al quale si possono agganciare liberamente tutti i ricevitori eventualmente disposti in giro per il mondo. Tutto qui! Il sistema di Tesla ha un base scientifica giustificabile ed accettabile. Ma soprattutto è facilmente realizzabile, soprattutto se lasciamo perdere i contributi della ionosfera (argomento estremamente interessante, ma di difficile gestione, se non altro per le dimensioni e i costi che comporta).

Figura 6: assorbimento del driver durante la prima accensione.

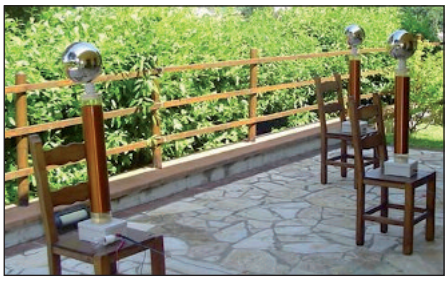


Figura 7: prove all'aperto – il setup dell'esperimento.

Figura 8: particolare della bobina trasmettitore.

Figura 9: particolare di una delle due bobine ricevitore, notare che la lampada è in serie al collegamento di terra.

Figura 10: particolare del picchetto di terra, una barra di rame lunga 1 metro, conficcata nel terreno e abbondantemente innaffiata.

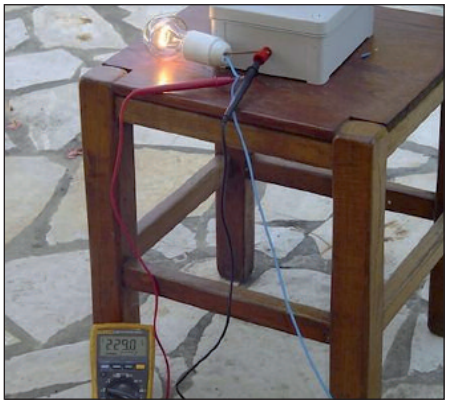


Figura 11: particolare di una delle lampade sui ricevitori.

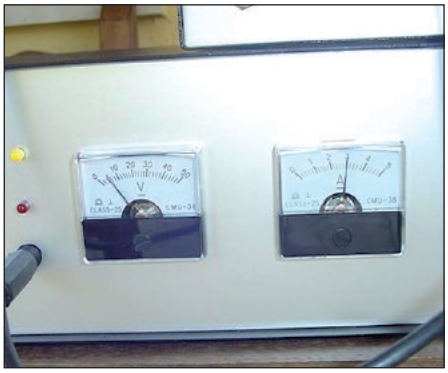


Figura 12: potenza assorbita dal driver durante le prove all'aperto.

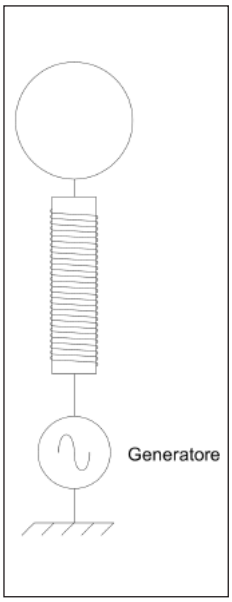


Figura 13:
Il Tesla Magnifier.

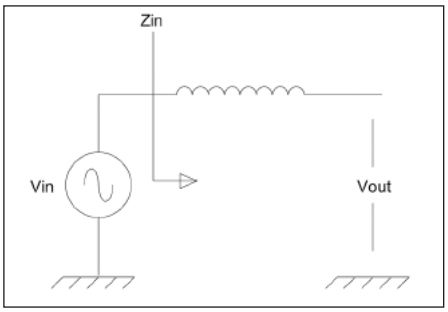


Figura 14: errata rappresentazione del Tesla Magnifier.

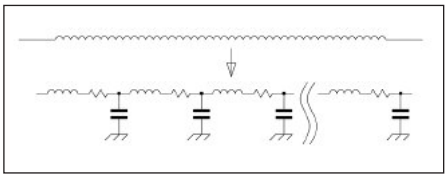


Figura 15: Rappresentazione del Tesla Magnifier a parametri distribuiti.

L'APPARATO SPERIMENTALE: I RISULTATI

Il modello che ho effettivamente costruito è composto da:

- un trasmettitore composto da una bobina risonante a circa 200kHz caricata da una sfera del diametro di 200mm. La bobina è alimentata da un driver a pll. Il driver è a sua volta alimentato da un variac in modo da regolare la potenza irradiata.
- uno o più ricevitori costituiti da una bobina e da una sfera identiche a quelle usate sul trasmettitore. La bobina alimenta una lampada a incandescenza da 75W a 220V
- per il momento non ci sono regolazioni della frequenza di accordo dei ricevitori: sbagliato, visto che l'uguaglianza delle frequenze di risonanza è uno dei fattori chiave per il corretto funzionamento. Ma almeno in questa fase ho ritenuto di poterli trascurare
- sempre per il momento non c'è alcun metodo per l'adattamento del carico: anche questo non è corretto, ma in questa fase verranno sempre e solo impiegate le lampade a incandescenza.

E il tutto è arrangiato secondo lo schema elettrico della **figura 3**. Nella **figura 4**, l'apparato sperimentale usato per le prime prove

- la bobina al centro è il trasmettitore
- le due bobine ai lati (e in secondo piano) sono i ricevitori
- subito in primo piano si vede il driver a pll e, sopra, lo scatolotto del variac
- la scatola grigia subito dietro il variac contiene il trasformatore di accoppiamento fra driver e bobina trasmettitore
- la scatolina nera (con un pulsante) che si intravede davanti al driver è il pulsante del comando remoto: premendolo si attiva il driver
- il cavo nero che entra nel driver arriva da un'antenna a stilo che viene usata per prelevare il segnale di aggancio del pll

Nella **figura 4** trovate ancora una foto dei primi setup.

- sulla sinistra, vicino al termosifone, c'è l'antenna a stilo
- la scatola grigia fra bobina trasmettitore e driver contiene il trasformatore di accoppiamento
- gli elettrodi sferici sono montati su isolatori in porcellana: è un vezzo puramente estetico
- le bobine sono ancora prive di una base
- alla base della bobina ricevitore di sinistra si vede la lampadina (220V-75W) usata come carico (ce n'è un'altra identica sulla bobina ricevitore di destra)
- la distanza fra la bobine è all'incirca di 1 metro (aumentandola, l'influenza delle pareti si fa troppo evidente e impedisce il corretto accordo delle bobine)

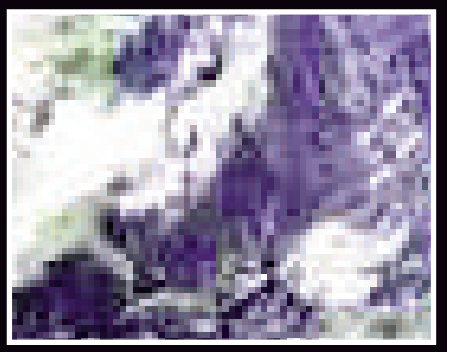
Nella **figura 5** il sistema è in funzione e accende a piena luce le lampade usate come carico. La **figura 6** mostra che il driver, alimentato a 100V, assorbe più o meno 1.8°. Le foto precedenti mostravano il sistema durante le prime prove condotte al chiuso. Con l'arrivo della bella stagione è giunto anche il momento di provare il sistema all'aperto. Pertanto:

- le bobine sono dotate di base di sostegno e sono collocate su una sedia in modo da portarle a una sessantina di centimetri di altezza
- la distanza fra la bobina trasmettitore e ciascun ricevitore è dell'ordine dei due metri e mezzo
- le due bobine ricevitore distano più o meno 5 metri

OK: fuoco alle polveri. La **figura 11** dimostra che la lampada collegata al ricevitore è alimentata a 230V efficaci (il multimetro è un "true RMS" e ho verificato che funziona abbastanza bene anche ai 200kHz di lavoro del sistema). Infine ... la **figura 12** dimostra che il driver assorbe all'incirca 3A a 55V, quindi attorno ai 165W, che, considerando 150W totali recuperati sulle lampade, mi danno un rendimento del 90%! Probabilmente è un valore un po' ottimistico, ma decisamente realistico. Rispetto al funzionamento dentro casa il rendimento è chiaramente aumentato per vari motivi fra cui mi sento di citare i seguenti:

- le bobine risentono molto meno della vicinanza della pareti, pertanto la frequenza di risonanza di ciascuna bobina è molto più simile e questo consente un migliore accoppiamento
- complice la maggiore altezza da terra è ridotta anche la capacità delle bobine verso massa riducendo nel contempo la quota di energia che viene "buttata" direttamente a terra

Tutto questo dimostra chiaramente il funzionamento del sistema wireless di Tesla! Al crescere della distanza si osserva che l'accoppiamento diminuisce e la potenza trasferita si riduce velocemente. Ho verificato che portando la distanza fra trasmettitore e ricevitore fin verso i 4m ... nel mio modello riesco ad accendere al massimo una lampada da 10W. Inoltre c'è da stare attenti alle scariche a corona, sempre in agguato a causa delle elevate tensioni con cui stiamo lavorando. Il sistema funziona bene e con ottimo rendimento fino a che le scariche a corona sono assenti. Di fatto, potendo regolare la potenza erogata dal driver con continuità si osserva che



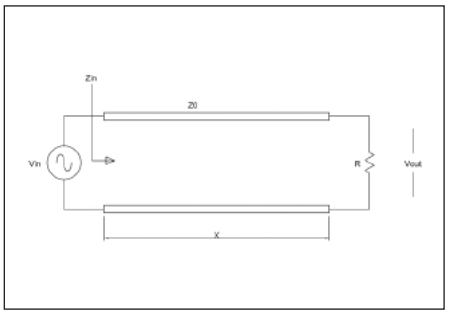


Figura 16: La linea di trasmissione.

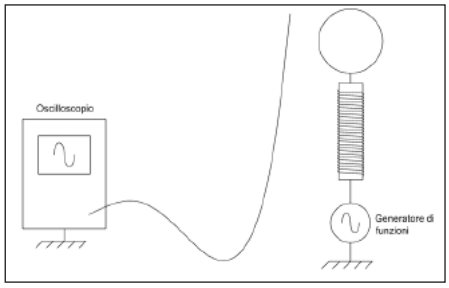


Figura 17: l'esperimento descritto nel testo.

- c'è una certa soglia di potenza oltre la quale si innesca la scarica a corona sul trasmettitore
- al di sotto di questa soglia, c'è una diretta proporzionalità fra la potenza erogata dal driver e quella recuperata ai carichi
- oltre questa soglia, un aumento della potenza del driver comporta un aumento della lunghezza delle scariche a corona, ma la potenza recuperata sui carichi rimane pressochè invariata

L'APPARATO SPERIMENTALE: TEORIA DI FUNZIONAMENTO

Prima di pubblicare i dettagli di realizzazione del modello sperimentale, è necessario approfondire la teoria di funzionamento della bobina di Tesla. La trattazione analitica non è complessa, ma piuttosto lunga. Invito gli interessati a consultare il mio sito (www.diegobarone.it). In questa sede mi limito ad una trattazione qualitativa e soprattutto intuitiva, senza far uso di equazioni. La Bobina di Tesla è forse lo strumento fisicamente più semplice per ottenere delle tensioni estremamente elevate. In generale è costituita da due avvolgimenti e in molti ritengono che funzioni in maniera analoga ad un trasformatore. In realtà le cose sono piuttosto diverse. Infatti la bobina di Tesla funziona anche se alimentata direttamente dal lato "freddo", senza nessun avvolgimento "primario". Questa configurazione è spesso indicata come "tesla magnifier" e, apparentemente, sembra che corrisponda ad un semplice induttore connesso in serie al generatore come nella **figura 15**. Apparentemente, il circuito è aperto, non circola corrente e la tensione di uscita dovrebbe coincidere con la tensione sul generatore Vin. Invece non è così: si osserva che alimentando la

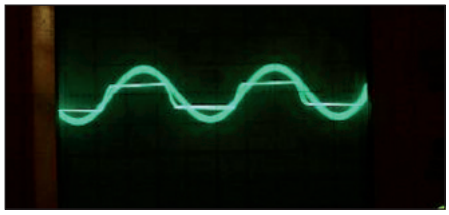


Figura 18: Legame fra tensione di alimentazione e di uscita a frequenza inferiore alla risonanza.

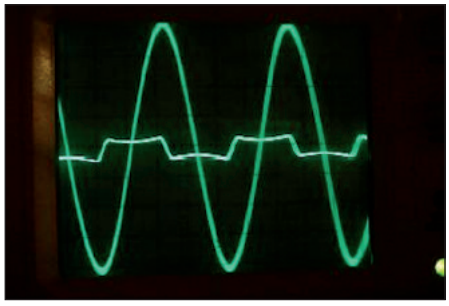


Figura 19: Legame fra tensione di alimentazione e di uscita alla frequenza di risonanza.

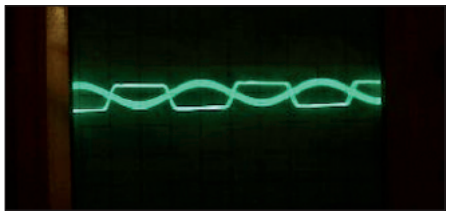
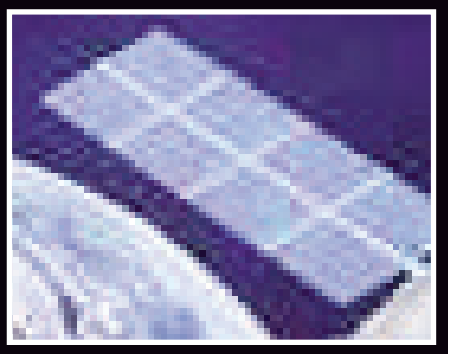


Figura 20: Legame fra tensione di alimentazione e di uscita a frequenza superiore alla risonanza.

Figura 21: l'elevato campo elettrico irradiato accende una lampada al neon.



bobina ad una ben precisa frequenza (che da ora in avanti chiamerò “frequenza di risonanza” e indicherò con f0), sul terminale libero si manifesta una tensione molto elevata che dipende sia dalla tensione Vin, sia da parametri fisici della bobina (come rapporto fra diametro e lunghezza, sezione del filo, eventuale spaziatura fra le spire …). Questo fenomeno è possibile perché la bobina deve essere pensata come un “circuito a parametri distribuiti”: un circuito, cioè, composto in realtà da tante “piccole” celle collegati in cascata. Se assumiamo che ciascuna cella sia assimilabile ad una spira:

- le resistenze tengono conto della resistenza del filo per ciascuna spira
- le induttanze tengono conto dell’induttanza di ciascuna spira
- le capacità tengono conto della capacità verso massa
- a rigore andrebbero considerate anche le capacità fra spire adiacenti, con il solo effetto di complicare il disegno, perché ai fini del ragionamento che segue non cambia assolutamente niente.

Con questa rappresentazione, anche se un terminale della bobina viene lasciato libero esistono sempre e comunque dei percorsi chiusi nei quali può circolare corrente. Per studiare come si comporta questo circuito occorre utilizzare la “teoria delle linee di trasmissione”. Consideriamo che un segnale elettrico si propaga lungo la linea con una velocità finita (inferiore alla velocità della luce). Supponiamo quindi di prendere una linea di una certa lunghezza, di chiudere un’estremità su una resistenza R e di alimentare l’altra estremità con un generatore di tensione. Lungo la linea si instaurano due flussi di energia:

- un primo flusso (che chiameremo DIRETTO) che parte dal generatore e si propaga lungo la linea verso il carico
- un secondo flusso (che chiameremo RIFLESSO) che, a partire dal carico, torna indietro verso il generatore. Tale flusso di energia è causato dalla discontinuità che il segnale incontra nel passare dalla linea al carico.

Per tener conto di questi due flussi di energia, ci “inventiamo” la tensione diretta V_d e la tensione riflessa V_r. Poichè la tensione diretta V_d si propaga verso il carico, mentre la tensione riflessa si propaga verso il generatore si osserva che, muovendoci dal carico verso il generatore

- V_r è caratterizzata da un ritardo di fase e da un’attenuazione proporzionali alla distanza dal carico
- V_d invece, man mano che ci allontaniamo dal carico, ha ampiezza crescente e subisce un anticipo di fase

In ogni punto della linea, la tensione misurata è data dalla somma fra le due componenti V_r e V_d (poiché l’energia “in gioco” è in definitiva legata alla somma fra i due flussi di energia). Ma poiché V_r e V_d subiscono continue rotazioni di fase, in alcuni punti la somma può avvenire con segno concorde, mentre in altri con segno opposto. Come risultato, la tensione lungo la linea è continuamente variabile fra un massimo e un minimo. Data una linea e un carico, i punti di massimo o di minimo si trovano in posizioni fisse. Per questo si dice che la linea è sede di un’onda stazionaria. Così come per le tensioni, si possono definire anche i due flussi di corrente DIRETTA (I_d) e RIFLESSA (I_r) che sono legati ai flussi di tensione tramite l’impedenza caratteristica della linea (Z_0): $V_d = I_d Z_0$ e $V_r = I_r Z_0$ .La corrente in ogni punto della linea è data dalla somma dei due flussi di corrente, tuttavia, laddove i flussi di tensione si sommano, i flussi di corrente si sottraggono. In ogni punto della linea, il rapporto fra la tensione e la corrente fornisce l’impedenza “vista” in quel punto. Tale impedenza è evidentemente diversa dall’impedenza caratteristica e varia da punto a punto. Può assumere valori più grandi o più piccoli di Z_0 e, sotto certe condizioni, può tendere anche all’infinito o a zero. Consideriamo un caso particolare caratterizzato da:

- carico infinito: la linea è lasciata aperta.
- la frequenza di lavoro è tale che la lunghezza della linea è pari ad un quarto della lunghezza d’onda.

In tal caso, non potendo trasferire energia al carico, il flusso di energia riflessa è uguale al flusso di energia diretta. Analogamente, $V_r = V_d$ e $I_r = I_d$ col risultato che sul carico non circola corrente. Ma poiché i flussi di tensione e corrente possono sommarsi o sottrarsi, troveremo, lungo la linea, dei punti in cui la tensione è nulla e la corrente massima e altri punti in cui la tensione è massima e la corrente nulla. Dal rapporto troveremo quindi dei punti in cui l’impedenza è infinita e

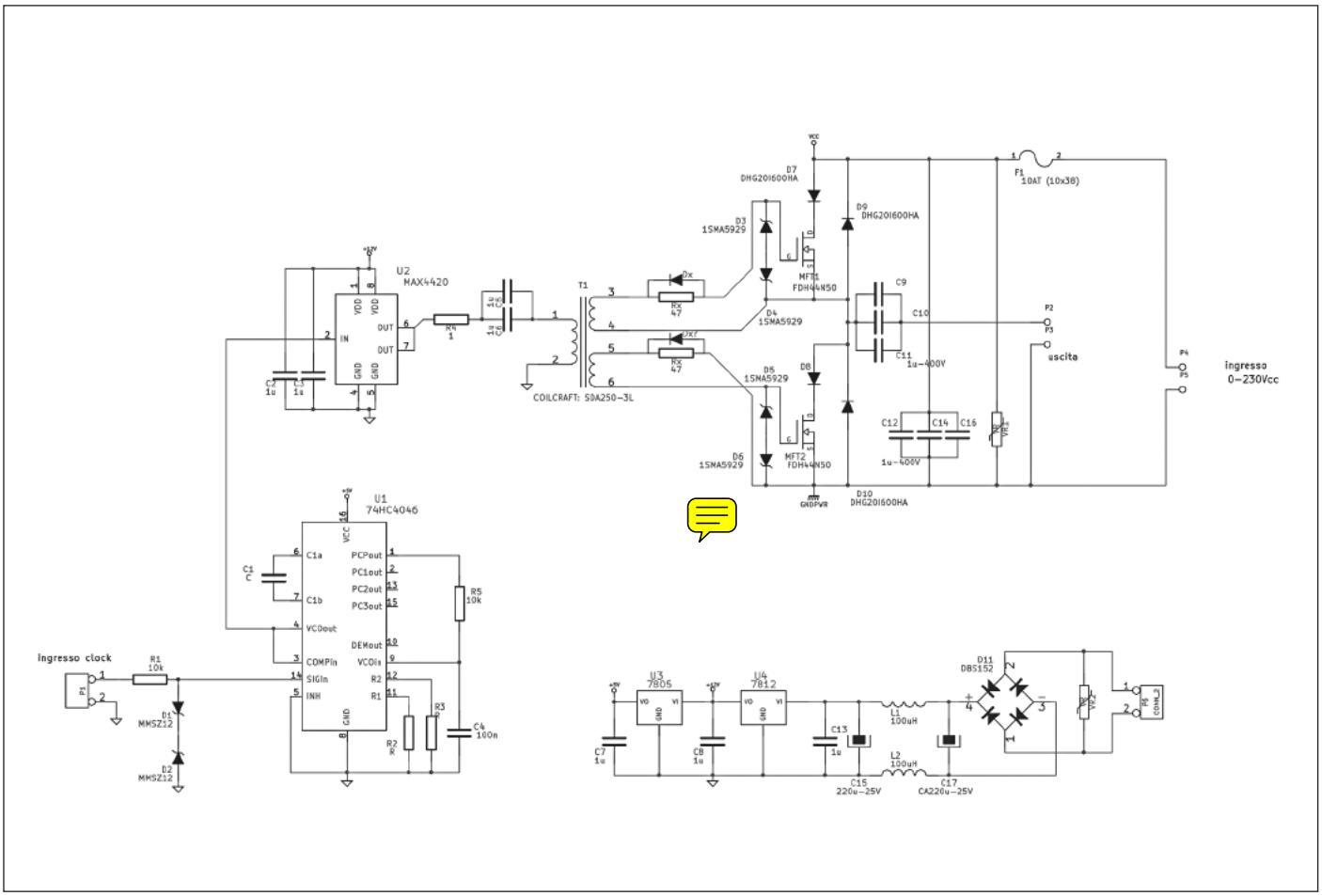


Figura 22: Schema elettrico del driver.

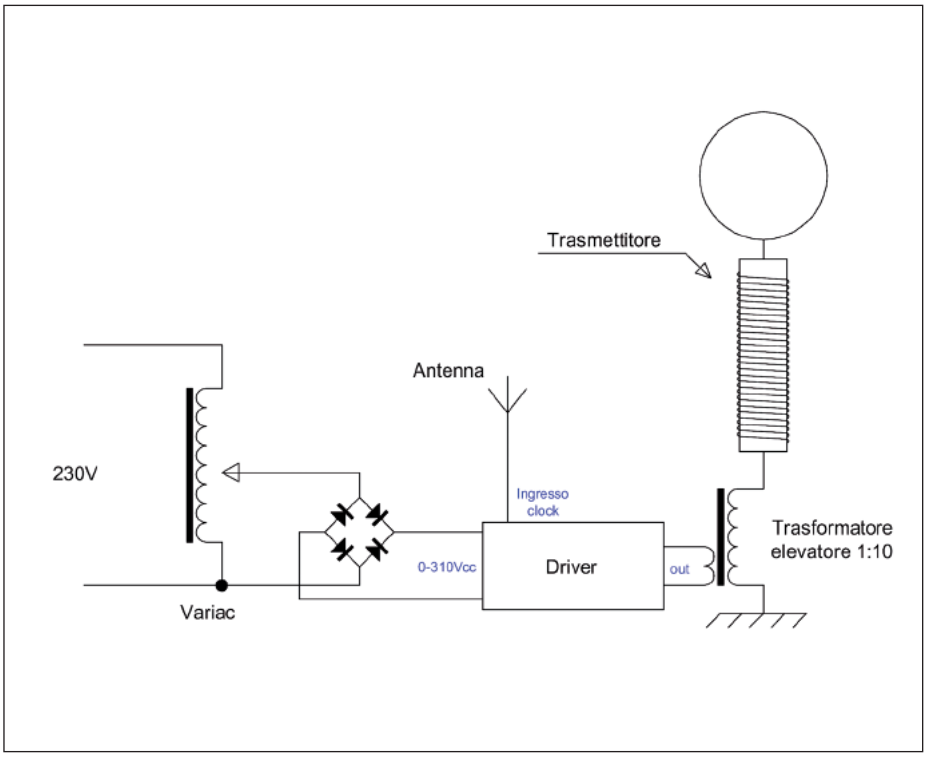


Figura 23: schema di collegamento del driver.

altri punti in cui l'impedenza è nulla. In più ci saranno tutti i valori intermedi. In particolare, all'ingresso della linea l'impedenza sarà nulla: il generatore lavorerà pressoché in cortocircuito instaurando una corrente molto elevata, di conseguenza le stesse correnti I_d e I_r saranno molto elevate, così come i flussi di tensione V_d e V_r. Pertanto a fine linea (laddove le correnti si sottraggono mentre le tensioni si sommano) la tensione raggiungerà valori molto alti. Infine un cenno alla fase. Per la definizione di lunghezza d'onda, su un tragitto lungo esattamente una lunghezza d'onda il segnale subisce una rotazione di fase di 360°. Di conseguenza, su un tragitto lungo un quarto di lunghezza d'onda, la rotazione sarà di 90°. Questo porta a concludere che la tensione a fine linea dovrà essere sfasata di 90° in ritardo rispetto alla tensione del generatore.

Per verificare la validità di queste affermazioni, ho preso una bobina avvolta su

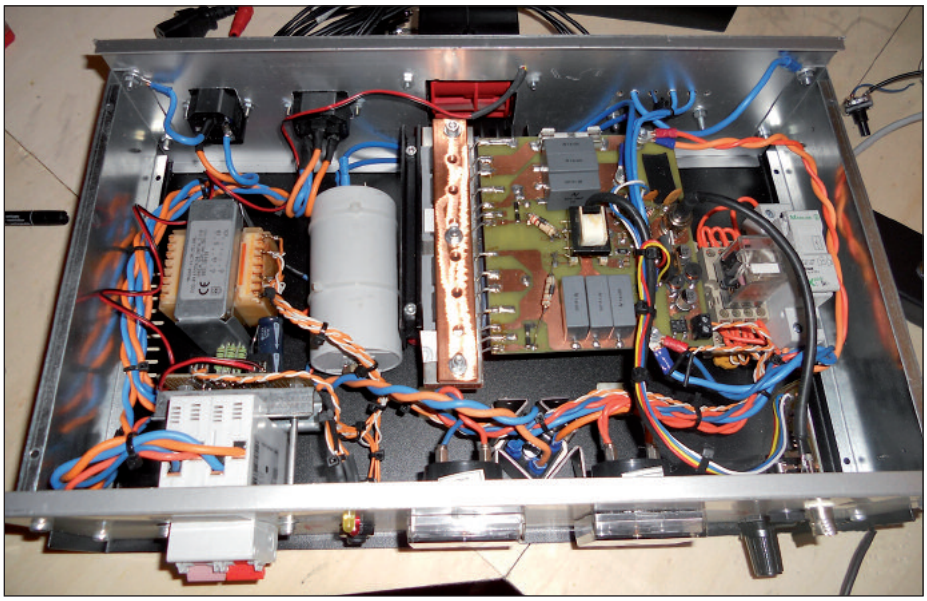


Figura 24: Il driver.

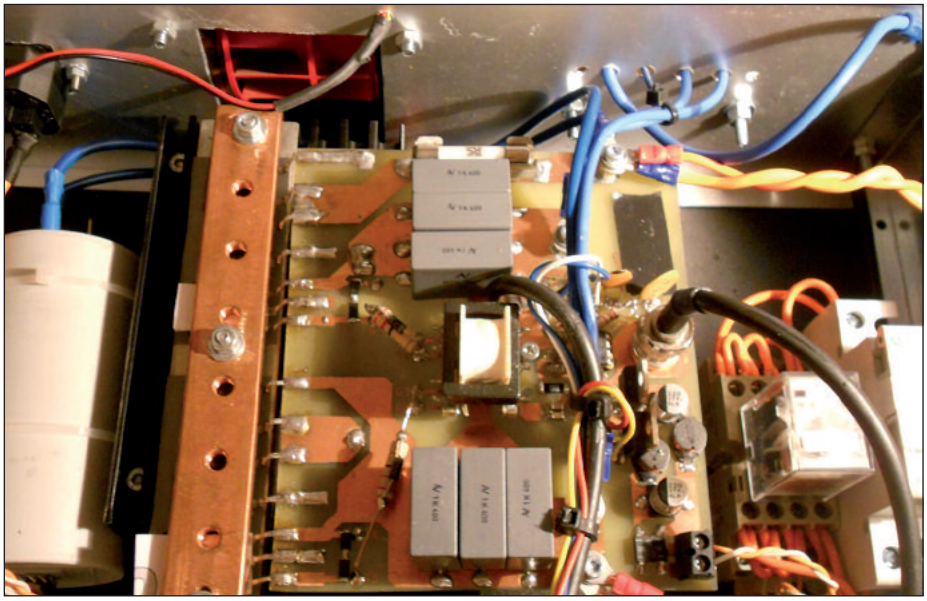


Figura 25: particolare del circuito stampato.

un tubo di 35mm, con un totale di 1000 spire e l'ho collegata, come in **figura 3** ad un oscillatore ad onda quadra con ampiezza di 10V picco e resistenza di uscita di 50 ohm. Poi ho preso un filo di una trentina di centimetri e ho fatto in modo che passasse vicino al terminale di alta tensione della bobina. Tale filo è poi collegato all'ingresso dell'oscilloscopio. La **figura 18** mostra il legame fra la tensione di alimentazione della bobina (onda quadra) e la tensione presente sul filo usato come antenna ad una frequenza inferiore alla f_0. Si osserva che il segnale di uscita è praticamente in fase con quello all'ingresso. Per le ampiezze ... per l'onda quadra siamo a 20V/div, mentre per la sinusoide di uscita è 1V/div. Aumentando la frequenza di alimentazione si riesce a trovare la frequenza di risonanza f0. Risultato: uscita in ritardo di 90° sull'ingresso e ampiezza molto più grande (20V/div per la sinusoide). Portando la frequenza di alimentazione oltre la risonanza l'uscita è in opposizione di fase rispetto all'ingresso. Con un'ultima foto voglio dare un ultimo spunto di riflessione. Alla frequenza di risonanza, la bobina funziona anche da ottima an-

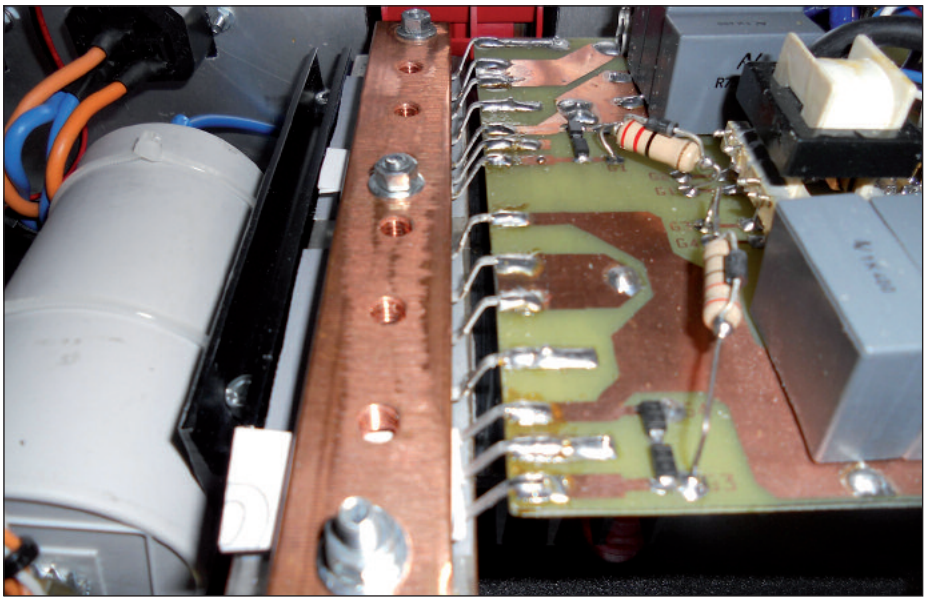


Figura 26: Particolare del semiponte e del dissipatore.

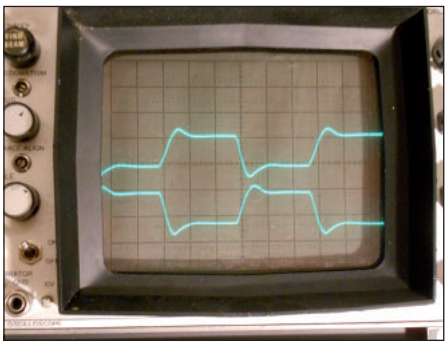


Figura 27: le forme d'onda delle tensioni ai gate.

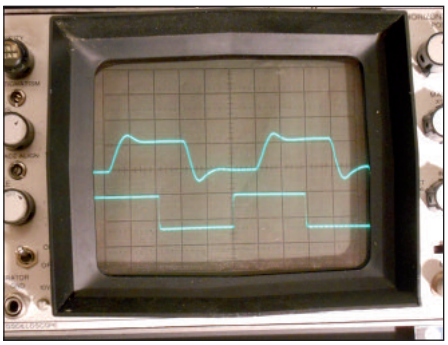


Figura 28: il funzionamento del pll.

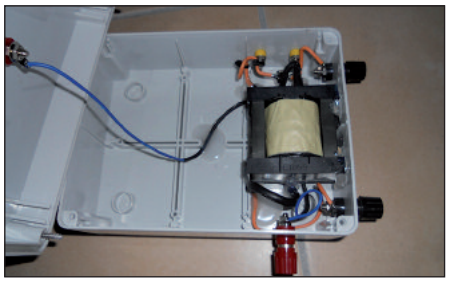


Figura 29: Il trasformatore di accoppiamento fra driver e bobina.

tenna e irradia un forte campo elettromagnetico. Quanto forte? Non ho gli strumenti per dare dei numeri sensati, tuttavia la foto seguente dimostra come una lampadina al neon si accenda perfettamente senza essere alimentata ... si tenga presente che la bobina è ancora alimentata con un'onda quadra di 10V di ampiezza. Un ultimo dettaglio: la frequenza di risonanza della bobina è soggetta variare al variare della capacità complessivamente vista dalla bobina. Pertanto dovremo aspettarci delle variazioni nei seguenti casi:

- vicinanza della bobina a corpi più o meno conduttori (una parete, una mano, un termosifone)
- aggiunta o sostituzione di un elettrodo di alta tensione (in forma di punta scaricante, sfera, toroide)
- variazione dell'altezza da terra

L'APPARATO SPERIMENTALE: IL DRIVER

È opportuno realizzare il driver in modo che sia i grado di agganciarsi automaticamente alla freqeunza di risonanza. Così, una volta avviato il sistema potremo spostare la bobina, avvicinare scaricatori, tubi al neon e quant'altro senza doverci preoccupare di regolare continuamente la frequenza di lavoro alla ricerca del massimo rendimento. Per questo useremo un PLL, un sistema in grado di misurare e tenere costante la differenza di fase fra due segnali: la tensione di alimentazione della bobina e il campo irradiato (che sarà sostanzialmente in fase con la tensione sull'elettrodo di alta tensione). Lo schema che propongo è un classico, in giro per google se ne trovano tanti simili. Cuore del circuito è un 74HC4046: completo pll che, così come l'ho configurato, genera un'onda quadra con frequenza regolabile tramite la R2 (R3 non viene montata) e compresa all'incirca fra 150kHz e 350kHz. In presenza di un segnale all'"ingresso clk" il pll varierà la frequenza imposta con R2 in maniera che il segnale di riferimento e quello prodotto localmente siano sfasati esattamente di 90°. Questo circuito sarà collegato secondo lo schema di **figura 23**. Così facendo, l'antenna fornisce all'"ingresso clk" del driver una copia (opportunamente scalata) dell'alta tensione prodotta dalla bobina, il pll fa in modo che questo riferimento sia sfasato di 90° rispetto alla tensione erogata (e quindi rispetto all'alimentazione della bobina stessa). Risultato: il sistema lavora esattamente alla frequenza di risonanza della bobina. Il driver è alimentato con una tensione massima di 300V continui ottenuti dal raddrizzamento della tensione erogata da un variac. Tramite il variac è quindi possibile regolare la potenza irradiata dalla bobina. Il trasformatore di accoppiamento innalza la tensione erogata dal driver di un fattore 1:10. Durante la messa in funzione, è necessario verificare la corretta fase degli avvolgimenti del trasformatore di accoppiamento. In pratica è sufficiente collegare tutto l'apparato, mantenere la tensione del variac attorno ai 30V e cercare l'aggancio del pll regolando il potenziometro R2. Nel caso il trasformatore sia collegato nel verso giusto, sarà estremamente facile trovare il punto in cui il pll si aggancia: la corrente assorbita subirà un'impennata e compariranno le scariche a corona dalla bobina. Inoltre, piccole rotazioni del potenziometro non produrranno alcuna variazione al funzionamento complessivo e il rumore prodotto dalla scarica sarà una specie di nota continua a 100Hz. Viceversa, nel caso il trasformatore sia collegato nel verso sbagliato, sarà presso-

Figura 30: Il setup per le prove del driver.

ché impossibile ottenere l'aggancio del pll, e le eventuali scariche produrranno un rumore molto simile a pernacchie.

LA COSTRUZIONE DEL DRIVER

Il driver deve essere completamente racchiuso in un contenitore metallico con funzione di schermo elettromagnetico. Infatti il campo irradiato dalla bobina è talmente elevato che, nel caso raggiunga il circuito stampato, può indurre correnti in grado di bloccare il funzionamento o anche di danneggiare alcuni componenti, soprattutto il 4046. La **figura 24** mostra il prototipo del driver. Il "bussolotto" bianco sulla sinistra è un condensatore per il rifasamento dei motori elettrici che ho aggiunto direttamente a valle del ponte raddrizzatore per l'alta tensione. Il piccolo trasformatore alimenta tutta la logica. Mentre il variac per l'alta tensione è esterno al contenitore del driver. Il ventilatore che si affaccia dal pannelo posteriore serve al raffreddamento dei mosfet e dei diodi del semiponte. In realtà l semiponte scalda poco, per cui il ventilatore a chiocciola è de-

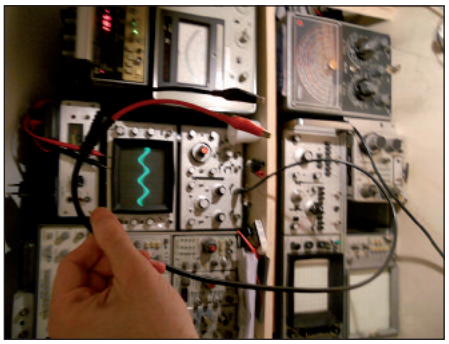


Figura31: L'esperimento descritto nel testo.

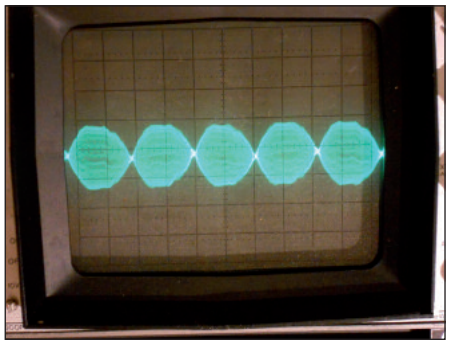


Figura 32: oscillogramma del campo irradiato dalla bobina.

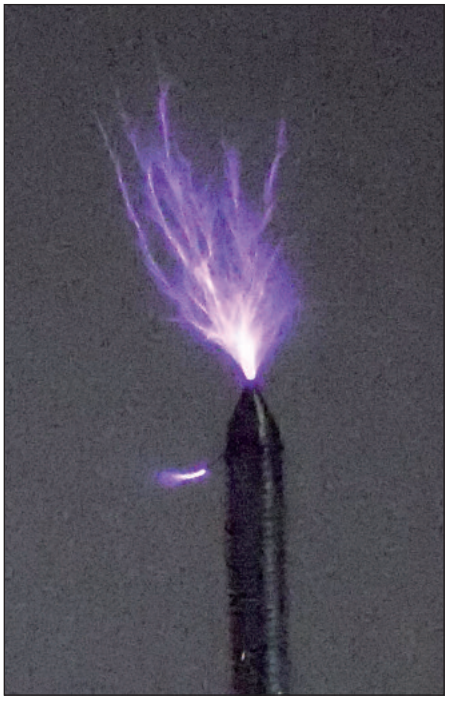


Figura 33: un primo piano delle scariche a corona.

cisamente esagerato e in realtà basta un minimo di circolazione di aria. Nella **figura 26** un particolare della parte di potenza. I mosfet e i diodi del semiponte sono fissati su un dissipatore. Ma anziché mettere una vite per ciascun componente, ho preferico una soluzione tipo "sandwich":

- mosfet e diodi sono appoggiati ad una barra di rame (e ovviamente isolati con un foglietto di isolante termicamente conduttore) a sua volta appoggiata al dissipatore. Fra la barra di rame e il dissipatore è interposto un velo di grasso al silicone.
- sopra i componenti è messa un'altra barra di rame
- il dissipatore e le due barre di rame sono stretti fra loro con tre bulloni M5

Nella **figura 27** l'oscillogramma delle tensioni sui gate dei due mosfet. La sovra oscillazione è dovuta al trasformatore la cui

ref	value
C1	470pF
C2	1u
C3	1u
C4	100n
C5	1u
C6	1u
C7	1u
C8	1u
C9	1u-400V
C10	1u-400V
C11	1u-400V
C12	1u-400V
C13	1u
C14	1u-400V
C15	220u-25V
C16	1u-400V
C17	CA220u-25V
D1	MMSZ12
D2	MMSZ12
D3	1SMA5929
D4	1SMA5929
D5	1SMA5929
D6	1SMA5929
D7	DHG20I600HA
D8	DHG20I600HA
D9	DHG20I600HA
D10	DHG20I600HA
D11	DBS152
Dx	UF4007
F1	10AT (10x38)
L1	100uH
L2	100uH
MFT1	FDH44N50
MFT2	FDH44N50
R1	10k
R2	Potenziometro multigiri 100kohm
R3	NON MONTARE
R4	1ohm
R5	10k
Rx	47ohm
T1	COILCRAFT: SDA250-3L
U1	74HC4046
U2	MAX4420
U3	LM7805
U4	LM7812
VR1	Varistore 350V
VR2	Varistore 35V

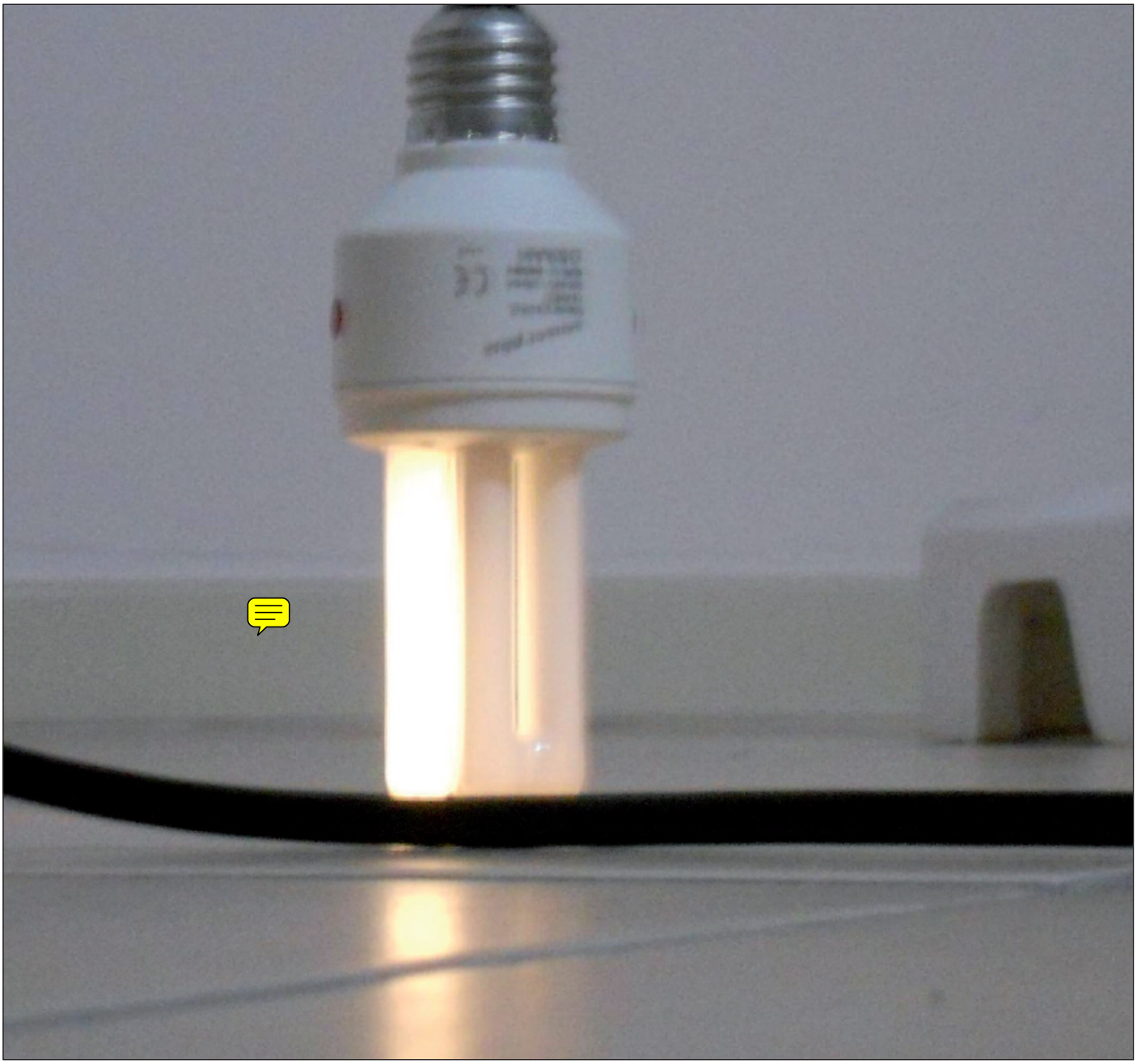


Figura 34: Il forte campo elettromagnetico irradiato dalla bobina accende un tubo al neon.

frequenza di oscillazione è dell'ordine del MHz. La **figura 28** dimostra il lavoro del pll. La traccia superiore è la tensione al gate di uno dei mosfet. La traccia inferiore è un'onda quadra a 330kHz prelevata da un generatore di funzioni ed applicata all'ingresso "CLK" del pll. IL risultato è che

- Il pilotaggio dei mosfet avviene esattamente alla frequenza di "riferimento"
- la fase fra la tensione di pilotaggio dei mosfet e l'ingresso di riferimento è esattamente di 90°

Nella **figura 29** il trasformatore di accoppiamento fra l'uscita del driver e la bobina trasmettitore. È realizzato su un nucleo ETD59. L'avvolgimento secondario è composto da 100 spire di filo smaltato da 0.5mm. L'avvolgimento primario è composto da 10 spire realizzate con 5 fili da 1mm avvolti in parallelo allo scopo di aumentare la sezione per contenendo l'effetto pelle. Nella **figura 31**: il risultato di un esperimento. Ho preso un normalissimo cavetto di misura, di quelli con un bnc da una parte e due coccodrillini dall'altra. Ho tenuto i coccodrilli aperti e a distanza di 10 metri dalla bobina accesa. All'oscilloscopio si vede una specie d segnale modulato AM: il driver è alimentato da un'alternata raddrizzata ed appena filtrata, ma non livellata né stabilizzata, per cui tutto il campo irradiato è in realtà modulato a 100Hz. ❑

CODICE MIP 2822119