

Fotocopiato in proprio, distribuito gratuitamente, è gradita la collaborazione dei lettori - Il N. 22 è stato inviato a 23 lettori
Redazione: Ezio Mognaschi, v.le Gorizia, 63 - 27100 Pavia PV, tel. 0382 539522, posta elettronica: mognaschi@fiscavolta.unipv.it

Hanno collaborato a questo numero: L. Barbi, E. Mognaschi, P. Pensa ed altri.

Sommario: Notizie, p. 1; L'effetto Lussemburgo, p. 1 - 6; Tabella di conversione tra rapporti di tensione, di potenza, decibel e neper, p. 6.

Notizie: * Il 1° luglio sono state ricevute a Pavia le quattro trasmissioni commemorative annuali di SAQ su 17.2 kHz in CW lento; segnale debole, ma chiaramente intelligibile. Antenna filare orizzontale di 25 m, ricevitore Sony ICF 2010, convertitore per OL LX 885 di Nuova Elettronica. La ricezione è stata confermata con una QSL che rappresenta il TX. Non si ha notizia di ricezione negli Stati Uniti. La successiva trasmissione del 5 settembre non è stata invece ricevuta a Pavia, ma nel Massachusetts.

* P. Pensa segnala il sito <http://www.flash.net/~evogel/#Whistler> ove è descritto un ricevitore per *whistlers* con due FET.

* L. Barbi segnala che il proprio sito <http://www.sigmasrl.it/lbarbi> è stato recentemente aggiornato.

L'effetto Lussemburgo

di Ezio Mognaschi

Premessa

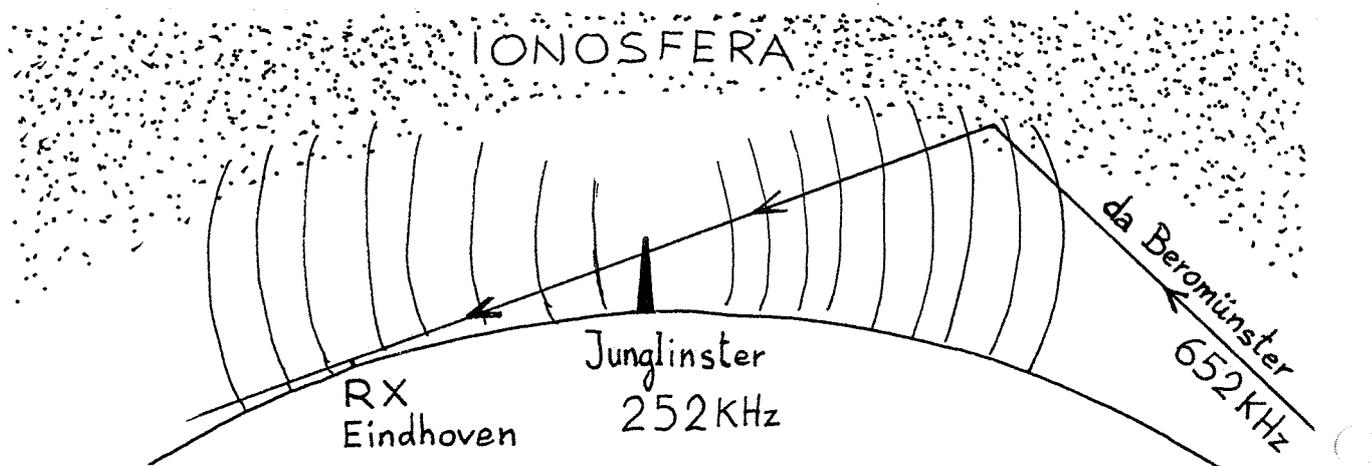
Ogni tanto, diciamo ogni dieci anni circa, compare su riviste di radioascolto o di radiotecnica qualche articolo che riscopre l'effetto Lussemburgo; effetto descritto per la prima volta nel 1933. Non tutti, di solito, hanno potuto apprezzare la spiegazione dell'effetto, basata sulla teoria magnetoionica della ionosfera, sviluppata già nel 1925, ed entrata nei libri di fisica dei plasmi, ma non nel patrimonio culturale di tutti quelli che si occupano di radio a livello di hobby. Se ne parla perciò come di un effetto misterioso e lo si confonde allegramente con l'intermodulazione che ha luogo nei ricevitori di scarso pregio - non necessariamente in quelli di basso prezzo. Questa volta è la rivista statunitense *The Lowdown* che, nel numero di maggio 2001, riesuma per l'ennesima volta, ed a sproposito, l'effetto Lussemburgo per cercare di spiegare alcune interferenze, osservate in America, nella ricezione di Montecarlo (216 kHz) da parte di un'altra, non identificata, stazione di lingua francese.

Vedremo dapprima la storia della scoperta e dell'interpretazione dell'effetto Lussemburgo e, con l'aiuto di una scheda, la sua spiegazione fisica.

La storia

Il 10 aprile 1933 B. D. H. Tellegen, un ricercatore del *Naturkundig Laboratorium der N. V. Philips' Gloeilampen Fabrieken* di Eindhoven, Olanda, mentre stava ascoltando, probabilmente a casa propria, la stazione svizzera tedesca di Beromünster che trasmetteva su 652 kHz, si accorse che il segnale di radio Lussemburgo (252 kHz, 150 kW antenna, TX situato a Junglinster [1], la più potente stazione di allora dopo Mosca, entrata in funzione proprio quell'anno) "poteva essere ascoltato in sottofondo con un'intensità tale che, in assenza della modulazione della prima stazione, poteva essere udito con una intensità fastidiosa". L'affermazione riportata tra virgolette è contenuta in una breve lettera [2] inviata il 4 maggio 1933 da Tellegen alla rivista *Nature* che la pubblicava con sollecitudine il 10 giugno. Tellegen è il primo ad escludere effetti di intermodulazione nel ricevitore in base a due dati: 1) l'intensità del campo di radio Lussemburgo a Eindhoven, alla distanza di circa 200 km, è di circa 10 mV/m, cioè un campo non particolarmente intenso; 2) l'effetto è stato osservato con diversi tipi di ricevitori (si sa che furono usati sia ricevitori supereterodina, sia ricevitori a reazione), non è quindi possibile che lo stesso effetto di intermodulazione possa essere presente, con la stessa entità, nei diversi casi. Tellegen aggiunge di aver compiuto osservazioni anche lontano da linee elettriche, in aperta

campagna, con un ricevitore alimentato a batteria, in modo da escludere qualsiasi disturbo o interferenza provocato dalle linee stesse. Conclude affermando: “sembra che il fenomeno tragga la sua origine da qualche parte nella trasmissione [cioè nel tragitto] tra Beromünster ed Eindhoven”. Dove? Vedremo che si tratta del tragitto ionosferico. Aggiunge poi: “si può notare che Lussemburgo [cioè Junglinster] è situato quasi sulla congiungente Beromünster con Eindhoven”. Anche quest’ultima osservazione è fondamentale per capire cosa sia potuto succedere.



Rappresentazione schematica del percorso delle onde radio da Beromünster a Eindhoven, con riflessione ionosferica al di sopra del TX di Radio Lussemburgo.

Dopo solo un anno, su una prestigiosa rivista scientifica inglese [3] compare un articolo di V. A. Bailey e D. F. Martin che fa riferimento alle osservazioni di Tellegen e contiene un’interpretazione teorica del fenomeno. Gli autori sono un professore di fisica dell’università di Sydney il primo ed un fisico, ricercatore del *Commonwealth Radio Research Board* il secondo. Il lavoro è presentato dal prof. J. S. Townsend pioniere di quella che oggi chiamiamo la fisica dei plasmi. Il lavoro è difficilissimo da leggere al giorno d’oggi non tanto per l’uso di un sistema di unità di misura ormai desueto, ma per l’impostazione molto astratta e formale, con pochissimi commenti di carattere fisico, e per il linguaggio e le notazioni sensibilmente lontane da quelle nostre contemporanee. Le difficoltà di lettura dell’articolo non giustificano però l’ignoranza dell’essenza del fenomeno, ignoranza dovuta all’atteggiamento volutamente antiscientifico di coloro che si fanno vanto “di non capire la matematica e la fisica”, come se fosse il caso di vantarsi di una deficienza!

Nel 1935 e nel 1938 compaiono due articoli [4, 5] che presentano determinazioni quantitative accurate a proposito di quello che è oramai denominato, dal nome della stazione, “effetto Lussemburgo”.

Nel 1937 V. A. Bailey ritorna sull’argomento preannunciando su *Nature* [6] nuovi sviluppi teorici che compaiono altrove nello stesso anno ed in quello successivo [7, 8]. In questi lavori non viene più fatta menzione dello scopritore dell’effetto e viene ignorata la precedente ricerca di Hove [4], bensì vengono citate le osservazioni sperimentali di van der Pol e van der Mark [9] del 1934. L’impressione è che Bailey cerchi di assumere con ogni mezzo la paternità dell’interpretazione dell’effetto. L’importante novità contenuta nei due articoli di Bailey consiste nel fatto che viene dimostrato, sempre in un modo piuttosto complicato, che la profondità di modulazione impressa da una radioonda su di un’altra, durante il loro contemporaneo passaggio nella stessa zona della ionosfera, aumenta da 4 a 10 volte quello usuale, se la frequenza dell’onda perturbatrice differisce di poche unità in percentuale dalla frequenza ciclotronica locale. Per una definizione della frequenza ciclotronica si veda la scheda più avanti.

In un fondamentale testo di radiotecnica scritto da F. E. Terman, pubblicato negli Stati Uniti in varie edizioni tra il 1932 ed il 1947, ma che inspiegabilmente non venne pubblicato in lingua italiana che nel 1960 [10] come traduzione della ormai vecchia edizione del 1941, l’effetto Lussemburgo è liquidato

in 14 righe, le prime 9 recanti la sua sommaria descrizione, mentre le restanti mostrano che Terman è piuttosto scettico persino sull'esistenza stessa dell'effetto. Citiamo: "Tuttavia dato che questo effetto non è stato notato, in via di massima, con le stazioni trasmettenti di maggior potenza, si è autorizzati ad avanzare l'ipotesi che la causa di interferenza possa essere prodotta dall'intermodulazione esterna, invece che a modulazione incrociata nella ionosfera". Come a dire: questo effetto non l'abbiamo scoperto noi americani, perciò non esiste; gli europei sono dei pasticcioni in quanto usano ricevitori di qualità scadente, così si sono sbagliati. Siccome Terman era un'autorità nel campo della radiotecnica, questa sua sentenza diede una mazzata alla credibilità dell'effetto e, per un po', non se ne parlò più, tanto che nell'edizione americana del manuale di Terman del 1947[11] l'effetto non è neanche più citato.

Intanto era scesa la Cortina di Ferro tra le due parti del mondo e qualche russo riscoprì l'effetto Lussemburgo, tanto che, in base allo sciovinismo panslavo, l'effetto è denominato, nella letteratura russa, "effetto Lussemburgo-Gor'kii"[12], probabilmente dal nome della città russa. Sta di fatto che l'anteposizione del nome "Lussemburgo" indica un minimo di decenza e di dovuto rispetto delle precedenze.

Nel 1947 si tenne a Roma il *Congresso internazionale per il cinquantenario della scoperta marconiana della radio*, organizzato dal CNR, con la partecipazione di eminenti personalità del mondo radiotecnico internazionale tra i quali Sir Edward V. Appleton (GB), B. Van der Pol (NL), K. A. Norton e C. R. Burrows (USA). Tra gli altri lavori, spesso scientificamente molto rilevanti, venne presentato dal dott. Mario Cutolo dell'Istituto di Fisica Tecnica dell'Università di Napoli una ricerca [13] condotta con notevole perizia e conoscenza del problema, anche se con una disarmante povertà di mezzi come necessariamente si confà ad un ricercatore italiano, massime se opera nell'immediato dopoguerra. Questo lavoro, che descriveremo nel prossimo paragrafo, contiene una verifica sperimentale diretta della teoria formulata da Bailey dieci anni prima.

Gli esperimenti italiani

Cutolo, riflettendo sul lavoro di Bailey, le cui conclusioni erano state parzialmente confermate da radioricezioni effettuate tra Gran Bretagna, Francia, Belgio ed Olanda nel marzo 1937, mise a punto i suoi esperimenti per "costatare se, facendo variare la frequenza di una stazione perturbatrice intorno alla frequenza ciclotronica locale, si potesse misurare quest'ultima e, di conseguenza, il valore del campo magnetico terrestre".

Gli esperimenti descritti da Cutolo riguardarono l'interferenza sui segnali trasmessi da Taranto (465 kHz, 1 kW antenna) e da Napoli (338 kHz, 1 kW antenna) da parte del trasmettitore della Radio Vaticana (700 od 800 watt antenna) che emetteva onde modulate a 400 Hz, manipolato secondo le lettere X oppure OX dell'alfabeto Morse con frequenza della portante variabile tra 1100 e 1200 kHz. La stazione ricevente era situata a Torino, nella sede dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale G. Ferraris ed era costituita da due radioricevitori di tipo SAFAR, uno sintonizzato su Taranto, l'altro su Napoli. Gli esperimenti vennero condotti per 14 notti, tra il 12 marzo ed il 9 aprile 1946. La novità dell'esperimento consistette nel fatto che la frequenza del trasmettitore denominato "interferente" non venne lasciata al caso, come negli esperimenti precedenti, ma scelta in modo che fosse pari alla frequenza ciclotronica corrispondente al valore del campo magnetico terrestre nel luogo e nel momento in cui le onde delle stazioni osservate (Napoli e Taranto) si propagavano nella ionosfera, nel cielo di Roma, entro circa 200 km sopra la verticale di Radio Vaticana. Siccome la frequenza ciclotronica varia periodicamente con l'ora a causa delle variazioni del campo magnetico terrestre, venne usata per la stazione interferente non una frequenza fissa, ma una frequenza variabile attorno al valore previsto, ma non noto precisamente, della frequenza ciclotronica stessa. Dopo l'osservazione dell'effetto prodotto dalla stazione vaticana, se fossimo sciovinisti come i russi, potremmo chiamare l'effetto "Lussemburgo-Vaticano".

Nel febbraio e nel luglio 1947 venne svolta da Cutolo una seconda campagna di osservazioni in collaborazione con la Marina Militare usando le stazioni di Augusta (479 kHz, 1 kW antenna) e di Taranto (1200 kHz, 1 kW antenna) come stazioni osservate e Napoli (Forte S. Elmo, frequenza variabile

da 1050 kHz a 1150 kHz, con soli 400 o 500 W antenna) come interferente. Le stazioni riceventi erano a Venezia, La Spezia, Livorno e Roma. Questa volta i risultati furono "vari e complicati sia per le frequenti avverse condizioni atmosferiche, sia per la scarsa potenza di Radio Napoli. Comunque il fenomeno venne osservato la notte sul 28 febbraio a Venezia, quando, in un periodo di assenza di radiodisturbi, fu distinta chiaramente la X irradiata da Napoli".

Il lavoro di Cutolo probabilmente non attirò molta attenzione in quanto venne presentato in italiano e pubblicato in italiano negli atti del Congresso di Roma [13] insieme agli altri lavori scritti prevalentemente in inglese o francese, tuttavia gli esperimenti descritti sono molto belli e suggestivi e costituiscono un'attività di ricerca scientifica basata sull'ascolto e sulla misura di segnali radio di stazioni di radiodiffusione, con l'utilizzazione dei trasmettitori al di fuori degli orari di normale trasmissione ed addirittura con frequenza variabile. Al giorno d'oggi non sarebbe più possibile, stante la burocratizzazione e le standardizzazione nella gestione degli impianti di trasmissione, nonché il loro utilizzo a tempo pieno, pensare di effettuare simili prove. Il coordinamento che si rese necessario allora tra stazioni trasmettenti, perturbatrici e di ascolto in un'epoca ove il sistema più comune di comunicazione era la posta, se da un lato appare impresa eccezionale fu senz'altro favorita dalla voglia di fare, e di fare con i pochi mezzi di cui si disponeva, che caratterizzò gli anni del dopoguerra in Italia.

La spiegazione dell'effetto Lussemburgo

Si è visto che l'effetto Lussemburgo consiste nella modulazione impressa dall'onda di un trasmettitore potente sul segnale di un altro trasmettitore quando le due onde attraversano la stessa regione di ionosfera praticamente al di sopra del trasmettitore chiamato interferente.

Quando l'onda interferente entra nella ionosfera, nella regione che si trova al di sopra del trasmettitore, essa viene attenuata dal plasma ionosferico, composto di elettroni ed ioni positivi in eguale misura. Parte dell'energia dell'onda viene trasformata in calore e sono gli elettroni, dotati di massa molto minore di quella degli ioni, a scaldarsi per primi di modo che la loro velocità termica media viene aumentata. Se l'onda disturbante è modulata in ampiezza, il trasferimento di energia è massimo quando è massima l'ampiezza della modulazione e varia seguendo l'involuppo della modulazione dell'onda. Gli elettroni riscaldati possono, a loro volta, perdere energia attraverso processi di collisione con una costante di tempo di circa 1 ms, di modo che, per frequenze di modulazione inferiori a circa 1 kHz, la modulazione causa una variazione della temperatura degli elettroni. Ora la frequenza di collisione degli elettroni dipende dalla loro velocità media ed aumenta all'aumentare della temperatura. Allorché l'onda osservata passa attraverso la stessa regione di plasma ionosferico riscaldato dall'onda interferente, essa viene attenuata ad un ritmo che dipende dalla frequenza di collisione degli elettroni cosicché la sua attenuazione varia in funzione della temperatura degli elettroni che è stata appunto modulata dall'onda interferente. Si comprende come l'onda interferente debba essere di potenza elevata affinché il processo sia facilmente osservabile, mentre non è necessario che sia elevata la potenza dell'onda osservata. Quest'ultima, acquisisce quindi una modulazione che trae origine dalla modulazione della temperatura degli elettroni, provocata dall'onda interferente. Il processo di modulazione ora descritto prende anche il nome di modulazione incrociata ed è un effetto non lineare dovuto ai meccanismi di interazione delle onde elettromagnetiche con il plasma ionosferico.

In considerazione del fatto che l'assorbimento di energia da parte della ionosfera è maggiore in corrispondenza della frequenza di ciclotrone, che dipende dalle coordinate geografiche del luogo e dall'ora (come spiegato più in dettaglio nella scheda), ci si attende un effetto Lussemburgo più marcato quando la stazione interferente trasmette proprio alla frequenza di ciclotrone.

Sarebbe possibile oggi osservare l'effetto Lussemburgo? In linea di principio sì, dato che sono in funzione di notte molti trasmettitori di grande potenza, tuttavia il fatto che i segnali viaggino dagli studi di produzione ai trasmettitori lungo canali spesso sconosciuti e non dedicati, in compagnia ed in multiplex con una grande quantità di altri segnali audio, fa sì che non si possa escludere con certezza una eventuale intermodulazione negli amplificatori posti lungo le linee o nei trasmettitori dei ponti radio.

La frequenza di ciclotrone

Il campo elettrico di un'onda elettromagnetica sottopone gli elettroni della ionosfera ad una forza alternata che li fa oscillare. A causa della presenza del campo magnetico terrestre essi, però, non oscilleranno lungo una linea retta. Un campo magnetico \mathbf{B} , con la direzione delle linee di forza del campo terrestre, esercita su un elettrone in movimento con velocità \mathbf{v} una forza \mathbf{F} data da:

$$\mathbf{F} = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B}.$$

ove $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C è la carica dell'elettrone.

Se \mathbf{v} è perpendicolare a \mathbf{B} si ha il valore massimo della forza, pari a $|\mathbf{F}| = evB$ e la forza risulta perpendicolare sia a \mathbf{B} , sia a \mathbf{v} . Se sull'elettrone di massa $m = 9.1091 \times 10^{-31}$ kg non agiscono altre forze esso si muoverà di moto circolare uniforme lungo un'orbita di raggio r con

$$r = Be/mv$$

e con velocità angolare $\omega_H = v/r$ ove

$$\omega_H = Be/m.$$

La frequenza di rivoluzione degli elettroni nel campo magnetico è

$$f_H = \omega_H/2\pi = Be/2\pi m$$

questa frequenza è detta **frequenza di ciclotrone**. Per un valore tipico del campo magnetico terrestre pari a 4.1×10^{-5} tesla si ha $f_H = 1150$ kHz.

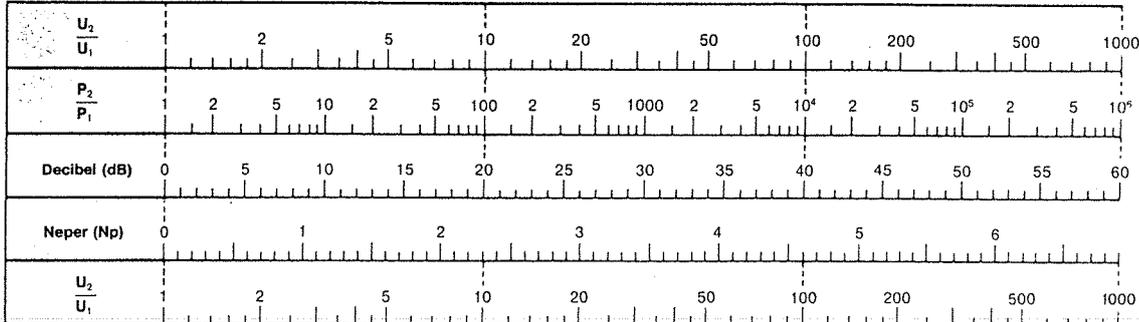
Per completare una rivoluzione l'elettrone impiegherà un tempo pari a $2\pi m/Be$. L'azione combinata del campo elettrico dell'onda e del campo magnetico terrestre, supposti tra loro perpendicolari, dipende dalla frequenza dell'onda rispetto a quella di rivoluzione degli elettroni.

Se la frequenza dell'onda è molto alta rispetto ad f_H , l'elettrone non ha il tempo di completare più di una frazione di orbita prima che il campo elettrico cambi segno, quindi oscilla avanti e indietro nel piano del campo elettrico. Mentre l'elettrone si sposta verso l'alto esso viene spinto da una parte dalla forza di origine magnetica, mentre si sposta verso il basso esso viene spinto nella direzione opposta. Il movimento risultante è un'ellisse stretta. Se l'onda elettromagnetica ha una frequenza vicina ad f_H gli elettroni vengono accelerati in continuazione dal campo elettrico dell'onda e, poiché il campo cambia segno nello stesso momento in cui gli elettroni cambiano la direzione di movimento, essi sono sempre accelerati e si muovono lungo una spirale il cui raggio aumenta sempre e con velocità crescente. L'energia viene estratta in continuazione dal campo elettromagnetico e viene trasformata in energia cinetica degli elettroni. Se gli elettroni oscillano liberamente, senza collidere con le molecole del gas, essi perdono energia solo per irraggiamento e l'energia estratta dall'onda, convertita in energia cinetica degli elettroni, viene reirradiata come onda riflessa. Quando invece si ha una collisione tra un elettrone ed una molecola della ionosfera, questa energia viene trasformata in calore cosicché parte dell'energia dell'onda viene persa. Questo meccanismo è responsabile di un assorbimento selettivo della ionosfera alla frequenza f_H che qualsiasi radioamatore può verificare sintonizzandosi la notte su frequenze vicine a 1150 kHz. A questa frequenza, ed a quelle vicine, la ionosfera assorbe fortemente e reirradia poco e si possono ricevere solo stazioni locali che non vengono ricevute per onda di cielo. Se le onde hanno frequenze molto inferiori ad f_H gli elettroni percorrono orbite chiuse e ciascuno può compiere diverse rivoluzioni mentre il campo magnetico agisce in una data direzione. Si ha così solo un parziale assorbimento dell'energia dell'onda.

Bibliografia

- [1] *L'antenna*, 5, n° 17, p. 32, 1933.
 [2] B. D. H. Tellegen, "Interaction between Radio-Waves?", *Nature*, **CXXXI**, 369 (1933).
 [3] V. A. Bayley, D. F. Martin, "The influence of Electric Waves on the Ionosphere", *Philosophical Magazine*, **XVIII**, 369 - 386 (1934).
 [4] G. W. O. Hove, "Accurate Measurements of the Luxembourg Effect", *Wireless Eng.*, **12**, 122 (1935).
 [5] G. W. O. Hove, "Accurate Measurements of the Luxembourg Effect", *Wireless Eng.*, **15**, 187 (1938).
 [6] V. A. Bailey, Resonance in the Interaction of Radio Waves, *Nature*, **CXXXIX**, 838, 1937.
 [7] V. A. Bailey, "On some Effects caused in the Ionosphere by Electric Waves - Part I", *Philosophical Magazine*, **XXIII**, 929 - 960 (1937).
 [8] V. A. Bailey, "On some Effects caused in the Ionosphere by Electric Waves - Part II", *Philosophical Magazine*, **XXVI**, 425 - 453 (1938).
 [9] B. van der Pol e van der Mark, rapporto U.R.S.I del 10 settembre 1934; anche in *Tijdschrift Ned. Radio Genootschap*, **VII**, 12-17, 1935.
 [10] F. E. Terman, "Manuale di Ingegneria Radiotecnica", Martello, Milano, 1960, p. 872.
 [11] F. E. Terman, "Radio Engineering", McGraw-Hill, New York, 1947.
 [12] V. L. Ginzburg, "The propagation of electromagnetic waves in plasmas", Pergamon Press, Oxford, 1964, traduzione di "Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme", Fizmatgiz, Mosca, 1960.
 [13] M. Cutolo, "La verifica della teoria magnetoionica mediante la girointerazione delle radioonde nella ionosfera", in *Atti del Congresso internazionale per il cinquantenario della scoperta marconiana della radio*, Bardi, Roma, 1948, pag. 65 - 77.

0-60 dB; 0-7 Np



60-120 dB; 7-14 Np

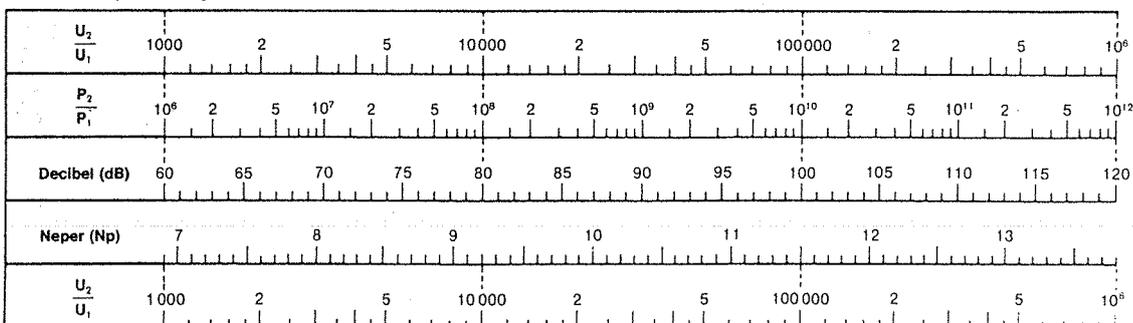


Tabella di conversione tra rapporti di tensione U_2/U_1 , di potenza P_2/P_1 , decibel e neper.
 $\text{dB} = 10 \log_{10} (P_2/P_1) = 20 \log_{10} (U_2/U_1)$; $\text{Np} = \ln (U_2/U_1)$; $1 \text{ Np} = 8.686 \text{ dB}$.