

Misura di impedenze - Impedenzimetri (LCR meter).

L'impedenza e' un parametro fondamentale per caratterizzare materiali, componenti piu' o meno complessi o circuiti. Quando una corrente attraversa un dispositivo, questo si oppone alla corrente stessa: la resistenza (o l'impedenza, se la corrente e' alternata) da' una misura della "opposizione" del dispositivo alla corrente.

Per lungo tempo, per la misura di impedenze si e' fatto uso di strumenti a ponte, inizialmente controllati manualmente. Attualmente esistono strumenti digitali, basati su metodi di misura a ponte, che in maniera automatica consentono di effettuare misure di impedenze con elevata accuratezza. Gli strumenti a ponte non sono tuttavia gli unici strumenti impiegati al giorno d'oggi per questo tipo di misure.

In regime sinusoidale l'impedenza di un bipolo e' rappresentata da un numero complesso ed esprime la relazione tra la corrente attraverso il bipolo stesso e tensione ai suoi capi. In particolare, come e' noto, il modulo dell'impedenza rappresenta il rapporto tra l'ampiezza della tensione e quella della corrente, mentre la fase rappresenta lo sfasamento tra tensione e corrente.

Un'impedenza complessa e' dunque caratterizzata da un modulo e da una fase o, in maniera equivalente, da una parte reale e una immaginaria.

In modo analogo si puo' procedere per definire impedenze legate a sistemi piu' complessi di un semplice bipolo, come per esempio un quadripolo. In questo caso e' possibile per esempio definire la transimpedenza, come rapporto tra tensione d'uscita e corrente in ingresso: in regime sinusoidale, se tensione d'uscita e corrente in ingresso non sono in fase tra loro, la transimpedenza e' rappresentata da un numero complesso il cui modulo e la cui fase rappresentano rispettivamente il rapporto tra le ampiezze della tensione d'uscita e della corrente in ingresso e il loro sfasamento.

Per una generica impedenza il coefficiente di qualita' e' definito come il rapporto tra l'energia reattiva (immagazzinata) e quella attiva (dissipata).

In particolare, per un'impedenza costituita da una parte reale (resistenza) e una immaginaria (reattanza) in serie fra di loro, il coefficiente di qualita' e' definito

$$Q=X/R;$$

il coefficiente Q cosi' definito coincide con la tangente dell'angolo formato con l'asse reale dal vettore che rappresenta l'impedenza (Fig 1.1 e 1.2).

Poiche' la componente reattiva dell'impedenza immagazzina energia, mentre quella resistiva la dissipa, un elevato coefficiente di qualita' esprime la capacita' di immagazzinare energia con piccola dissipazione: piu' allora e' alto il valore di Q, maggiore e' questa capacita'. Il fattore di qualita' Q e' generalmente utilizzato per definire la "purezza" di una reattanza, cioe' la prevalenza della componente reattiva rispetto a quella dissipativa.

E' possibile definire anche il fattore di dissipazione D, come il reciproco di Q:

$$D=1/Q=R/X;$$

il coefficiente D cosi' definito coincide con la tangente dell'angolo complementare a quello formato con l'asse reale dal vettore che rappresenta l'impedenza.

Definizioni analoghe possono essere date per impedenze costituite dal parallelo di una componente resistiva con una reattiva, cioe' per ammettenze costituite dalla somma di un termine resistivo (ammettenza) e di uno reattivo (susceptanza). In questo caso si ottiene

$$Q=R/X \text{ e } D=X/R$$

Dal momento che l'impedenza è un numero complesso, misurare una impedenza significa misurare almeno due grandezze. Molti strumenti tra i più moderni misurano la parte reale e quella immaginaria di un'impedenza (cioè del numero reale che la rappresenta) e convertono questi valori nei parametri che l'utente richiede: il modulo, la fase, il modulo dell'ammettenza, la resistenza, la reattanza, l'ammettenza, la suscettanza, il coefficiente di qualità, ecc.

Nella realtà non esistono componenti circuitali puramente resistivi o reattivi: ognuno di essi è una combinazione di questi elementi. Il risultato è che è presente una componente induttiva in ogni resistore, una componente resistiva in ogni condensatore, una componente resistiva in ogni induttore, eccetera. Il parametro parassita è dovuto alla struttura fisica del componente o al modo nel quale esso viene impiegato; esempi di parametri parassiti in un condensatore sono la resistenza e l'induttanza dei terminali e la resistenza di perdita del dielettrico.

Allo scopo di modellizzare un componente o dispositivo complesso, si utilizza un circuito equivalente, costituito da una opportuna configurazione di termini elementari di impedenza o ammettenza (resistenze/conduzzanze, induttanze, capacità).

Questo circuito equivalente non necessariamente richiama con la sua struttura la struttura fisica del dispositivo reale.

La schematizzazione più semplice, per una qualsiasi impedenza è costituita da una resistenza in serie con una reattanza, oppure da un'ammettenza in parallelo con una suscettanza. Le varie componenti (R, X, G, B) variano in generale con la frequenza: solo per un'impedenza EFFETTIVAMENTE costituita da una resistenza in serie con un'induttanza o con una capacità (o per un'ammettenza EFFETTIVAMENTE costituita dalla somma di una conduzzanza e una suscettanza) i valori di R, L e C (o, rispettivamente di G e B) sono indipendenti dalla frequenza.

In generale inoltre le varie componenti di un'impedenza dipenderanno, oltre che dalla frequenza, anche da altri fattori, come la temperatura, l'umidità, la presenza di luce, vibrazioni, il tempo, campi magnetici, eccetera.

In aggiunta, alcune impedenze manifestano un comportamento dipendente dalla tensione continua applicata ai capi (si pensi per esempio a un varactor, ossia il dispositivo il cui funzionamento è basato sulla capacità di una giunzione p-n, dipendente come è noto dalla tensione di polarizzazione) o dal livello del segnale applicato (per esempio gli induttori realizzati su nucleo ferromagnetico).

In generale siamo interessati a conoscere il valore effettivo di una impedenza; dunque, per esempio, siamo interessati a conoscere anche le componenti parassite (resistenza parallelo, resistenza e induttanza serie) di una capacità.

Metodi di misura delle impedenze:

- strumenti a ponte (estensione del ponte di Wheatstone): in condizioni di bilanciamento, il valore dell'impedenza incognita può essere ricavato dal valore degli altri elementi del ponte;
- metodi a risonanza: si porta il circuito alla risonanza agendo sul condensatore C e si misura il coefficiente di qualità: il valore di R ed L può essere ricavato nota la frequenza di risonanza, il valore di C e quello del Q;
- metodo della costante di tempo: si produce un transitorio (R-C) e se ne misura la costante di tempo; da questa si risale alle componenti incognite dell'impedenza;
- tecnica voltamperometrica: nel circuito in Fig. 1.3 si misurano la tensione V e la corrente nell'impedenza (come caduta prodotta sulla resistenza R, di piccolo valore, in serie all'impedenza incognita; l'uso di un trasformatore al posto di R permette di ridurre l'effetto caricante, ma limita inferiormente il range di frequenze su cui il metodo è applicabile; per alte frequenze lo schema viene leggermente modificato;
- coefficiente di riflessione: si invia un segnale all'impedenza da misurare e si

misura il rapporto tra segnale incidente e segnale riflesso (che dipende dall'impedenza), mediante analizzatore di reti; applicato per frequenze elevate;

- ponte autobilanciato: e' il metodo di cui ci occuperemo; e' in un certo senso una variante del metodo voltamperometrico.

Negli anni piu' recenti sono stati messi a punto ponti automatici per la misura di impedenze, nei quali il bilanciamento del ponte avviene in maniera automatica; questo consente di effettuare misure piu' accurate e generalmente in tempi piu' brevi rispetto a quello che e' possibile ottenere con i ponti tradizionali.

In Figura 1.4 e' riportato lo schema di principio di un ponte automatico per la misura di impedenze. La resistenza di reazione R_r e' collegata a un punto di massa virtuale. Detta $V's$ la tensione sul terminale sinistro dell'impedenza incognita (nello schema in figura), all'equilibrio si ha

$V_u = -R_r I_r$, $V's = Z_x I_x$ ed essendo $I_x = I_r$, $Z_x = -R_r V's / V_u$.

E' utile ribadire che il risultato espresso dalla precedente relazione e' valido se il punto che nello schema di principio in figura corrisponde al terminale d'ingresso invertente dell'A.O. si trova a potenziale praticamente nullo e che all'equilibrio (cioe' nelle condizioni dette) le correnti I_r ed I_x sono uguali. La resistenza R_s rappresenta la resistenza d'uscita del generatore di segnale, sulla quale puo' essere presente, dipendentemente dalla corrente erogata, una caduta di tensione anche significativa.

Poiche' interessa calcolare il valore dell'impedenza complessa, la misura del rapporto $V's / V_u$ deve essere effettuata utilizzando uno strumento (o un insieme di circuiti) che consenta di rilevarne modulo e fase (ovvero componente reale e componente immaginaria). L'impiego di un microcontrollore all'interno dello strumento consente, dalla misura delle componenti in fase e in quadratura delle tensioni $V's$ e V_u , la visualizzazione del risultato (cioe' del valore dell'impedenza) nella forma richiesta dall'utente: configurazione serie (R, X) o parallelo (G, B), coefficiente di qualita (Q) o di dissipazione (D), eccetera.

Nella pratica la configurazione del ponte a bilanciamento automatico puo' differire da strumento a strumento. Generalmente i misuratori RLC (RLC meters) per basse frequenze (tipicamente sotto i 100 kHz) sono effettivamente realizzati mediante un amplificatore operazionale per ottenere il convertitore corrente-tensione. Uno strumento di questo tipo presenta scarsa accuratezza, alle frequenze piu' alte, a causa dei limiti nelle prestazioni dell'amplificatore operazionale.

Strumenti realizzati per lavorare a frequenze piu' alte utilizzano un convertitore corrente-tensione costituito da un piu' sofisticato rivelatore di zero (R.Z.), un rivelatore di fase, un integratore e un modulatore vettoriale al fine di ottenere un'elevata accuratezza su un range di frequenze al di sopra del MHz. Strumenti realizzati secondo questo principio permettono la misura di impedenze fino a frequenze dell'ordine di 100 MHz.

Nota: il rivelatore di zero, seguito dalla circuiteria detta (Fig. 1.5) ha la funzione di pilotare il terminale (X) nello schema in figura in modo da rendere uguali le correnti I_x ed I_r , cosi' come l'A.O. nello schema in figura 1.4 amplifica la tensione tra i suoi ingressi (solo virtualmente nulla!) producendo una tensione d'uscita tale da rendere uguali le correnti I_x ed I_r nel circuito nella stessa figura 1.4.

Specifiche di un impedenziometro vettoriale:

- Range: valori estremi di impedenza, per i quali e' possibile la misura con quello strumento; in alcuni casi sono forniti anche i limiti per i valori di resistenza, capacita', induttanza, ed altri parametri. La portata dello strumento puo' essere modificata agendo sul valore della resistenza R_r ; questa resistenza deve essere nota con incertezza quanto piu' possibile piccola, per ottenere un'accuratezza di misura accettabile.

- Accuratezza: come per altri strumenti, l'accuratezza esprime la differenza tra il valore misurato e il valore vero (o effettivo); l'a. e' generalmente espressa mediante l'incertezza, indicata in percentuale del valore indicato, piu' un valore costante (offset); quest'ultimo e' ovviamente piu' influente per bassi valori misurati. L'accuratezza dipende pero' anche dalla frequenza di lavoro, dal livello di segnale, dal valore stesso dell'impedenza, per cui spesso e' espressa in funzione di tutti questi parametri.

- Livello di segnale: e' un parametro importante per le impedenze il cui valore dipenda appunto dal livello di segnale. In alcune situazioni il livello di segnale da applicare e' specificato dalla normativa a cui la misura da effettuare fa riferimento.

- Tempo di misura: e' dato dal tempo necessario per effettuare la misura vera e propria, ma dipende anche dai tempi di assestamento e di bilanciamento, che influiscono in maniera significativa per misure in cui e' necessario sconnettere e riconnettere il dispositivo sotto misura (D.U.T.), come avviene ad esempio per misure in linea di produzione.

- temperatura di lavoro: anche la temperatura incide sull'accuratezza del sistema.

Gli errori di misura dipendono dalla frequenza di lavoro, dalla configurazione, dal tipo di portacampioni (test fixture) utilizzato, per cui sono necessarie procedure di calibrazione e di compensazione, come si vedra' nel seguito, allo scopo di ridurre gli errori.

Collegamento del campione.

La parte di circuito (Fig. 1.4) a valle dell'impedenza incognita (amplificatore transresistivo) e' caratterizzata da impedenza d'ingresso molto bassa; senza perdita di generalita' essa puo' essere sostituita, in uno schema equivalente, da un amperometro (che e' caratterizzato, appunto, da bassissima impedenza d'ingresso); peraltro la funzione dell'amplificatore transresistivo e' proprio quella di permettere la misura della corrente I_x (mediante la misura della tensione V_u , ad essa proporzionale).

Sulla base di queste considerazioni l'amplificatore transresistivo nel circuito di Fig. 1.4 e' "funzionalmente equivalente" a un amperometro.

Si noti inoltre che la resistenza d'ingresso dell'amplificatore transresistivo (cioe' dell'amperometro la cui funzione svolge) puo' essere valutata applicando il teorema di Miller alla resistenza R_r ;

il circuito e' allora equivalente al sistema rappresentato in Fig. 1.6; la resistenza riportata sull'uscita e' stata omissa in quanto viene a trovarsi collegata a un generatore (comandato) di tensione con impedenza interna estremamente bassa, quale e' appunto quella dell'amplificatore operativo.

Il circuito che schematizza l'impedenza (Fig. 1.4) puo' allora essere ridisegnato come si vede in Fig. 1.7, nella quale il ramo contenente l'amperometro e' percorso dalla corrente da misurare e l'amplificatore operativo permette con la propria tensione d'uscita di valutarne l'entita'. Infatti si ha

$$(1)$$

avendo trascurato resistenza d'ingresso e resistenza d'uscita dell'amplificatore operativo. Il risultato ottenuto e' ovviamente valido fino a frequenze non eccessivamente alte, in conseguenza delle caratteristiche dell'A.O. e dei valori di R_r , R_s e Z_x .

Dipendentemente dalle caratteristiche dell'impedenza incognita (entita' e tipo), puo' essere opportuno utilizzare uno o l'altro dei seguenti modi di collegare il campione stesso allo strumento. Nel seguito si fara' riferimento a uno schema equivalente semplificato (Fig. 1.8), nel quale sono evidenziati il voltmetro (per la misura della tensione V_s), l'amperometro (per la misura della corrente I_r), il campione (Z_x) e, ove necessario, l'amplificatore

operazionale (che a sua volta schematizza un circuito eventualmente anche piu' complesso, come il rivelatore di zero seguito dal rivelatore di fase e dagli altri blocchi citati in precedenza).

Collegamento a due terminali: (Fig. 2.1)

il campione ha un terminale nel punto di massa virtuale, mentre l'altro terminale si trova alla tensione $V's$: e' il tipo di collegamento (apparentemente) piu' ovvio e piu' immediato da realizzare, ma risente di alcuni errori sistematici; per esempio l'impedenza parassita in parallelo al campione viene misurata insieme con quella del D.U.T. ed e' pertanto indistinguibile da essa; inoltre la resistenza (impedenza) dei contatti finisce in serie al campione: ovviamente quest'ultima ha effetti significativi se l'impedenza del campione da misurare e' dell'ordine della decina di ohm o inferiore.

Collegamento a tre terminali: (Fig. 2.2)

e' utilizzato per risolvere il primo problema; il terzo terminale, detto terminale di guardia, evita l'effetto dovuto alla capacita' parassita in parallelo, che adesso viene scomposta in due termini, ciascuno dei quali si trova tra uno dei terminali dell'impedenza da misurare e il terminale di guardia: se quest'ultimo e' collegato al terminale comune, uno dei due termini viene a trovarsi in parallelo al generatore di segnale (dove non ha effetti, se la tensione viene misurata), mentre l'altro finisce in parallelo all'amperometro (ed e' pertanto bypassata dalla bassa impedenza d'ingresso di questo). Generalmente l'impedenza parassita e' di natura capacitiva o resistivo-capacitiva e questo tipo di collegamento diventa utile per impedenze relativamente alte, dell'ordine del Megaohm.

Questa soluzione non produce effetti positivi per quanto riguarda le impedenze in serie al campione.

Collegamento a quattro terminali: in questo caso si ``rendono indipendenti'' i contatti attraverso i quali scorre la corrente che attraversa il campione (H_{cur} , L_{cur}) da quelli tra i quali si misura la tensione (H_{pot} , L_{pot}); nello schema in figura 2.3 il voltmetro e' stato spostato, ma misura ugualmente (come gia' nello schema in Fig.2.2, grazie al cortocircuito virtuale), la tensione ai capi dell'impedenza incognita.

Poiche' la misura della tensione viene effettuata con uno strumento che non assorbe corrente, le resistenze di contatto non introducono errore; e' da precisare che tutto questo e' vero se l'impedenza d'ingresso del voltmetro e' molto maggiore di quella da misurare.

Collegamento a quattro coppie di terminali: il collegamento e 4 contatti risente del fatto per cui, quando si misurano impedenze di valore molto basso, l'elevata corrente che percorre i terminali (attraverso cui si inietta corrente nel campione) per effetto dell'accoppiamento mutuo tra questi e i terminali voltmetrici, produce una tensione di errore. Nel collegamento a quattro coppie di terminali si utilizzano cavi coassiali per i collegamenti e i conduttori esterni di ogni cavo sono collegati insieme. Con questo accorgimento si annulla l'effetto dovuto alla mutua induzione tra i collegamenti amperometrici e voltmetrici.

La configurazione generalmente preferita, almeno per misure in cui e' richiesta una elevata accuratezza e' dunque quella a 4 coppie di conduttori. Il dispositivo viene pertanto collegato allo strumento utilizzando quattro spezzoni di cavo coassiale opportunamente connessi fra loro.

Per la necessita' di ricorrere (anche) a quest'ultimo tipo di collegamento, gli strumenti sono dotati di quattro (coppie di) terminali, mediante i quali il campione puo' essere opportunamente connesso allo strumento stesso in una delle quattro configurazioni esaminate. Esse corrispondono, nell'ordine, alle quattro situazioni schematizzate nelle figure 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9.

Un vincolo da tener presente e' quello della lunghezza L dei collegamenti, da mantenere piccola rispetto alla lunghezza d'onda di lavoro. E' consigliato il rispetto della relazione empirica $FL \leq 15$, con L =lunghezza del cavo espressa in metri ed F =frequenza, espressa in MHz. Dunque con $L=1m$, la max frequenza di lavoro possibile e' di 15 MHz.

Se questo limite non è rispettato, il ponte potrebbe non bilanciarsi. Il limite dato dalla relazione empirica può essere superato utilizzando circuiti con impedenza adattata a quella caratteristica dei cavi di collegamento impiegati.

È comunque necessario effettuare la calibrazione dello strumento utilizzando proprio i cavi che verranno impiegati per il collegamento del campione.

Anche il portacampioni gioca un ruolo importante nella misura delle impedenze, sia da un punto di vista meccanico (p. es. qualità del contatti), sia da un punto di vista elettrico (impedenze parassite). Il portacampioni (test fixture) dovrebbe essere scelto tenendo conto della frequenza di lavoro, della conformazione dei terminali del dispositivo da misurare, dei parametri parassiti (rispetto all'impedenza incognita) e della tensione di polarizzazione che può essere utilizzata.

Se per qualche ragione il dispositivo da misurare non può essere collegato allo strumento utilizzando il t.f. disponibile, è necessario operare in modo da minimizzare gli effetti indesiderati dovuti a impedenze parassite (ridurre la resistenza e l'induttanza serie, la capacità parallelo, estendere gli schermi il più possibile vicino al componente sotto esame). I terminali inoltre devono poter essere cortocircuitati e lasciati aperti per le operazioni di calibrazione.

Per dispositivi di elevata impedenza, l'effetto delle capacità parassite può comunque non essere trascurabile.

Errori e compensazione.

Alcune tra le cause di errore sono:

- imperfezioni dello strumento (anche le inaccurately sulla tensione di polarizzazione e sul livello di segnale);
- impedenze residue (cavi e portacampioni);
- rumore.

Calibrazione: con la calibrazione si definisce il c.d. piano di calibrazione, sul quale può essere ottenuta l'accuratezza dichiarata dal costruttore. Per calibrare lo strumento si utilizzano dispositivi "standard" (cortocircuito, circuito aperto, dispositivi campione di opportuna impedenza) collegati ai terminali dello strumento stesso (sul piano di calibrazione) e i dati rilevati (elaborati e opportunamente memorizzati) vengono utilizzati per la correzione delle misure. (v. dopo)

La compensazione invece riduce l'effetto delle cause di errore esistenti tra il piano di calibrazione e l'effettiva posizione del dispositivo sotto misura. In genere la compensazione non elimina TUTTI gli errori, per cui la misura effettuata dopo la compensazione sarà meno accurata di quella fatta sul piano di calibrazione. Calibrazione e compensazione sono due operazioni diverse e la compensazione non può sostituire la calibrazione. La compensazione, inoltre, deve essere effettuata DOPO la calibrazione.

Compensazione dell'offset:

Quando la misura è influenzata solo da una componente parassita elementare (cioè una semplice capacità, o induttanza, o resistenza), la correzione può essere effettuata semplicemente sottraendo il valore della componente parassita dal valore misurato. Esempio tipico è quello della capacità parassita tra i terminali, che introduce un errore nella misura di una capacità. Ovviamente la capacità parassita va misurata con i terminali dello strumento lasciati aperti.

Compensazioni in cortocircuito e a circuito aperto.

Sono le tecniche di compensazione più utilizzate, anche perché più semplici da attuare. Il metodo si basa sull'assunzione che l'impedenza parassita dovuta al portacampioni sia schematizzabile con un semplice circuito L-R-C-G. La procedura è piuttosto semplice: con i terminali in cortocircuito si misura l'impedenza serie $R_s + j\omega L_s$; poi, con i terminali aperti si misura l'ammittenza parassita $G + j\omega C$ tra i terminali stessi, (l'impedenza in serie è generalmente trascurabile rispetto al reciproco di $G + j\omega C$). A questo punto tutti i parametri dell'impedenza residua sono noti ed è possibile calcolare

l'impedenza del campione, dopo effettuata la misura.

Questa procedura e' tanto piu' efficace nel ridurre l'errore quanto piu' il modello utilizzato per la descrizione dell'impedenza residua e' aderente alla realta'.

Precauzione particolari:

nell'effettuare la misura a circuito aperto, e' necessario misurare correttamente la capacita' parassita, la quale dipende anche dalla distanza tra i terminali di misura: a questo proposito e' allora assicurarsi che la distanza tra i terminali sia, a vuoto, la stessa che si avra' quando il dispositivo verra' collegato.

Nell'effettuare la misura in cortocircuito e' invece opportuno assicurarsi del fatto che la resistenza (impedenza) del dispositivo utilizzato per cortocircuitare i terminali sia effettivamente molto minore di quella del dispositivo da misurare; i costruttori forniscono spesso degli accessori per cortocircuitare i terminali dello strumento che garantiscono tale condizione.

Compensazione a vuoto, in cortocircuito e con carico.

Vi sono particolari situazioni in cui il modello utilizzato sopra (L-R-C-G) per descrivere l'impedenza residua si rivela inadeguato; generalmente questa situazione si verifica quando tra i terminali dello strumento e il campione da misurare deve essere interposto un dispositivo complesso, come un amplificatore, o un circuito di polarizzazione esterna, o uno scanner, o un manipolatore o simili.

In questi casi e' necessario aggiungere alle due prove gia' descritte, una terza misura, effettuata su un'impedenza nota. Nello scegliere questa impedenza e' bene orientarsi verso un elemento campione, o comunque di cui si conosca il valore di impedenza con la migliore accuratezza possibile; il componente inoltre dovrebbe avere un'impedenza dipendente il meno possibile dalle condizioni di misura (temperatura, livello di segnale, flusso magnetico, ecc.). Per la misura del componente da utilizzare per la procedura di compensazione e' possibile utilizzare lo stesso strumento su cui si vuole effettuare la compensazione, cercando di lavorare nelle condizioni di massima accuratezza possibile.

Altro fattore che e' opportuno tenere presente e' quello delle dimensioni (geometriche) del dispositivo utilizzato per effettuare la compensazione sotto carico, che e' bene che siano quanto piu' e possibile vicine a quelle del D.U.T.

Inoltre e' bene utilizzare per la compensazione un'impedenza di valore il piu' possibile prossimo a quello del D.U.T. e lontano dai valori utilizzati per la compensazione in cortocircuito e a circuito aperto (dunque ne' molto piccola, ne' molto grande).