

Consiglio Nazionale delle Ricerche

ISTITUTO DI ELABORAZIONE DELLA INFORMAZIONE  
PISA

Pubblicazione A77-25

---

G. BERTINI - M. CHIMENTI - F. DENOTH

**TAU2: un terminale audio per esperimenti di "Computer Music"**

---

Estratto da: ALTA FREQUENZA dicembre 1977, Vol. 12,  
pp. 600-609.

## TAU2: un terminale audio per esperimenti di "Computer Music"

G. BERTINI, M. CHIAIENTI, F. DENOTTI - Istituto di Elaborazione della Informazione del CNR, Pisa

*Nel lavoro viene presentato un terminale audio, TAU2, capace di generare suoni complessi in tempo reale su comandi ricevuti da un calcolatore digitale di tipo generale.*

*Il terminale costituisce un valido mezzo di indagine nel campo della « computer music » e può essere usato ampiamente in esperienze di sintesi di suoni.*

*Il terminale ha buone prestazioni musicali, permette una diretta interazione fra utente e calcolatore e, per l'esecuzione automatica di brani musicali, richiede brevi tempi di unità centrale. Quest'ultima caratteristica lo differenzia da altri sistemi già usati nel campo della « computer music »; inoltre il TAU2 è connesso in « time-sharing » al calcolatore come una qualunque unità periferica.*

*Nel lavoro sono fatte alcune considerazioni sull'uso del calcolatore digitale in campo musicale e sono espresse alcune conclusioni basate sulla sperimentazione finora fatta con il TAU2.*

### 1. - INTRODUZIONE.

Il calcolatore digitale è impiegato da diverso tempo per l'elaborazione e la composizione di particolari brani musicali: dopo le prime esperienze di Hiller e Xenakis [1], risalenti agli anni 50, l'uso del calcolatore come « strumento musicale » si è rapidamente diffuso [2, 3, 4].

Dai lavori sinora sviluppati si desume che, mentre è relativamente semplice costruire dei programmi secondo i quali un calcolatore può produrre « codici musicali », e invece piuttosto difficile tradurre tali codici in suoni, in modo efficiente [5].

Un testo modificato o composto da un elaboratore deve essere eseguito o mediante strumenti di tipo tradizionale e interpreti umani, o in una maniera automatica per mezzo di opportune apparecchiature: l'interesse maggiore è rivolto verso quest'ultimo modo poichè non solo svincola l'uomo dalle difficoltà esecutive della tecnica tradizionale, particolarmente sentite nell'ambito della « computer music », ma in più consente un'esecuzione precisa e aderente al testo [1].

Quando è richiesta l'esecuzione automatica di un testo è necessario convertire i dati digitali, che rappresentano i codici musicali, in segnali elettrici adatti al pilotaggio di trasduttori elettroacustici. Si possono distinguere due metodi generali per fare la sintesi dei segnali audio per mezzo di un calcolatore digitale:

a) *Il calcolatore è usato per elaborare i dati musicali e per fare la sintesi dei segnali audio.* La tecnica

di sintesi più nota consiste nel determinare i valori di campionamento della forma d'onda da ottenere e nell'applicare tali valori ad un convertitore digitale/analogico (D/A); un procedimento che usa tale tecnica è stato sviluppato da M. V. Mathews ed è noto col nome « Music V » [6]. Un'altra tecnica, meno elaborata, consiste nel prelevare direttamente l'uscita di un registro della unità centrale di un calcolatore, che programmato opportunamente, fornisce un segnale audio monodico e a timbro fisso [7].

b) *Il calcolatore è usato solo per elaborare i dati musicali.* I parametri dei suoni, opportunamente codificati, sono inviati ad apparecchiature distinte che hanno il compito di convertirli in segnali audio secondo le tecniche più adatte, per esempio usando oscillatori controllati in vario modo [8].

Il primo metodo è flessibile, ma costoso e poco efficiente: la sintesi anche di poche note contemporanee richiede un notevole tempo di impiego dell'unità centrale del calcolatore, e l'esecuzione in tempo reale è ottenibile solo con sistemi di elaborazione veloci e interamente dedicati. Il secondo metodo è in generale più rigido ma più efficiente perchè fa risparmiare tempo di calcolo e permette di fare una sintesi di segnali in tempo reale in maniera agevole.

Gli autori hanno lavorato alla sintesi di segnali audio per l'esecuzione automatica di brani musicali, congiuntamente con ricercatori del Centro Nazionale Universitario di Calcolo Elettronico già impegnati in esperimenti di computer music [9, 10], con l'obiettivo di mettere a punto un sistema per l'esecuzione automatica di brani polifonici, capace di lavorare in tempo reale operando nell'ambito di un sistema a partizione di tempo (time-sharing). Per quanto riguarda le caratteristiche dei suoni, l'impegno è stato rivolto verso la disponibilità di un'estesa gamma di valori dei parametri, piuttosto che verso l'imitazione a priori di determinati strumenti tradizionali.

### 2. - LA « COMPUTER MUSIC » MEDIANTE UN TERMINALE AUDIO.

In base agli obiettivi stabiliti e mediante la scelta di opportune tecniche di sintesi è stato concluso che l'uso di terminali audio può risultare conveniente, oltre che per le prestazioni ottenibili, anche dal punto di vista economico.

E' stato quindi seguito il secondo metodo generale precedentemente citato e un primo risultato è stato raggiunto nel 1972 con il prototipo sperimentale TAU1; questo terminale produceva segnali analogici per sintesi armonica in base ai comandi ricevuti fuori linea

(\*) Relazioni tecniche da Industrie, Enti d'esercizio, Centri di ricerca e Università.

per mezzo di un lettore di nastro [11]. Il TAU1 ha permesso di valutare i livelli di quantizzazione dei parametri che definiscono il suono, in modo da raggiungere un buon compromesso tra la qualità dei suoni emessi e la quantità di dati elaborati dal calcolatore; sulla base di questi esperimenti si è proceduto al progetto e alla realizzazione di un secondo terminale, il TAU2 [12].

Questo apparecchio, dotato di ampie caratteristiche musicali, è capace di produrre suoni complessi senza interruzioni e consente all'utente di ascoltare in tempo reale il risultato di elaborazioni complesse di brani polifonici inseriti in memoria, sfruttando le ampie possibilità offerte da un sistema « time-sharing » IBM 370/168.

L'organizzazione del sistema che usa il terminale TAU2 è mostrata in fig. 1.

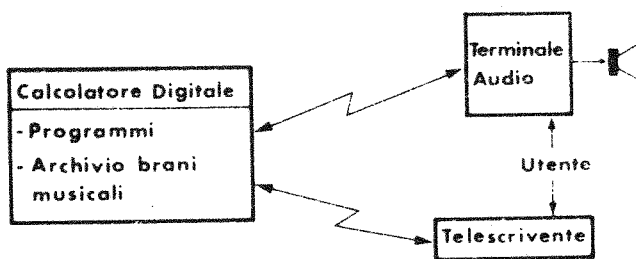


Fig. 1. Organizzazione del sistema di computer music.

### 3. - CRITERI DI PROGETTO DEL TAU2.

#### a) Principio di funzionamento.

Una nota musicale eseguita da uno strumento da luogo ad un suono complesso caratterizzato dagli attributi di *altezza, durata, intensità e timbro*, a cui corrispondono, rispettivamente, le grandezze fisiche: *frequenza fondamentale, tempo in cui l'intensità supera la soglia di udibilità, potenza e composizione armonica del suono* [13]. Tali grandezze variano in generale in modo continuo nel tempo [14, 15], ma tenendo conto delle caratteristiche della percezione auditiva [16, 17, 18, 19], le funzioni continue che caratterizzano i suoni possono essere approssimate con funzioni a gradino opportune. Basandosi sul criterio dell'analisi armonica si può rappresentare un suono con una relazione del tipo seguente:

$$(1) \quad S(t) = \sum_{n=1}^M A_n(k) \sin [2\pi n f(k)t + \varphi_n(k)]$$

con  $kT \leq t \leq (k+1)T$

dove

- $n$  = numero d'ordine della componente armonica;
- $M$  = numero massimo di armoniche;
- $k$  = 1, 2, 3, ...;
- $A_n$  = ampiezza dell'ennesima componente armonica;
- $f$  = frequenza fondamentale;
- $\varphi_n$  = fase dell'ennesima componente armonica;
- $T$  = unità di misura degli intervalli temporali.

Viceversa un suono qualsiasi può essere approssimato sommando opportunamente dei segnali elettrici sinusoidali specificati dai parametri  $A_n, f, \varphi_n$  che variano in modo discreto nel tempo.

Il TAU2 è impiegato per eseguire « computer music » e per questo deve essere in grado di produrre un elevato numero di segnali con parametri variabili entro una estesa gamma di valori ma non necessariamente i suoni prodotti devono essere identici a quelli di strumenti tradizionali. In conseguenza di ciò e a causa della scarsa sensibilità dell'udito rispetto alla fase delle componenti di un suono si è adottato il principio della sintesi armonica, introducendo però delle semplificazioni alla (1):

- $M$  può assumere al massimo il valore 7, oppure con un uso particolare del TAU2, il valore 15;
- la fase dei segnali non è controllata, quindi il parametro  $\varphi$  è omissso;
- i parametri controllati ( $A_n, f, T$ ) sono definiti entro determinati insiemi di valori, scelti tenendo conto di alcuni criteri di semplicità di realizzazione.

In definitiva un brano polifonico codificato in uno spartito (note musicali con relativi timbri e intensità) può essere specificato, e quindi eseguito dal TAU2, per mezzo di una successione di coppie  $(P_k, t)$ , dove  $t$  è l'intervallo di tempo in cui sono validi i parametri  $P_k = \{(A_n)_h, f_h\}$ , con  $1 \leq h \leq N$ ,  $N$  essendo il numero di note da emettere contemporaneamente.

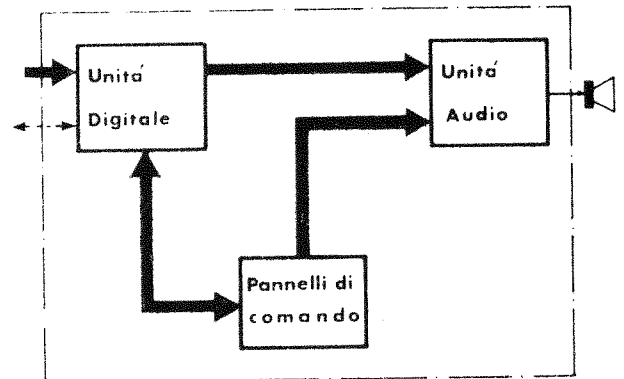


Fig. 2. Struttura del TAU2.

La fig. 2 mostra la struttura del TAU2. In essa si distinguono: l'unità digitale, che riceve dal calcolatore i parametri dei suoni opportunamente codificati, li memorizza, li interpreta, e comanda l'unità di uscita; l'unità di uscita, detta unità audio, che produce i segnali analogici in base ai comandi ricevuti; il pannello di comando col quale si definiscono le modalità di funzionamento del terminale.

#### b) Caratteristiche musicali.

Il requisito principale del terminale è l'emissione contemporanea di un numero di note sufficiente a riprodurre brani musicali di una certa complessità, senza ricorrere alla tecnica del « play-back ». L'esecuzione di un pezzo di musica dev'essere inoltre indipendente dalla velocità di trasmissione dei dati.

Per simulare differenti sorgenti sonore distribuite su un piano il TAU2 genera suoni su tre diversi canali, simultaneamente. Ciascun canale può emettere contemporaneamente fino a 4 note, caratterizzate dalla stessa intensità e dalla stessa composizione armonica (fino a 7 armoniche). L'altezza di ciascuna nota

può essere selezionata fra 32 Hz e 16 kHz, con la risoluzione di 1/3 di semitono della scala temperata.

L'intensità di ciascuna componente armonica, specificata da un'apposita istruzione, può assumere una fra otto valori, mentre l'intensità complessiva di ciascun canale può essere controllata su una gamma di 16 valori. La lunghezza di un suono con parametri costanti, data in unità di tempo interna, va da 1 a 31; il valore assoluto dell'unità di tempo può essere scelto tra 1 ms e 999 ms con la definizione di 1 ms.

c) *Organizzazione dei dati d'ingresso.*

Per ridurre al minimo il flusso dei dati ogni parametro dovrebbe essere spedito al TAU2 con un proprio codice di identificazione: ciò comporterebbe una organizzazione dei dati piuttosto complicata a cui farebbe riscontro una complessa struttura dell'unità digitale. Una semplificazione notevole è stata ottenuta raggruppando i parametri d'ingresso secondo criteri di omogeneità e modularità. Sono stati definiti due insiemi di parametri di dimensione variabile, che si possono considerare come particolari istruzioni musicali a formato variabile: una di esse, chiamata istruzione timbro (I.T.), contiene i parametri  $A_n$ , mentre l'altra, chiamata istruzione suono (I.S.), contiene i parametri rimanenti.

Per determinare il formato minimo dell'istruzione timbro si è osservato che per modificare la timbrica di un canale è in generale necessario ridistribuire le ampiezze di tutte le armoniche: è stato stabilito perciò un modulo di informazione timbro di 3 byte (fig. 3). Nell'istruzione timbro sono codificate soltanto

le ampiezze delle componenti armoniche: le frequenze sono ricavate automaticamente per via « hardware » in base al valore della frequenza fondamentale codificato nell'istruzione suono.

L'istruzione suono (fig. 3 b) contiene gli altri parametri che sono stati raggruppati seguendo lo stesso criterio di modularità per canale: in un modulo di questa istruzione sono codificate infatti le 4 frequenze fondamentali delle note, gli effetti speciali e l'intensità validi per un canale. Il modulo suono è lungo 5 byte.

Nelle istruzioni ciascuno dei tre bit di identificazione canale è abbinato ad uno dei tre canali audio: se un bit vale 1 l'istruzione contiene il modulo di informazione del canale a cui il bit si riferisce, se vale 0 non lo contiene. In tal modo risulta possibile trasmettere al terminale istruzioni che contengono solamente i moduli relativi ai canali che devono ricevere nuovi parametri; i rimanenti canali vengono comandati dai parametri definiti dalle istruzioni precedenti.

Infine, il parametro  $D$  specifica, in termini di unità relative, l'intervallo di tempo durante il quale si ha l'emissione invariata dei suoni relativi sia ai parametri definiti dall'istruzione attuale, sia a quelli definiti in precedenza; il tempo reale è dato da:

$$(2) \quad t = DT; \quad 1 \leq D \leq 31$$

dove  $T$  è l'unità di tempo prefissata sul pannello di controllo del TAU2.

E' possibile cambiare allo stesso tempo un qualsiasi insieme di parametri con l'istruzione mostrata

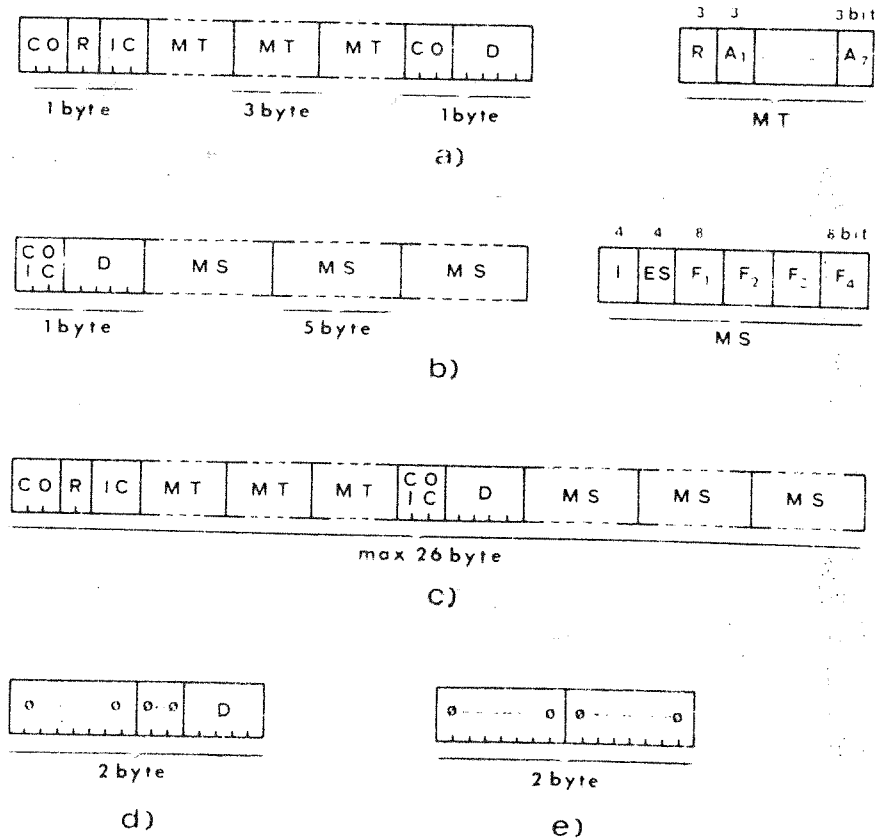


Fig. 3. - Formati delle istruzioni di ingresso del TAU2. a) Istruzione timbro; b) Istruzione suono; c) Istruzione timbro (suono); d) Estensione di tempo; e) Fine brano. CO = Codice operativo; IC = Identificatori canali; MT = Modulo timbro;  $A_n$  = Ampiezza armoniche; D = numero unità di tempo; MS = Modulo suono; I = Intensità; ES = Effetti speciali; F = Frequenza fondamentale; R = Riserva.

in fig. 3c, mentre l'istruzione di fig. 3d è usata per mantenere costanti i parametri per intervalli di tempo superiori a  $31 \times T$ . Con l'istruzione di fig. 3e, detta « fine brano », non viene emesso alcun suono dalla unità audio, e l'unità digitale viene posta in uno stato adatto a iniziare l'esecuzione del brano successivo senza bisogno di alcun intervento sul pannello di controllo.

In caso di espansione del sistema, ulteriori informazioni, diverse da quelle previste attualmente, possono essere trasmesse per mezzo dell'istruzione timbro, usando i bit di riserva (R) come estensione di codice.

#### 4. - STRUTTURA E FUNZIONAMENTO DEL TAU2.

Un testo musicale, indipendentemente dalla sua rappresentazione nella memoria del calcolatore, viene trasmesso al terminale per mezzo di blocchi di byte di lunghezza fissa, contenenti le istruzioni musicali definite nel paragrafo 3c: durante il funzionamento il terminale deve esaminare ed interpretare in sequenza tali istruzioni, ed eseguirle secondo il vincolo temporale espresso nella (2).

E' stato detto in precedenza che i parametri possono essere modificati ad intervalli di tempo compresi tra 1 ms e 999 ms; il minimo intervallo di tempo utilizzabile ai fini musicali è stato valutato dell'ordine di  $10^{-2}$  s [14], ed il TAU2 deve essere perciò in grado di avere a disposizione sequenze di istruzioni alla frequenza di 100 Hz. Questo è un valore di picco che si verifica in funzione della complessità del brano da eseguire e per brevi intervalli di tempo; anche se in generale la frequenza media si mantiene al disotto di tale valore, il tipico metodo di accesso delle periferiche in un sistema « time-sharing », non consente di acquisire la quantità di byte che sono necessari a determinati istanti. Il TAU2 è stato quindi dotato di una memoria tampone divisa in due metà: alternativamente una metà, riempita in precedenza, viene letta mentre nell'altra metà vengono inseriti i nuovi dati in arrivo dal calcolatore.

La dimensione della memoria è stata determinata in modo tale che durante il normale funzionamento al termine della lettura di una semimemoria l'altra metà sia sicuramente piena, in modo da non avere delle pause indesiderate durante l'esecuzione di un brano musicale. E' quindi soddisfatta la seguente relazione:

$$(3) \quad \frac{N}{2} \geq \left( T_a + \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{V_i} \right) V_s$$

dove:

$N$  = capacità della memoria

$T_a$  = tempo di accesso al collegamento

$V_i$  = velocità di trasmissione dei dati d'ingresso

$V_s$  = velocità media di svuotamento della memoria.

I valori di  $V_i$  e di  $T_a$  sono stati fissati pensando ad un collegamento a distanza del TAU2 mediante una linea telefonica affittata per la trasmissione dei dati d'ingresso. Si è dunque posto:

$V_i$  = 4800 bit/s. Questa è una velocità consentita da linee affittate coi modem attualmente disponibili a costi ragionevoli.

$T_a$  = 5 s. Questo valore è generalmente superiore ai tempi di accesso consentiti da un sistema IBM 370/168 che opera in « time-sharing ».

Inoltre si ha:

$V_s$  = 1600 bit/s. Questo valore è il risultato di una stima approssimata fatta considerando un certo numero di brani polifonici (1).

Sostituendo i valori dei parametri suddetti nella (3) otteniamo il valore  $N = 24000$  bit. In pratica è stata adottata una memoria di 32 kbit.

Lo schema a blocchi completo del TAU2 è mostrato in fig. 4; i componenti sono:

- IE - Interfaccia esterna. E' l'interfaccia di terminazione del collegamento. Essa possiede un proprio controllo cosicché il modo di trasferire i dati (sincrono e asincrono) può essere cambiato agendo solo sull'interfaccia esterna e non sul TAU2.
- II - Interfaccia d'ingresso. E' un circuito provvisto di due vie di ingresso dati a 8 bit ciascuna e di alcuni sincronismi per le linee di controllo.
- MT - Memoria tampone. E' una RAM di 32762 bit a semiconduttori con 500 ns di tempo d'accesso, organizzata a byte di 8 bit: i due blocchi in cui è idealmente suddivisa sono composti da 2048 byte ciascuno. E' corredata di due puntatori di 12 bit per gli indirizzi di lettura e scrittura.
- RI - Registro istruzione. E' un registro diviso in due parti, RIT, che contiene l'istruzione timbro, e RIS, che contiene l'istruzione suono. Ambedue le parti funzionano a scorrimento e hanno lunghezza pari al massimo formato delle corrispondenti istruzioni.
- RU - Registro d'uscita. E' un registro composto da sei sezioni programmabili che ricevono in parallelo da RI i moduli d'informazione e li presentano, ancora in parallelo, all'unità audio.
- UC - Unità di controllo. E' un'unità microprogrammata che gestisce il collegamento, la scrittura nella memoria e la decodifica a esecuzione delle istruzioni.
- O - Unità di tempo. E' un orologio che stabilisce l'istante di esecuzione delle istruzioni.
- PC - Pannello di comando. E' un quadro composto da comandi e indicatori che consentono all'utente di comunicare con l'unità di controllo.
- C1, C2, C3 - Sono tre canali identici che producono i segnali di uscita del TAU2 in base ai parametri forniti dal registro d'uscita dell'unità digitale.

(1)  $V_s$  dipende dalla struttura originaria dei brani musicali, dal particolare intervallo di tempo considerato e dalle eventuali elaborazioni che si desiderano fare sui parametri dei suoni. Da una analisi empirica condotta su un certo numero di brani polifonici complessi è stato trovato che per intervalli di tempo superiori a 5 s la frequenza media di istruzioni necessarie per cambiare i parametri dei suoni emessi si stabilizza al disotto di ~ 25 istruzioni/s. Supponendo che ogni volta siano interessati i parametri di due canali dei tre disponibili sul TAU2 e che siano trasmesse sia istruzioni suono che timbro, si ottiene per la velocità media di svuotamento della memoria un valore di circa 1600 bit/s.

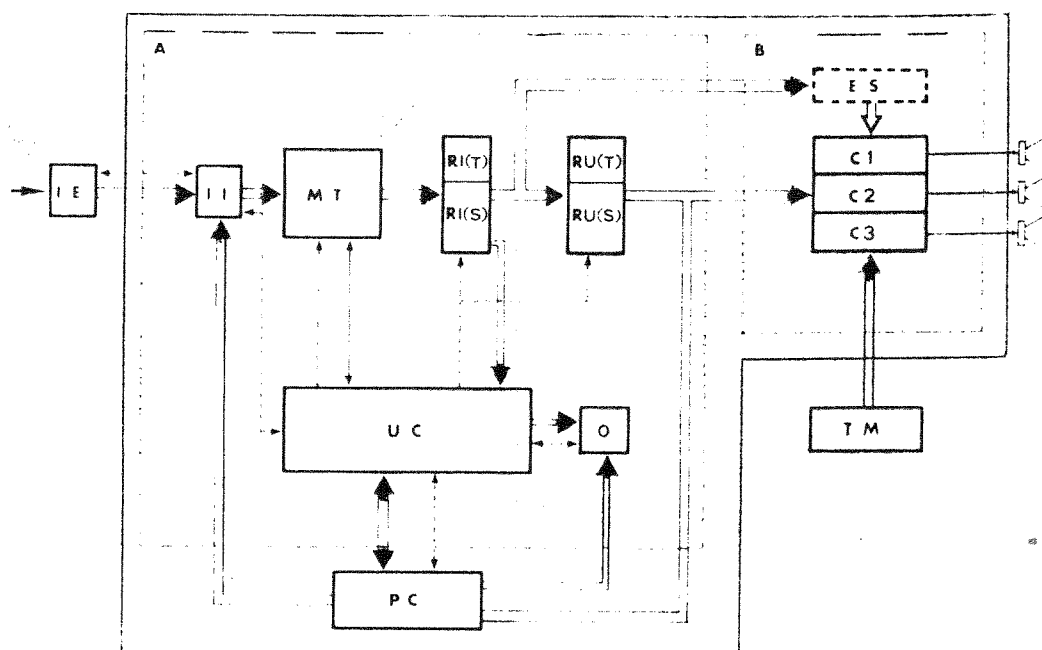


Fig. 4. - Schema a blocchi del TAU2. A - Unità digitale; B - Unità audio; IE - Interfaccia esterna; II - Interfaccia interna; MT - Memoria tampone; RI - Registro istruzione; RU - Registro di uscita; UC - Unità di controllo; O - Orologio; PC - Pannello di comando; ES - Effetti speciali; C - Canali audio; TM - Tastiera musicale.

TM - Tastiera musicale. E' una tastiera a 255 tasti che consente all'utente di suonare manualmente le note del canale 1 mentre i canali 2 e 3 sono comandabili dal calcolatore.

ES - Effetti speciali. Sono apparati speciali (in via di realizzazione) coi quali si possono manipolare per programma e manualmente i suoni generati dai tre canali.

Le principali operazioni effettuate dal TAU2 sono:

- a) *Scrittura dei dati:* vengono gestiti il collegamento col calcolatore ed il caricamento dei blocchi di dati contenenti le istruzioni nella memoria tampone del terminale. Appena iniziata la trasmissione di un blocco, i dati vengono presentati all'ingresso del TAU2, byte per byte, col meccanismo di domanda e risposta, e memorizzati in posizioni consecutive della memoria. La trasmissione del primo blocco può avvenire su iniziativa o del calcolatore o del terminale; a regime è solo il terminale che richiede automaticamente un nuovo blocco di dati al termine della lettura di ogni blocco. Ad ogni scrittura di un byte e alla fine della scrittura di ogni blocco vengono effettuati controlli sulla correttezza della trasmissione, e aggiornati i puntatori di indirizzo della memoria.
- b) *Chiamata dell'istruzione:* l'istruzione  $I_{k+1}$ , successiva a quella attuale, viene letta dalla memoria e preparata nel registro RI. I byte che compongono  $I_{k+1}$  vengono letti da posizioni consecutive della memoria e vengono fatti scorrere in RI fino alla posizione determinata dai bit di IC contenuti nel primo byte letto. Ad ogni lettura di un byte e al termine della lettura di ogni blocco vengono aggiornati i puntatori d'indirizzo e vengono fatti dei controlli per decidere se proseguire la lettura e inviare la richiesta di un nuovo blocco

di dati, oppure se sospendere le operazioni. Durante la preparazione di  $I_{k+1}$  l'unità audio emette i suoni determinati dai parametri contenuti nell'istruzione attuale  $I_k$ . La preparazione dell'istruzione viene fatta in meno di 1 ms; è così possibile cambiare i parametri dei suoni alla velocità limite di 1 kHz ( $D = 1, T = 1$  ms).

- c) *Esecuzione dell'istruzione:* alla scadenza del tempo associato all'istruzione  $I_k$  viene esaminato il codice operativo di  $I_{k+1}$ . Se non si tratta di un « fine brano » (fig. 3e), i nuovi moduli di informazione vengono trasferiti in base ai bit di IC da RI alle corrispondenti sezioni di RU. Inoltre viene trasferito il parametro D all'orologio O, avviando il nuovo conteggio del tempo.

Come si può facilmente dedurre i processi originati dall'esecuzione ciclica delle operazioni suddette sono asincroni, rispettano varie esigenze temporali e interagiscono tra loro, per cui si possono verificare dei conflitti per l'accesso alla memoria tampone o al controllo dell'unità digitale; come vedremo in seguito un'appropriata organizzazione sincronizza opportunamente tali processi.

Descriviamo ora brevemente la struttura delle due unità in cui è suddiviso il terminale.

## 5. - L'UNITÀ DIGITALE DEL TAU2.

Un sistema digitale può essere schematizzato in generale con un modello composto da due macchine sequenziali interconnesse (fig. 5) ed operanti simultaneamente, dette rispettivamente parte controllo (PC) e parte operativa (PO) [20, 21]: PC manda a PO i comandi  $\{\alpha\}$  per l'esecuzione delle operazioni elementari; PO esegue le operazioni e invia a PC le condizioni  $\{x\}$  necessarie per determinare i comandi successivi.



La parte operativa dell'unità digitale del TAU2 comprende i sottosistemi indicati nello schema a blocchi di fig. 4, parte A. Tali sottosistemi hanno un sincronismo comune ad eccezione dell'orologio O che ha temporizzazione autonoma: la condizione di « tempo scaduto » per l'istruzione corrente viene acquisita con un meccanismo del tipo « interrogazione a programma ».

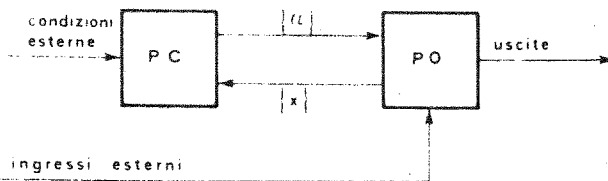


Fig. 5. - Modello generale di un sistema digitale. PC - parte controllo; PO - parte operativa; {α} = variabili di comando; {x} = variabili di condizionamento.

L'unità di controllo, visti il tipo di procedure da eseguire e la velocità richiesta, è stata dotata di una organizzazione microprogrammata: com'è noto, i vantaggi di una tale scelta consistono nella semplicità e nella sistematicità del progetto, e nelle facilitazioni per la manutenzione dell'intero sistema [22]. Sono stati definiti due microprogrammi: un microprogramma che esegue in sequenza le operazioni *b* e *c*, più altre operazioni secondarie, e un sottomicroprogramma che esegue le operazioni *a* relative alla scrittura di un singolo byte; la scrittura di un intero blocco avviene percorrendo 2048 volte il sottomicroprogramma.

Il controllo è impegnato normalmente all'esecuzione del microprogramma. Quando l'interfaccia esterna IE richiede di scrivere un byte in memoria il microprogramma è interrotto alla fine della microistruzione corrente e il controllo viene passato al microprogramma. Eseguita la scrittura del byte il controllo viene restituito al microprogramma fino alla richiesta successiva. Il segnale di risposta inviato

dal TAU2 a IE è convenientemente ritardato per consentire l'esecuzione di un certo numero di microistruzioni del microprogramma fra due richieste consecutive. Con tale soluzione i dati d'ingresso possono essere trasmessi sia con modalità sincrona che asincrona con velocità massima di 50 kbyte/s e la preparazione delle istruzioni di qualsiasi formato avviene entro il limite previsto di 1 ms, anche durante la ricezione di un blocco. L'esecuzione del sottomicroprogramma richiede circa 25 μs, per cui, se nel frattempo si verifica la condizione di « tempo scaduto » per l'istruzione  $I_k$ , l'introduzione dei parametri di  $I_{k+1}$  in RU viene effettuata con un ritardo acusticamente inavvertibile.

Lo schema dell'unità di controllo è riportato in fig. 6. Il tipo di microprogrammazione usato è quello orizzontale o strutturato [23], adatto alla realizzazione di apparecchiature particolari; la struttura delle microistruzioni è la seguente [24]:

(4)

$\alpha_i$	$g_1$	$g_2$	$r$	$ie$	$csx_i$	$csi_i$
------------	-------	-------	-----	------	---------	---------

dove:

- $\alpha_i$  = sottoinsieme di comandi decodificati (7 bit)
- $g_1, g_2$  = sottoinsiemi di comandi codificati (3 bit, 4 bit)
- $r$  = riserva (6 bit)
- $ie$  = indirizzo esplicito per la microistruzione successiva (6 bit)
- $csx_i$  = codice per la selezione della variabile di condizionamento (5 bit)
- $csi_i$  = codice per la selezione di un indirizzo implicito per la microistruzione successiva (2 bit), scelto tra: indirizzo della microistruzione attuale + 1, costante impostata sul pannello di comando, indirizzo di rientro dal sottomicroprogramma.

Le microistruzioni sono memorizzate in una ROM di  $64 \times 33$  bit di capacità. Essendo l'apparecchiatura un prototipo si è preferito realizzare la ROM con componenti discreti, rendendo così più agevoli eventuali modifiche dei microprogrammi; il tempo d'accesso è di 150 ns [25].

Altri dettagli sul progetto e sulla costruzione dell'unità digitale sono date in [26]; citiamo solo, fra le numerose facilitazioni ottenute grazie alla struttura microprogrammata, il meccanismo della « sonata ripetuta »: mediante un interruttore si interrompe il collegamento col calcolatore, e l'esecuzione del brano contenuto in memoria può essere ripetuta indefinitamente finché non viene riattivato il collegamento. Durante le esecuzioni si possono variare manualmente alcuni parametri del suono e valutare immediatamente gli effetti prodotti da tali cambiamenti.

#### 6. - L'UNITÀ AUDIO DEL TAU2.

L'unità audio riceve dall'unità digitale i parametri numerici e li converte in segnali analogici secondo il processo menzionato nel paragrafo 3.

Per la generazione dei segnali componenti non sono stati usati VCO (Voltage Controlled Oscillator)

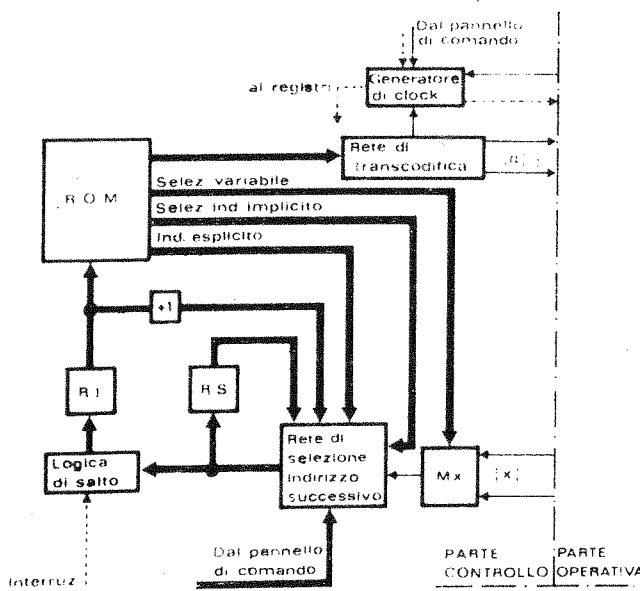


Fig. 6. - Struttura del controllo dell'unità digitale. RI - Registro indirizzo microistruzione attuale; RS - Registro di salvataggio; Mx - Multiplexer.

principalmente per due ragioni: l'insufficiente stabilità di frequenza dei dispositivi disponibili al momento dello sviluppo del progetto (a questo proposito si ricorda [17] che un orecchio esercitato riesce ad apprezzare variazioni di frequenza dell'ordine dell'1‰), e il notevole numero di segnali da produrre simultaneamente. Questo numero è infatti dato dalla relazione:

$$(5) \quad 4 \text{ note} \times 7 \text{ armoniche} \times 3 \text{ canali} = 84 \text{ segnali}$$

Sono stati quindi usati dei generatori a frequenza costante.

La frequenza delle note è distribuita regolarmente su diverse ottave e ciascuna ottava contiene 36 note distanti 1/3 di semitono della scala temperata: il rapporto fra due frequenze contigue è quindi  $\sqrt[3]{2}$ .

Un insieme di 36 oscillatori controllati a quarzo è stato usato per ottenere l'ottava più alta; le altre ottave sono ottenute per mezzo di divisioni binarie. Le onde quadre prodotte dagli oscillatori o dai divisori sono ridotte a onde sinusoidali per mezzo di filtri passivi L-C: si dispone così di un banco di segnali sinusoidali a bassa distorsione armonica (fig. 7).

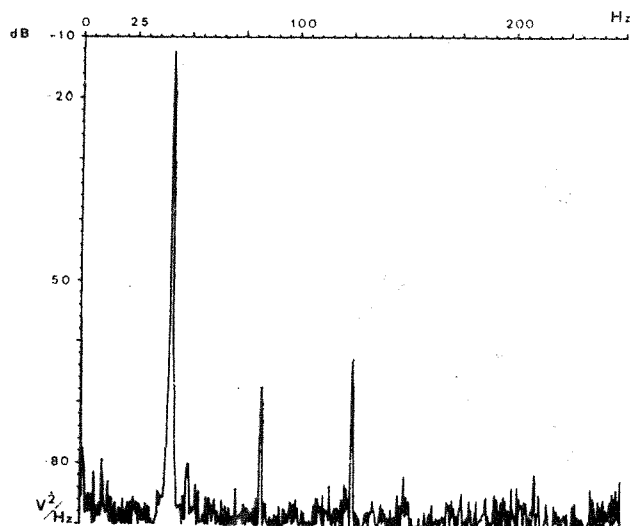


Fig. 7. - Spettro tipico di una nota ( $F_0$ ;  $f_0 = 43$  Hz).

frequenza e ampiezza costanti, dal quale si ottengono le frequenze specificate nelle istruzioni per mezzo di una rete di selezione controllata digitalmente.

La struttura di un canale audio è mostrata in fig. 8. Vengono effettuate le seguenti operazioni: sulla barra  $B_1$  o barra della fondamentale, sono sommati i segnali d'ingresso le cui frequenze sono definite dai valori di  $F_1, \dots, F_4$  contenuti nell'istruzione corrente, mentre sulle barre  $B_2, \dots, B_7$  sono automaticamente sommate le corrispondenti armoniche.

I modulatori di ampiezza  $M_1, \dots, M_7$  regolano l'intensità delle armoniche in accordo coi valori  $A_1, \dots, A_7$ ; i segnali in uscita dei modulatori sono sommati e il segnale risultante è controllato in ampiezza dal modulatore  $M_1$  secondo il parametro  $I$  dell'istruzione corrente.

Il segnale all'uscita di un canale all'interno dell'in-

tervallo di tempo  $DT$  è definibile con la seguente espressione:

$$(6) \quad U(t) = g(t) A_0 \sum_{n=1}^7 g(A_n) \sum_{l=1}^4 \sin(2\pi n f(F_l) t + \varphi)$$

dove:

- $g$  = funzioni di trasferimento dei modulatori
- $A_0$  = ampiezza dei segnali di ingresso
- $f(F_l)$  = frequenza dei segnali di ingresso
- $\varphi$  = fase dei segnali di ingresso.

I particolari del progetto elettronico sono dati in [27].

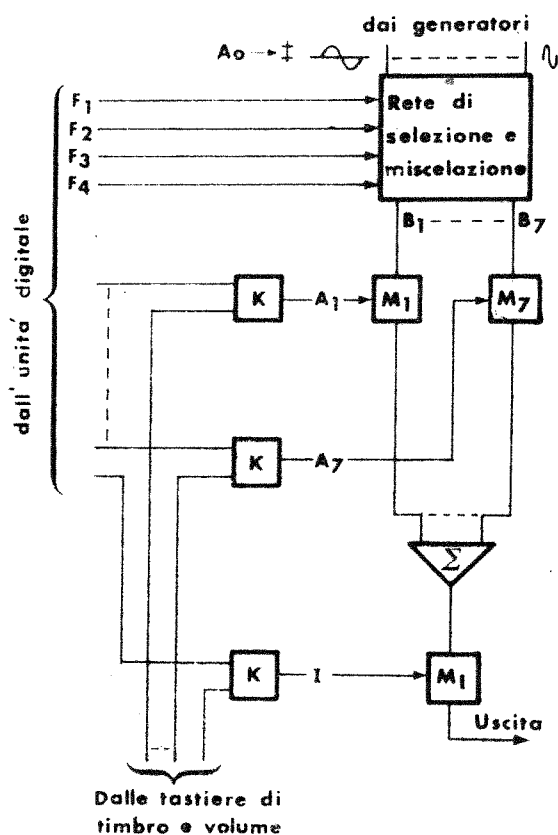


Fig. 8. - Struttura di un canale audio. K = Selettori; Σ = Sommatore; M = Modulatori d'ampiezza.

### 7. - MODALITÀ D'USO DEL TAU2.

La fig. 9 mostra una visione d'insieme del TAU2. L'unità audio è montata in un contenitore appositamente realizzato, mentre l'unità digitale è montata su un telaio standard insieme ai pannelli di comando e di manutenzione, ed agli amplificatori di potenza delle uscite audio.

Diamo un cenno alle possibilità offerte all'utente del terminale audio dal « software » di gestione TAUMUS [28] realizzato dalla Divisione Musicologica del CNUCE; le principali operazioni che si possono compiere tramite telescrivente sono:

- 1) *Inserimento di testi musicali nella memoria del calcolatore.* L'utente ha a disposizione due comandi: il comando TEXT, per l'inserimento in memoria tramite diverse periferiche d'ingresso di uno spartito di tipo tradizionale, ed il comando



CREATE, per la generazione automatica di strutture musicali qualsiasi. Nel primo caso l'utente deve specificare la sequenza esatta delle note da eseguire: ad esempio, per archiviare un brano polifonico l'utente deve codificare successivamente le varie voci del testo, definendo la durata di ciascuna nota di ogni voce, il timbro e il volume del canale che emetterà la nota. Nel secondo caso il calcolatore genera automaticamente delle sequenze di codici di suoni i cui parametri sono deter-

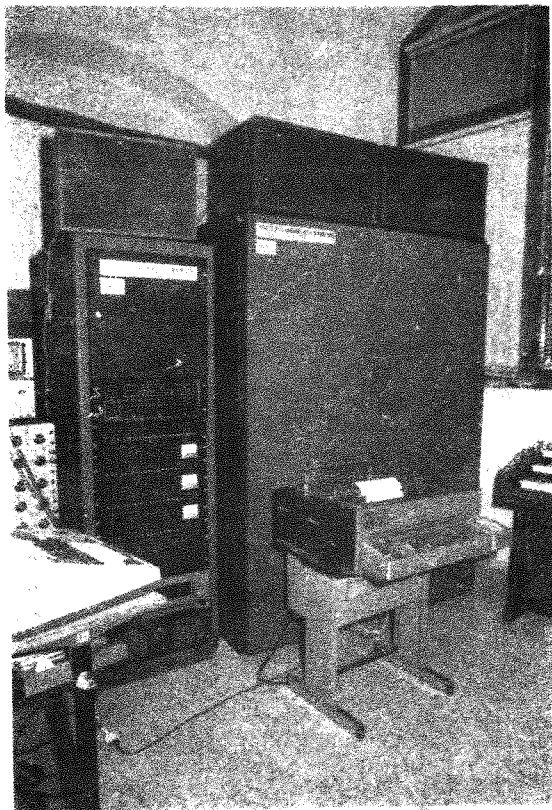


Fig. 9. - Vista d'insieme del sistema TAU2. Sullo sfondo da sinistra a destra: unità digitale e unità audio; in primo piano teletestante e tastiera musicale.

minati da algoritmi controllati da numeri generati in modo pseudo casuale; l'utente può controllare l'elaborazione mediante appositi comandi.

- 2) *Esecuzione di testi musicali.* Al comando PLAY il programma esamina il testo residente in memoria (oppure un sottoinsieme di esso) e forma le corrispondenti istruzioni musicali nel numero necessario per riempire una memoria volatile (buffer) di 2048 byte; un programma di canale invia il contenuto del «buffer» al TAU2 quando questo richiede un nuovo blocco di dati.

Col comando PLMD il testo in memoria viene eseguito con varie modifiche: si possono variare o invertire i rapporti intervallari, modulare timbro volume o frequenza dei suoni, introdurre rallentandi o accelerandi, eccetera; l'utente specifica per mezzo di opportuni comandi le variazioni che intende introdurre di volta in volta nel testo originale per ottenere particolari effetti sonori.

- 3) *Gestione dell'archivio dei testi musicali.* L'utente dispone di numerosi comandi di tipo tradizionale

per la gestione dell'archivio musicale; di essi citiamo soltanto i comandi SAVE e LOAD, che permettono rispettivamente di trasferire un testo dalla memoria all'archivio, e viceversa. Oltre ai testi musicali veri e propri l'utente può inserire nell'archivio anche dei modelli di timbrica e di volume, con cui può modulare durante l'esecuzione i parametri originali dei suoni per ottenere determinati involucri delle forme d'onda prodotte dal TAU2.

L'utente dispone inoltre di comandi manuali, situati sul pannello di comando del terminale, coi quali può determinare in qualsiasi momento la base dei tempi, e il timbro e il volume dei canali.

## 8. - RISULTATI SPERIMENTALI.

Il terminale audio è funzionante dalla seconda metà del 1975; il sistema non è ancora dotato di circuiti che realizzano effetti speciali quali riverbero, tremolo, modulazione di volume, etc. Alcuni di essi sono attualmente realizzati via «software». Questo modo di operare implica un aumento del flusso dei dati dal calcolatore al terminale e di questo è stato tenuto conto nella scelta del collegamento impiegato per la fase iniziale di sperimentazione. Infatti la trasmissione avviene su un cavo diretto multipolare con il sistema PDA (Parallel Digital Adapter) tramite canale «selector». Con tale soluzione il calcolatore fornisce i dati alla massima velocità consentita dal TAU2, ed è possibile, per esempio, effettuare modulazioni di intensità o cambiare la struttura armonica ad intervalli di pochi millisecondi senza limitazioni di tempo senza richiedere particolari priorità per l'accesso al sistema di «time sharing».

Da una serie di rilevazioni è risultato che il tempo d'impiego di unità centrale del calcolatore per elaborazioni ed esecuzioni di brani complessi è di pochi secondi per ogni minuto di musica eseguita: questo rapporto è un indice dell'efficienza del sistema adottato per la produzione di «computer music».

La prestazione del terminale nell'esecuzione di brani musicali è ovviamente valutabile solo con l'ascolto; è possibile invece riportare un esempio di uso del terminale per la sintesi di segnali complessi.

Si voglia ottenere un suono avente una fase d'attacco con un elevato numero di armoniche, e due fasi di mantenimento e di caduta in cui il numero di armoniche sia minore: questo è un comportamento tipico dei suoni pizzicati di strumenti a corda.

È stato detto come una nota emessa dal terminale sia caratterizzata da sette armoniche che sono regolabili in maniera indipendente; è possibile estendere questo spettro, sia pure con certe limitazioni. Si può ad esempio far emettere: al canale C1, una nota con frequenza  $f_0$  e spettro completo di sette armoniche; al canale C2, quattro note con le frequenze  $8f_0$ ,  $9f_0$ ,  $10f_0$  e  $11f_0$ , e spettro composto dalla sola fondamentale; al canale C3, ancora quattro note con le frequenze  $12f_0$ ,  $13f_0$ ,  $14f_0$  e  $15f_0$ , e spettro di fondamentale. In questo modo i segnali emessi da C2 e C3 costituiscono le armoniche dalla ottava alla quindicesima di  $f_0$ ; la limitazione consiste nel fatto che le ampiezze delle armoniche di ciascuno dei due gruppi aggiunti sono forzate ad assumere o il valo-

re 0 o un valore comune a ciascun gruppo a causa della struttura del terminale.

In fig. 10 è mostrato lo spettro del suono da sintetizzare in un intervallo  $t$  della fase d'attacco; l'utente, per mezzo del comando TEXT, invia al calcolatore un testo che inizia coi seguenti dati: per C1, una nota con frequenza  $F_1 = f_0$ , timbro  $(A_{11}, A_{21}, \dots, A_{71})$ , e intensità  $I_1$ ; per C2, due note con frequenze  $F_1 = 9f_0$ ,

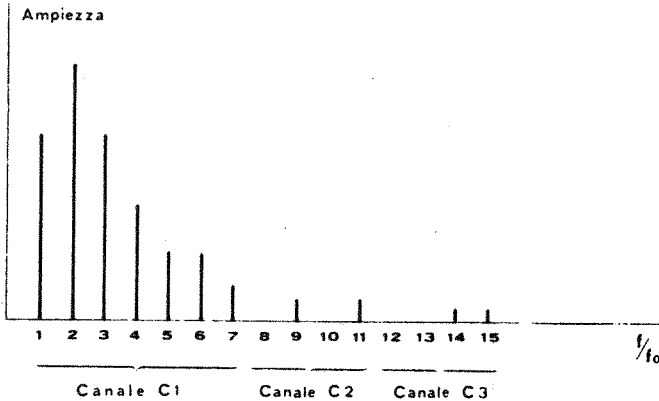


Fig. 10. - Ripartizione delle armoniche di un segnale complesso nei tre canali del TAU2;  $f_0 =$  fondamentale.

$F_2 = 11f_0$ , timbro  $(A_{12}, 0, \dots, 0)$ , e intensità  $I_2$ ; per C3, due note con frequenze  $F_1 = 14f_0$ ,  $F_2 = 15f_0$ , timbro  $(A_{13}, 0, \dots, 0)$ , e intensità  $I_3$ . I valori di  $A_{nm}$  e di  $I_m$  ( $n = 1, 2, \dots, 7$ ,  $m = 1, 2, 3$ ) sono scelti in modo da approssimare lo spettro assegnato; la durata  $D$  da associare a queste note è scelta in modo che sia  $DT = t$ .

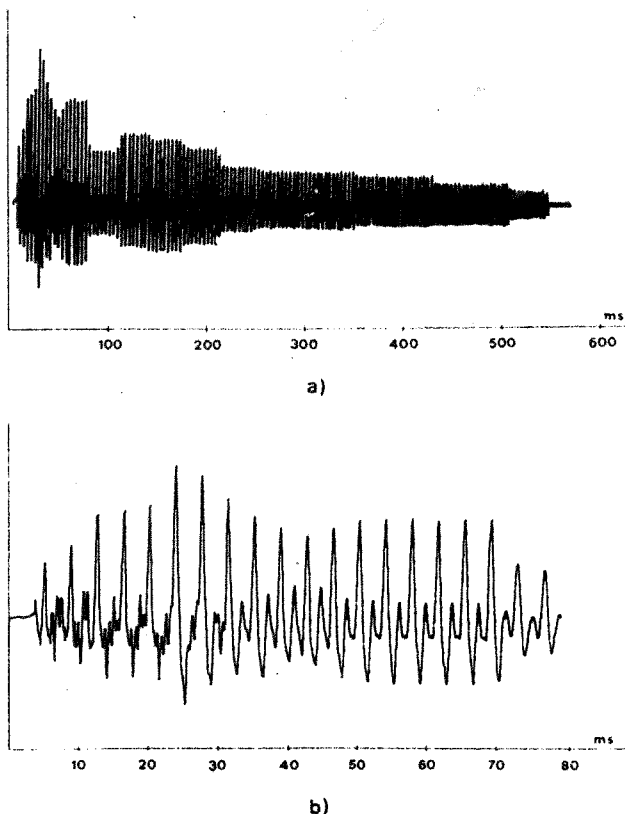


Fig. 11. - Segnale complesso sintetizzato col TAU2. a) intero segnale, b) particolare della fase d'attacco.

Negli intervalli successivi a quello preso in esame si inseriscono nuovi dati con opportuni timbri e intensità fino al completamento della definizione del suono da sintetizzare; terminato il testo, col comando PLAY si avvia l'esecuzione. Un esempio di segnale ottenuto con questo procedimento è mostrato nella fig. 11; all'ascolto il segnale appare simile a quello prodotto da uno strumento a corda pizzicato.

### 9. - CONCLUSIONI.

E' stato descritto il terminale audio TAU2, realizzato presso l'Istituto di Elaborazione dell'Informazione per verificare la validità di un metodo di generazione di suoni sotto controllo di un calcolatore.

Il TAU2 ha il vantaggio di richiedere un tempo di unità centrale del calcolatore notevolmente inferiore a quello necessario ad altri sistemi per la sintesi della « computer music ». Ciò è dovuto al fatto che al calcolatore è affidato il compito di preparare ed elaborare dei codici musicali, mentre al terminale è affidato quello di interpretare tali codici e di sintetizzare i corrispondenti segnali sonori. Questa organizzazione consente all'utente di pilotare il terminale con un programma conversazionale, e di ascoltare in tempo reale i risultati delle elaborazioni da lui ordinate al calcolatore funzionante in « time-sharing ».

Il terminale è in grado di emettere contemporaneamente fino a dodici note musicali con parametri modulabili dinamicamente entro estese gamme di valori: i risultati ottenuti durante molti mesi di lavoro col TAU2 hanno soddisfatto la maggior parte delle aspettative dal punto di vista sia tecnico, sia musicale. Il sistema operativo di corredo del terminale, già notevolmente sviluppato, è in corso di ampliamento presso la Divisione Musicologica del CNUCE, e consente all'utente di fare elaborazioni notevolmente complesse.

Numerose sperimentazioni hanno messo in evidenza la facilità di lavorare col terminale; per mezzo del TAU2 anche utenti non particolarmente esperti possono imparare ad usare un calcolatore per comporre ed elaborare testi musicali in tempi relativamente brevi (dell'ordine della settimana). Questa caratteristica fondamentale è particolarmente utile a musicisti per studi di musicologia e a studenti che seguono corsi di didattica musicale nel settore della « computer music », come è stato confermato dall'uso sperimentale del TAU2 sia in campo radiofonico, sia presso conservatori musicali.

Gli autori ringraziano il maestro P. Grossi per la consulenza musicale, L. Dall'Antonia, E. Bozzi e M. Ferrucci per il loro contributo al progetto, alla realizzazione e al collaudo di alcune parti del sistema, e il gruppo dei tecnici dell'Istituto di Elaborazione della Informazione per il notevole impegno dimostrato nella costruzione del terminale.

Manoscritto pervenuto il 19 aprile 1977

### BIBLIOGRAFIA

- [1] J. XENAKIS: *Musiques Formelles*, Richard-Masse, Parigi 1963.
- [2] S. TEMPLELAARS, G. M. KOENIG: *The Computer at the Institute of Sonology, Utrecht*. « Interface », vol. 1, n. 2, nov. 1972, p. 167-174.

- [13] J. TENNEY: *Computer Music Experiments, 1961-1964*. «Electronic Music Reports», vol. 1, n. 1, set. 1969, p. 23-61.
- [14] P. GROSSI: *Computer and Music*. «International Review of the Aesthetics and Sociology of Music», vol. 4, n. 2, 1973.
- [15] M. V. MATHEWS: *An Acoustic Compiler for Music and Psychological Stimuli*. «The Bell System Technical Journal», vol. 40, n. 3, mag. 1961, p. 689.
- [16] M. V. MATHEWS: *Technology of Computer Music*. MIT press, 1969.
- [17] P. GROSSI, G. SOMMI: *DCMP Studi Musicali*. CNUCE, Istituto del CNR, Pisa, Nota Interna n. 53, 1974.
- [18] P. ZINOVIEFF: *A Computerized Electronic Music Studio*. «Electronic Music Reports», vol. 1, n. 1, set. 1969, p. 5-22.
- [19] G. BARUZZI, P. GROSSI, M. MILANI: *Studi musicali: Compendio dell'attività svolta nel periodo 1969-1975*. CNUCE, Istituto del CNR, Pisa, Nota Interna n. 96, 1975.
- [10] P. GROSSI: *Elettronica e Pentagramma*. Prefazione allegata al disco «Computer Music», Ed. musicali Fonos, 1972.
- [11] G. BERTINI, M. CHIMENTI: *Descrizione del TAU1*. I.E.I. del C.N.R., Pisa C74-7, 1974.
- [12] G. BERTINI: *Progetto di un terminale audio per funzionamento in «time-sharing»*. Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Univ. di Pisa, tesi di laurea 1975.
- [13] P. RIGHINI: *L'acustica per il musicista*. Ed. Zanibon, 1970, p. 44-55.
- [14] L. DE LUCA: *Le qualità caratteristiche del suono*. «L'Antenna», vol. 44, n. 2, feb. 1972, p. 102-107; vol. 44, n. 9, set. 1972, p. 378-383.
- [15] P. RIGHINI: *Transitori d'attacco ed estinzione del suono e loro effetto sul timbro*. «Elettronica», n. 2, 1965, p. 3-7.
- [16] J. L. FLANAGAN: *Speech Analysis Synthesis and Perception*. Cap. 5. Springer Verlag, 1965.
- [17] P. RIGHINI: *Acustica musicale*. Ed. RAI, 1963.
- [18] L. DE LUCA: *Appunti sulla percezione del timbro*. «L'antenna», vol. 43, n. 4, apr. 1971, p. 146-151.
- [19] M. R. SCHROEDER: *Model of Hearing*. «Proc. IEEE», vol. 63, n. 9, set. 1975, p. 1332-1350.
- [20] G. B. GERACE: *Digital System Design Automation. A Method for Designing a Digital System as a Sequential Network System*. «IEEE Trans. on Computers», vol. C17, nov. 1968, p. 1044-1061.
- [21] G. F. CASAGLIA, G. B. GERACE, M. VANNESCHI: *Equivalent Mo- and Comparison of Microprogrammed Systems*. IEI del CNR, Pisa, Nota Interna n. 3, Serie speciale ENI-CNR, ago. 1971.
- [22] M. V. WILKES: *The Growth of Interest in Microprogramming: a literature survey*. «Computing Surveys», vol. 1, set. 1969.
- [23] G. CONTI: *Sui linguaggi e le strutture di microprogrammazione*. IEI del CNR, Pisa, Nota Interna n. 5, Serie speciale ENI-CNR, dic. 1971.
- [24] V. CASAROSA, G. FROSINI, P. MAESTRINI: *The Control Unit for a Small Size Microprogrammed Computer*. In: Atti del IX Convegno Internazionale dell'Automazione e Strumentazione, Milano 1970, p. 999-1012.
- [25] P. MAESTRINI: *A Diode Matrix Read-only Memory*. In: Proc. Symp. 1972 «Automation and Regulation Systemes», Ostrava ARS 2-7.
- [26] G. BERTINI, M. CHIMENTI, L. DELL'ANTONIA: *Unità digitale del TAU2*. I.E.I. del C.N.R., Pisa, Nota Interna in corso di stampa.
- [27] G. BERTINI, M. CHIMENTI: *L'unità audio del TAU2*. I.E.I. del C.N.R. Pisa, C75-11, 1975.
- [28] P. GROSSI: *Studi Musicali: Modalità operative del TAUMUS. Software di gestione del terminale audio TAU2*. CNUCE Istituto del C.N.R., Pisa - Nota Interna n. 120, 1976.

## ERRATA CORRIGE

P. BARBINI: *Sull'utilità dei metodi di sintesi operanti nel dominio del tempo* («Alta Frequenza», n. 10, ottobre 1977, p. 505-511).

Formula (47), p. 508:

L'elemento della matrice che occupa la terza riga della seconda colonna, non vale

$$\frac{(-F + F^i)}{2}, \text{ ma } \frac{(-F + F^i)}{2}$$