

Consiglio Nazionale delle Ricerche

**ISTITUTO DI ELABORAZIONE
DELLA INFORMAZIONE**

PISA

TAU2: UN TERMINALE AUDIO PER ESPERIMENTI
DI COMPUTER MUSIC

G. Bertini, M. Chimenti, F. Denoth

Nota Interna B76-17

Luglio 1976

Sommario

Nel lavoro viene presentato un terminale audio capace di generare suoni complessi in tempo reale su istruzioni ricevute 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. Ques'ultima caratteristica lo differenzia da altri sistemi già usati nel campo della "computer music"; 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 esposte alcune conclusioni basate sulla sperimentazione finora fatta con il TAU2.

Summary

The paper describes an audio terminal; TAU2, capable of producing complex sounds in real time under instructions elaborated by a general purpose digital computer.

The terminal, which can be widely used in experiments on electronic sound synthesis, is a useful tool in computer music; it has a good requests low CPU time to generate musical pieces. This last feature makes it completely different from other systems used in computer music; moreover, TAU2 is connected with the computer in time-sharing, as a general perisferal unit.

A short description of the use of computer for musical purposes and some conclusions based on an experimental use of the terminal are given.

INDICE

1) Introduzione	pag. 1
2) La "Computer Music" mediante un terminale audio	" 4
3) Il TAU2	" 6
4) Criteri di progetto	" 9
5) Descrizione del TAU2: struttura e funzionamento, Unità digitale, Unità Audio	" 13
6) Risultati sperimentali	" 25
7) Conclusioni	" 32
Bibliografia	" 34

1 - Introduzione

Un brano musicale, inteso in senso lato, è esprimibile in forma parametrica: infatti, un brano è costituito da una successione di suoni e pause, un suono è definibile come un insieme di note e una nota è un suono elementare caratterizzato dai seguenti attributi [1] :

- altezza= posizione sulla scala musicale;
- intensità= ampiezza della vibrazione acustica;
- timbro= forma della vibrazione;
- durata= comprende i tre momenti di attacco, mantenimento ed estinzione del suono.

Rimandando alla bibliografia per un esame dettagliato dell'influenza dei singoli attributi sulla percezione uditiva [2,3] citiamo solo il fatto che un suono prodotto da una qualsiasi sorgente sonora può essere facilmente convertito in segnale elettrico e che i metodi di analisi dei segnali consentono, seppure con certe approssimazioni, di rappresentare in forma numerica i caratteri distintivi dei suoni. E' noto altresì che partendo da segnali elettrici, generati con opportuni metodi di sintesi, è possibile ottenere dei suoni aventi determinate caratteristiche.

Il calcolatore digitale è impiegato da diverso tempo per l'elaborazione e la composizione di particolari brani musicali: le prime esperienze di Hiller e Xenakis risalgono agli anni cinquanta e un'ampia documentazione è disponibile nella letteratura dedicata alla computer music.

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

Un testo modificato o creato 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 si svincola l'uomo dalle difficoltà esecutive della tecnica tradizionale, particolarmente sentite nell'ambito della "computer music", ma in più si ottiene un'esecuzione pre-

cisa e indistorta del testo [4].

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 generare segnali audio per mezzo di un calcolatore digitale:

- 1) 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 con nome "Music V" [5]. Un'altra tecnica, meno sofisticata, 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 [6].
- 2) 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 (usando per esempio oscillatori controllati in vario modo, Vocoder [7], ecc.).

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 genere più rigido ma più efficiente perchè permette la sintesi di segnali in tempo reale, facendo risparmiare notevolmente tempo di calcolo.

Gli autori hanno lavorato alla sintesi di segnali audio per l'esecuzione automatica di brani musicali, congiuntamente con ri cercatori del Centro Nazionale Universitario di Calcolo Elettronico già impegnati in esperimenti di computer music [8,9], con l'obiettivo di mettere a punto un sistema per l'esecuzione automatica di brani polifonici, che ovviasse agli inconvenienti accennati prima. Per quanto riguarda le caratteristiche dei suoni, l'in teresse è stato rivolto alla disponibilità di un'estesa gamma di valori dei parametri, piuttosto che verso l'imitazione di determinati strumenti tradizionali.

2 - La "computer music" mediante un terminale audio.

In base agli obiettivi richiesti 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. Era questo un terminale audio che produceva segnali analogici per sintesi armonica in base alle istruzioni ricevute fuori linea per mezzo di un lettore di nastro [10]. 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 [11].

Questo apparecchio, dotato di ampie caratteristiche musicali, è capace di produrre suoni complessi in maniera continua e consente all'utente di ascoltare in tempo reale il risultato di elaborazioni sofisticate di brani polifonici inseriti in memoria, operando nell'ambito di un sistema time-sharing IBM 370/168.

L'organizzazione del sistema che usa il terminale TAU2 è mostrata in Fig. 1. Possiamo notare in essa:

- un calcolatore digitale, nella cui memoria sono contenuti i programmi di elaborazione dei dati e l'archivio dei brani musicali;
- la telescrivente, con la quale viene svolta la comunicazione tra utente e calcolatore;
- il terminale audio, che riceve i parametri dei suoni dal calcolatore e scambia con esso le informazioni necessarie per il corretto trasferimento dei dati.

Dapprima l'utente prepara il brano da elaborare, richiamandolo dall'archivio o inserendolo nel calcolatore con una periferica d'ingresso; poi definisce le specifiche delle elaborazioni da compiere e quindi comanda l'inizio del lavoro. Dopo il breve tempo di elaborazione hanno inizio il trasferimento dei dati al terminale e l'esecuzione sonora.

Dato il considerevole numero di note che possono essere generate dal TAU2 sulle diverse uscite, si ottengono facilmente effetti spaziali e di coro; una delle normali prestazioni consente di variare dinamicamente la composizione armonica dei segnali sintetizzati ottenendo la modulazione praticamente continua del timbro del suono emesso.

Inoltre il TAU2 lavora in linea con il calcolatore come una qualunque periferica d'uscita: questo rende possibile la sua utilizzazione remota tramite collegamento telefonico.

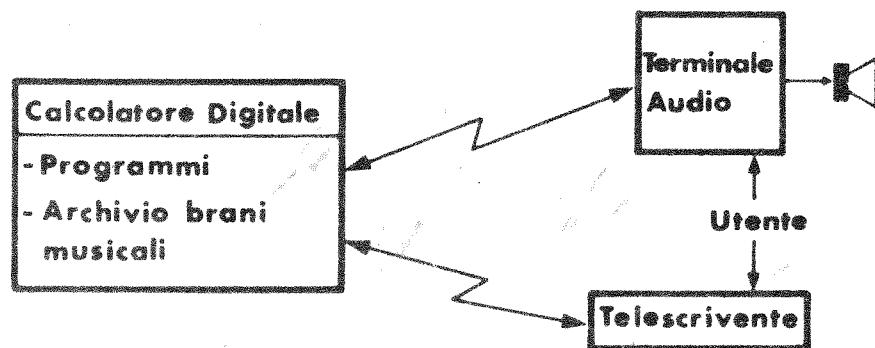


Fig.1 Organizzazione del sistema
di "computer music".

3 - Il TAU2

Principio di funzionamento

Nel TAU2 i segnali audio sono ottenuti per sintesi armonica: esaminiamo ora come viene eseguita questa procedura.

La descrizione sistematica che segue non è del tutta rigorosa, ma i risultati sono compatibili con le approssimazioni accettabili per la sintesi di brani musicali.

Un qualsiasi segnale stazionario può essere espanso in serie di funzioni trigonometriche

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (1)$$

dove f_n = frequenza della ennesima componente armonica

a_n = ampiezza della ennesima componente armonica

φ_n = fase della ennesima componente armonica.

I valori dei parametri a_n, f_n, φ_n sono ottenuti dallo sviluppo in serie di Fourier della $s(t)$: per una funzione del tempo sono definiti lo spettro di ampiezza $s(w)$ e di fase $\varphi(w)$.

Viceversa un segnale $s(t)$ può essere ottenuto per mezzo di opportuni segnali, derivati dall'analisi di $s(t)$. Il segnale $s(t)$, specificato dai parametri seguenti

$$s(t) \Leftrightarrow \{A_i, F_i, \varphi_i\}, \quad i = 1 \dots \infty \quad (2)$$

dove A_i = ampiezza della iesima componente armonica

F_i = frequenza della iesima componente armonica

φ_i = fase della iesima componente armonica.

può essere costruito per mezzo della sintesi armonica usando funzioni trigonometriche come segnali di partenza.

C'è da tener conto che i segnali audio non sono in realtà costanti nel tempo: così per ogni nota si possono individuare un attacco, uno stato quasi-stazionario, e un decadimento, carat-

terizzati da spettri dipendenti dal tempo $s(w,t)$ e $\varphi(w,t)$ [12]. Di conseguenza tutti i parametri che definiscono le note dipendono dal tempo, e possiamo specificare una nota $q(t)$ con l'espressione seguente:

$$q(t) = \{ F(t), A_i(t), \varphi_i(t), I(t) \} \quad (3)$$

dove F = altezza della nota (frequenza fondamentale)

A_i = ampiezza della iesima componente

φ_i = fase della iesima componente

I = intensità complessiva della nota ,

Nella (3) è indicata solo la frequenza fondamentale perchè le altre frequenze sono facilmente ottenibili essendo multipli interi di essa.

Ricordiamo che il TAU2 è impiegato per eseguire computer music e che per questo dev'essere capace di produrre un elevato numero di suoni con parametri variabili entro un'estesa gamma di valori; ma non necessariamente i segnali prodotti devono essere identici a quelli di strumenti tradizionali. Tenendo conto di ciò e delle caratteristiche della percezione uditiva [13] si sono introdotte alcune semplificazioni alla (3):

- il numero delle armoniche è limitato;
- la fase dei segnali sinusoidali prodotti dal TAU2 non è controllata, per cui i parametri φ_i sono omessi;
- i rimanenti parametri sono quantizzati e definiti a intervalli di tempo discreto.

L'espressione (3) si riduce perciò alla seguente:

$$q_{n(T)} = \{ F_n, A_{i,n}, I_n \} \quad (4)$$

dove $i = 1, \dots, 7$

n = numero di intervalli di tempo

T = intervallo di tempo predeterminabile.

Il numero dei possibili valori dei parametri e la lunghezza degli intervalli di tempo sono stati scelti tenendo conto della capacità risolutiva dell'udito e di alcuni criteri di semplicità di realizzazione.

Per semplificare l'elaborazione dei dati e lo scambio dei messaggi tra calcolatore e terminale, nel TAU2 è stato impiegato un solo orologio che stabilisce l'unità di tempo base e che agisce da metronomo per tutte le note emesse.

La Fig. 2 mostra la struttura del TAU2. In essa si distinguono: l'unità digitale, che richiede i dati al calcolatore, li memorizza, li interpreta e li fornisce all'unità di uscita; l'unità di uscita, chiamata unità audio, che produce i segnali analogici in base ai parametri ricevuti; il pannello di comando, col quale si definiscono le modalità di funzionamento del terminale.

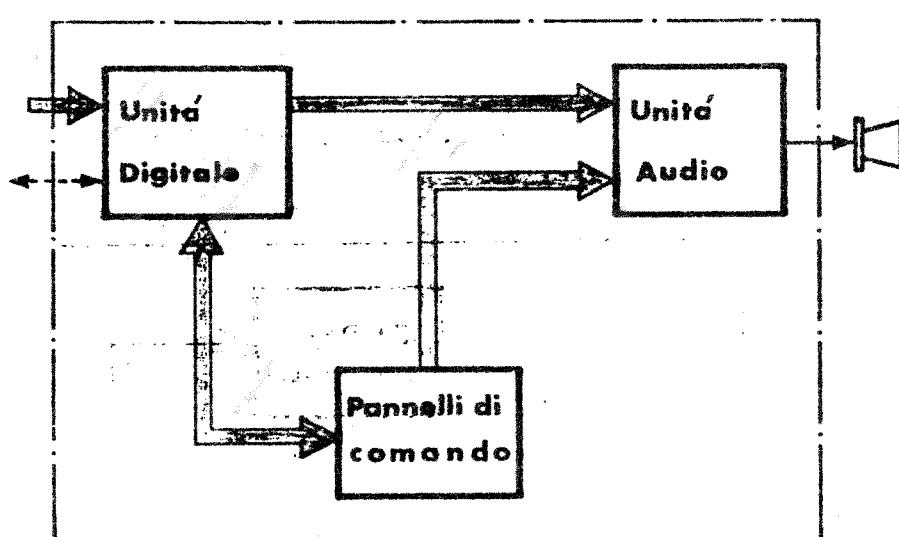


Fig.2 - Struttura del TAU2

4 - Criteri di progetto

Tre tipi di esigenze sono state prese in considerazione per definire le caratteristiche del TAU2:

- Esigenze acustico-musicali: si deve emettere contemporaneamente 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 indipendente dalla velocità di trasmissione dei dati.
- Esigenze di programmazione del calcolatore: l'insieme delle operazioni necessarie all'impiego del TAU2 dev'essere più semplice possibile.
- Esigenze di realizzazione del terminale: i circuiti devono dare affidamento e l'architettura del sistema deve permettere futuri ampliamenti ed una facile manutenzione.

a) Caratteristiche musicali

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 uno 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 risoluzione di 1 ms.

b) Organizzazione dei dati d'ingresso

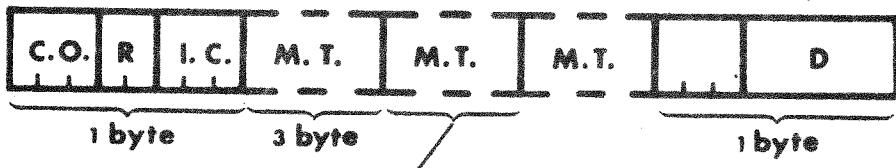
Per ridurre al minimo il flusso dei dati ogni parametro dovrebbe essere spedito al TAU2 con un proprio codice di identificazione: ciò comporterebbe un'organizzazione dei dati piuttosto complicata a cui farebbe riscontro una complessa struttura dell'unità digitale.

Per semplificare le organizzazioni sia del "software" che dell'"hardware" i parametri d'ingresso sono stati raggruppati con criteri di omogeneità e di modularità. Sono stati definiti due tipi principali di istruzioni a lunghezza variabile: una, chiamata istruzione timbro, che contiene solo i parametri della timbrica, e l'altra, chiamata istruzione suono, contenente tutti i parametri rimanenti.

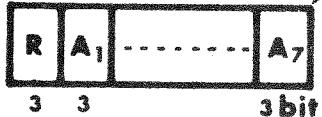
Per la determinazione dei formati si è tenuto conto dell'ovvia condizione che il minimo formato dei dati del sistema di elaborazione è 1 byte di 8 bit, e che per modificare la timbrica di un canale è necessario, in generale, ridistribuire le ampiezze di diverse armoniche: è stato stabilito perciò un modulo di informazione timbro di 3 byte. L'istruzione timbro (vedi Fig. 3a) può modificare la timbrica di uno o più canali contemporaneamente grazie ai bit di "identificazione canale" (I.C.). L'istruzione suono (vedi Fig. 3b) contiene gli altri parametri che sono stati raggruppati seguendo lo stesso criterio di modularità per canale: in un modulo di questa istruzione sono contenute infatti le 4 frequenze fondamentali delle note, gli effetti speciali e l'intensità validi per un canale. Il modulo suono è lungo 5 byte.

I dati di ingresso al TAU2 sono quindi costituiti da stringhe di "istruzioni musicali"; un insieme di bit di mascheramento specifica sia il formato dell'istruzione che la selezione dei canali, e i moduli di informazione costituiscono gli operandi di tali istruzioni.

Il flusso di informazioni è senz'altro ridondante per l'istruzione suono perché una variazione di pochi parametri (anche di uno solo) implica la trasmissione dell'intero modulo suo-

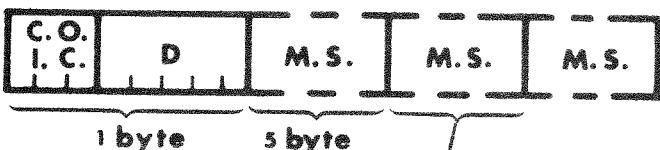


Modulo Timbro

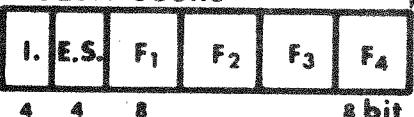


C.O.: Codice operativo
I.C.: Identificatori canale
R.: Riserva
D.: Durata
A.: Ampiezza armoniche

a)

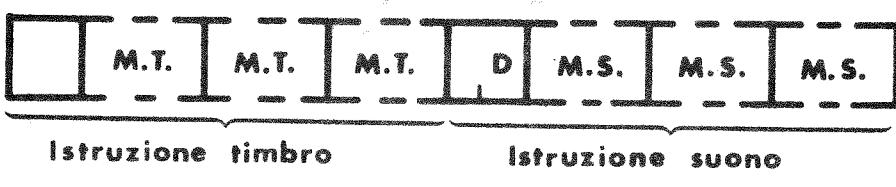


Modulo Suono

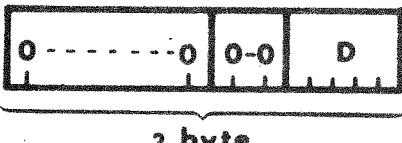


I.: Intensità
E.S.: Effetti speciali
F.: Frequenze fond.

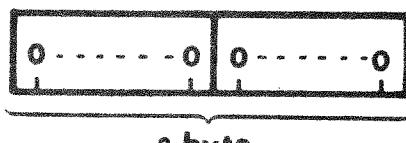
b)



c)



d)



e)

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

no relativo al canale interessato: però la soluzione modulare adottata ha permesso una notevole semplificazione dell'unità digitale.

I due tipi di istruzione contengono il parametro D che specifica, in termini di unità relative, l'intervallo di tempo che deve trascorrere prima dell'esecuzione dell'istruzione successiva; il tempo reale è dato da

$$t = D T ; \quad 0 < D \leq 31 \quad (5)$$

dove T è il tempo base prefissato sul pannello di controllo del TAU2.

E' possibile cambiare allo stesso tempo un qualsiasi insieme di parametri con l'istruzione mostrata in Fig. 3c), mentre l'istruzione di Fig. 3d) è usata per mantenere costanti i para metri per intervalli di tempo superiori a $31 \times T$. Con l'istruzio ne di Fig. 3e), detta "fine brano", non viene emesso alcun suo no dalla unità audio, e l'unità digitale viene posta in uno stato adatto a iniziare l'esecuzione del brano successivo sen za bisogno di alcun intervento sul pannello di controllo.

In caso di espansione del sistema, ulteriori informazio ni, diverse da quelle previste attualmente, possono essere trasmesse per mezzo dell'istruzione timbro usando i bit di ri serva 4 e 5 come estensione di codice.

5 - Descrizione del TAU2: struttura e funzionamento.

Nel paragrafo precedente è stata descritta la struttura delle istruzioni di ingresso: durante il funzionamento tali istruzioni devono essere esaminate e interpretate in sequenza ed eseguite secondo le modalità indicate nelle istruzioni stesse.

E' stato detto in precedenza che i parametri possono essere modificati ad intervalli di tempo compresi tra 1 ms e 999 ms; ai fini musicali il minimo intervallo T che è stato stabilito è di 10 ms [13], 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 capita 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 deve essere tale che durante il normale funzionamento la memoria stessa non sia mai vuota, in modo da non avere delle pause indesiderate durante l'esecuzione di un brano musicale. Dev'essere cioè soddisfatta la seguente relazione

$$\frac{N}{2} \geq (T_a + \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{V_t}) V_s \quad (6)$$

dove:

N = capacità della memoria

T_a = tempo di accesso al collegamento

V_t = velocità di trasmissione dei dati d'ingresso

V_s = velocità media di svuotamento della memoria.

La determinazione di V_t e di T_a è stata fatta pensando ad un collegamento a distanza del TAU2 mediante una linea telefonica affittata per la trasmissione dei dati d'ingresso. Si è dunque posto:

$V_t = 4800$ 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".

La determinazione di V_s è più difficoltosa in quanto dipende dalla struttura originaria dei brani musicali, dalle eventuali elaborazioni fatte sui parametri dei suoni e dal particolare intervallo di tempo considerato; si è quindi cercato di fare una stima approssimata. Da un'analisi empirica condotta su un certo numero di brani polifonici complessi è stato trovato che per intervalli di tempo superiori a 5s la frequenza media di istruzioni necessarie per cambiare i parametri dei suoni emessi si stabilizza al disotto di 20-25 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 all'incirca di 1600 bit/s.

Sostituendo i valori dei parametri nella (6) otteniamo il valore $N=24000$ bit. In pratica è stata adottata una memoria di 32k bit.

Lo schema a blocchi completo del TAU2 è mostrato in Fig. 4. L'unità digitale (parte A della figura) è composta da:

II - Interfaccia d'ingresso. È 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. È 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. È corredata di due registri di 12 bit per gli indirizzi di lettura e scrittura.

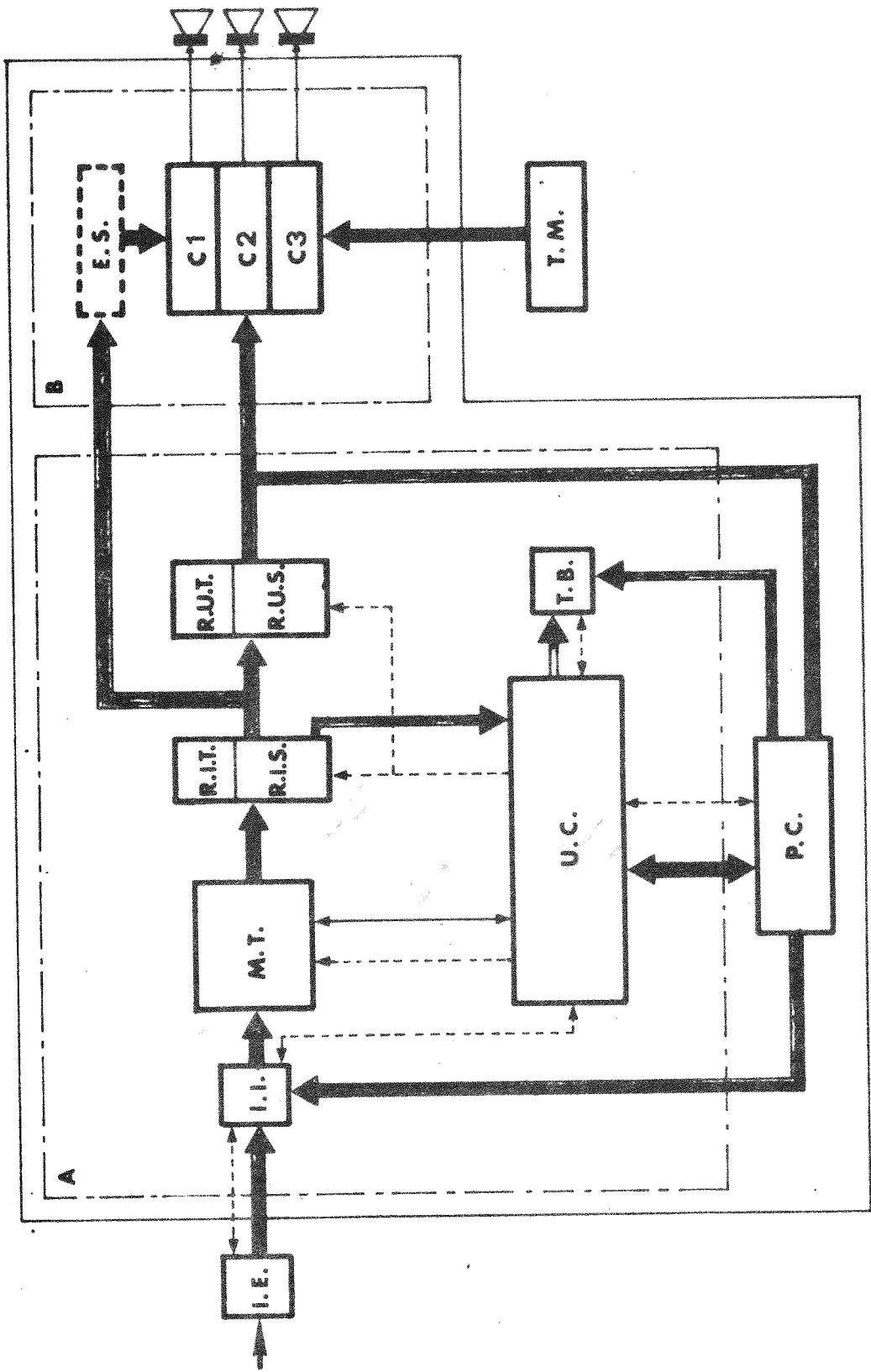


Fig.4 - Schema a blocchi del TAU2

- 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 forniscono, 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 ed esecuzione delle istruzioni.
- TB - Tempo base. E' un orologio che stabilisce l'istante di esecuzione delle istruzioni.
- 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.
- PC - Pannello di comando. E' un quadro composto da comandi e indicatori che consentono all'utente di comunicare con l'unità di controllo.
L'unità audio (parte B della figura) è composta da:
- 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.
- 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 progetto) coi quali si possono manipolare per programma e manualmente i suoni generati dai tre canali.

Il TAU2 funziona secondo le seguenti procedure. Blocchi di dati di 2048 byte sono trasferiti dal calcolatore e caricati nella memoria tampone del TAU2. La trasmissione può essere attivata su richiesta del calcolatore o del terminale audio: a regime l'unità di controllo provvede a richiedere un nuovo blocco se in memoria si è liberato lo spazio equivalente; l'esecuzione viene sospesa finché il blocco da leggere non è stato completamente e correttamente riempito.

Le istruzioni vengono eseguite in sequenza : l'istruzione I_{n+1} viene eseguita quando il tempo t calcolato con il parametro D dell'istruzione I_n , è trascorso. Mentre l'unità audio emette i suoni relativi a I_n , il controllo prepara I_{n+1} nel registro RI, in modo da evitare degli stacchi nell'emissione dei suoni, e contemporaneamente provvede alla scrittura dei dati in arrivo; un'appropriata organizzazione del controllo elimina i conflitti per l'accesso alla memoria.

Esaminiamo ora l'organizzazione delle unità in cui è suddiviso il terminale.

Unità digitale - Com'è noto [14,15] un sistema digitale può essere schematizzato con un modello composto da due macchine sequenziali interconnesse (vedi Fig. 5) ed operanti simultaneamente, dette rispettivamente parte controllo (PC) e parte operativa (PO). La PC dà luogo alla corretta successione delle operazioni del sistema: la PO provvede all'esecuzione delle operazioni stesse. Le connessioni indicate con α sono i comandi che controllano l'esecuzione delle operazioni elementari della PO, mentre le x sono le condizioni con le quali il sottosistema PO fornisce alla PC, in base al risultato delle operazioni precedenti, le informazioni necessarie alla determinazione dei comandi successivi. Inoltre PC e PO posseggono altre connessioni mediante le quali comunicano con altri sistemi o con l'esterno.

In base al tipo di procedure da eseguire è stata data all'unità di controllo un'organizzazione microprogrammata: i vantaggi di una tale scelta si riflettono nella semplicità

e sistematicità del progetto e nelle facilitazioni per la manutenzione dell'intero sistema [16].

La parte operativa dell'unità digitale del TAU2 comprende i sottosistemi indicati nello schema a blocchi di Fig. 4, parte A. Tali sottosistemi sono pilotati dallo stesso impulso di clock ad eccezione dell'orologio del tempo base: la condizione di tempo scaduto per l'istruzione corrente viene acquisita con un meccanismo del tipo "interrogazione a programma".

L'unità di controllo sincronizza e ordina le seguenti procedure:

- a) Trasmissione e caricamento dei dati della memoria tampone.
- b) Chiamata delle istruzioni.
- c) Misura del tempo ed esecuzione delle istruzioni.

Le procedure b e c sono eseguite in sequenza da un unico microprogramma. La procedura a è eseguita da un sottomicroprogramma che è richiamato allo stesso modo di una subroutine su un calcolatore generale.

Il controllo è impegnato normalmente all'esecuzione del microprogramma. Quando l'interfaccia d'ingresso richiede di scrivere un byte in memoria, il microprogramma è interrotto alla fine della microistruzione corrente e il controllo viene passato al sottomicroprogramma. Eseguita la scrittura del byte il controllo viene restituito al microprogramma fino alla richiesta successiva. Il segnale di "byte acquisito" inviato dal TAU2 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 k byte/s; in tali condizioni un'istruzione doppia col massimo formato viene preparata in RI in meno di 1 ms.

Un meccanismo progettato secondo il criterio dei semafori [17] sincronizza le operazioni da compiere alla fine della scrittura/lettura dei blocchi di dati.

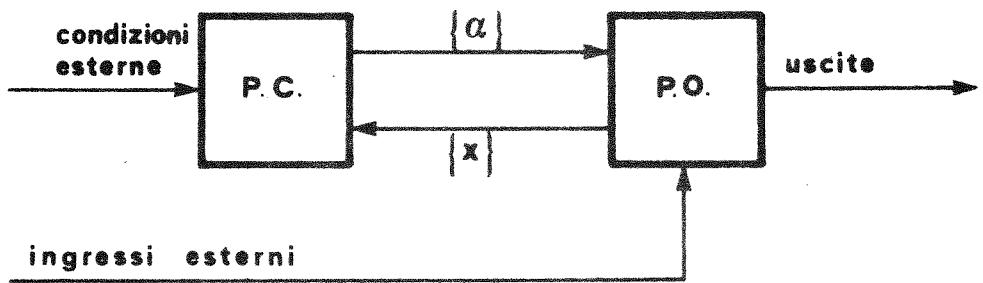


Fig. 5 - Modello generale di un sistema digitale

P.C. = parte controllo

P.O. = parte operativa

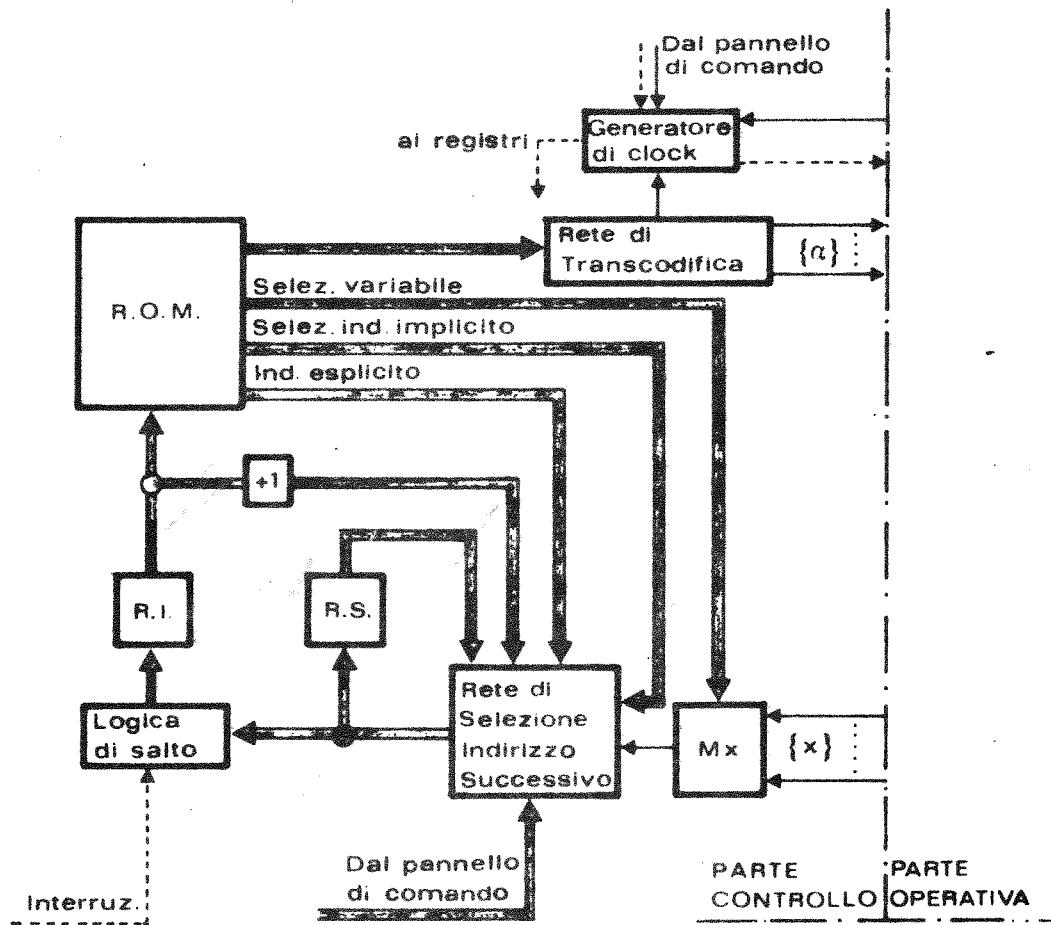


Fig. 6 - Struttura del controllo dell'unità digitale

R.I. = Registro indirizzo microistruzione attuale

R.S. = Registro di salvataggio

Mx = Multiplexer

La struttura dell'unità di controllo rispetta il modello di Moore (vedi Fig. 6). Il tipo di microprogrammazione è quella orizzontale o strutturata [18], adatta alla realizzazione di apparecchiature speciali, categoria a cui appartiene il TAU2.

I microprogrammi sono stati scritti usando un linguaggio di trasferimento fra registri [19]; nella (7) è riportata la struttura della microistruzione adottata.

$$i | O_i \ (x_i=1) J_i; \ (x_i=\emptyset) J_k \quad (7)$$

dove:

- i | è l'etichetta della microistruzione di indirizzo i;
- O_i è un insieme, eventualmente vuoto, di operazioni elementari, eseguite contemporaneamente sui registri;
- x_i è la variabile di condizione selezionata dalla microistruzione i ed è funzione del contenuto dei registri della PO oppure è una costante;
- J_i è l'indirizzo esplicito per la microistruzione succes-siva;
- J_k è l'indirizzo implicito scelto fra i seguenti: $i+1$, costante impostata sul pannello di comando, indirizzo di rientro dal sottomicroprogramma.

Le microistruzioni sono memorizzate in una ROM di 64×33 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 di accesso è di 150ns [20].

Altri dettagli sul progetto e sulla costruzione dell'unità digitale sono date in [21]; citiamo qui solo alcune delle facilitazioni, ottenute grazie alla struttura microprogrammata, che sono usate per la diagnosi di eventuali guasti:

- esecuzione passo-passo delle microistruzioni;
- esecuzione ripetuta di una microistruzione;

- scrittura e lettura manuale di qualsiasi configurazione di byte in memoria, sia passo-passo che automaticamente;
- arresto del clock al verificarsi di una fra certe condizioni prefissate.

Molto utile sia per fini musicali che per la manutenzione è il meccanismo della "suonata 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. Alcuni brani speciali sono stati previsti per la taratura del terminale e per la ricerca dei guasti.

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) principalmente per due ragioni: l'insufficiente stabilità di frequenza dei dispositivi disponibili al momento dello sviluppo del progetto (a questo proposito si ricorda [13] che un orecchio esercitato riesce ad apprezzare variazioni di frequenza dell'ordine del 1°/oo), e il notevole numero di segnali da produrre simultaneamente. Questo numero è infatti dato dalla relazione:

$$4 \text{ note} \times 7 \text{ armoniche} \times 3 \text{ canali} = 84 \text{ segnali} \quad (8)$$

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 $\sqrt[36]{2}$.

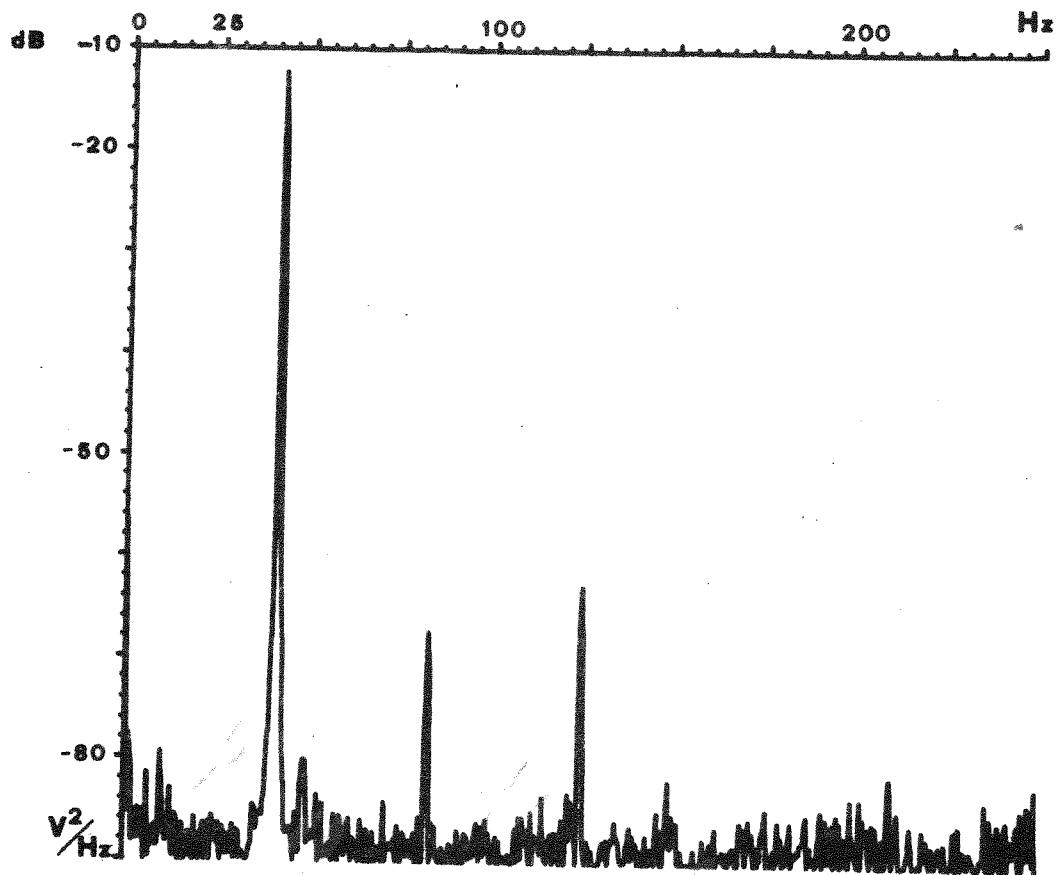


Fig. 7 - Spettro della nota FA_I
($f_0 = 43 \text{ Hz}$)

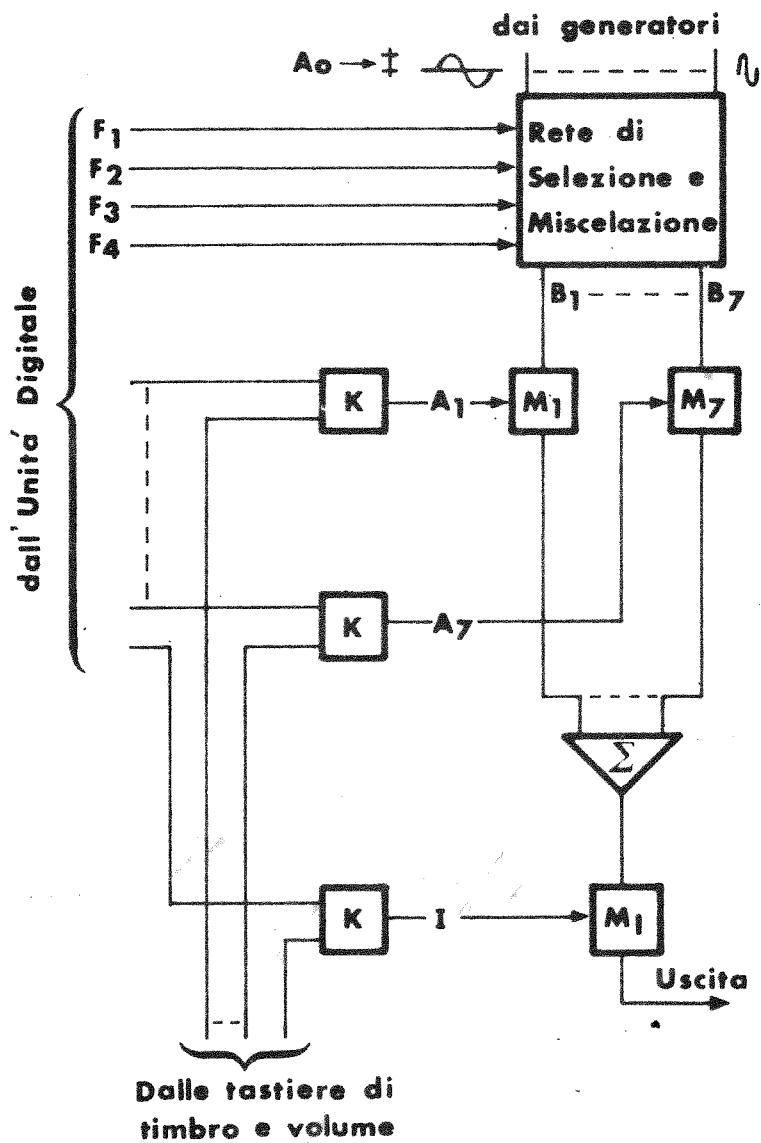


Fig. 8 - Struttura di un canale audio

K : Selettori, Σ : Sommatore

M : Modulatori d'ampiezza

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 divisorì 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 (vedi figura 7), 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 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_I secondo il parametro I dell'istruzione corrente.

Il segnale all'uscita del canale è definibile con la seguente espressione:

$$U(t) = g(I) A_o \sum_{n=1}^7 g(A_n) \sum_{j=1}^4 \sin(n2\pi f(F_j)t + \Phi(F_j)) \quad (8)$$

dove:

A_o = ampiezza dei segnali di ingresso

$f(F_j)$ = frequenza dei segnali di ingresso

$\Phi(F)$ = fase dei segnali di ingresso

$g(I)$ = funzione di trasferimento dei modulatori.

L'espressione è valida per il tempo D definito nell'istruzione corrente. Maggiori dettagli sono dati in [22].

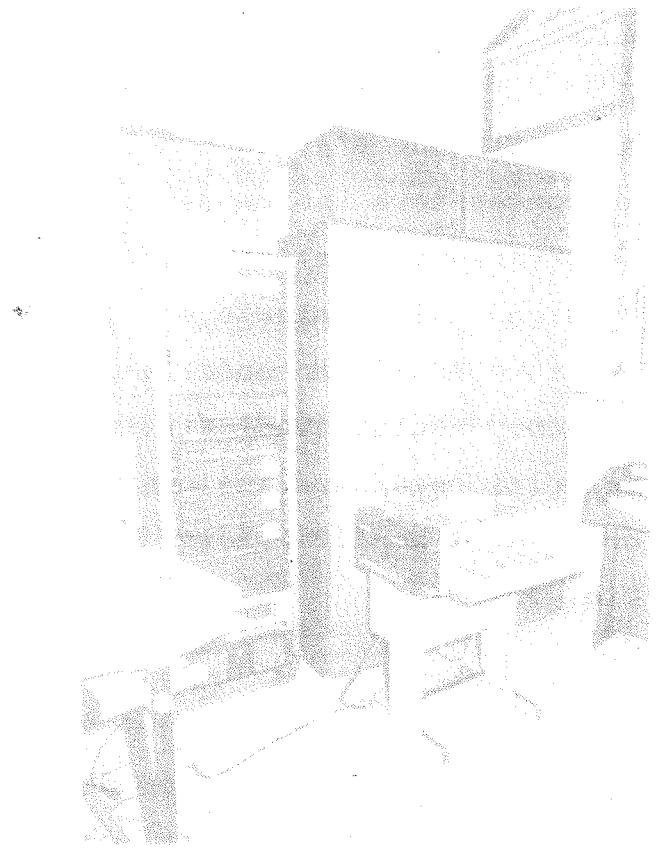
Cenno alla Realizzazione

La Fig. 9a) mostra una visione d'assieme del TAU2. L'unità audio è montata in un contenitore indipendente dall'unità digitale, per motivi di convenienza pratica e per favorire l'isolamento dai disturbi: essendo il terminale un modello sperimentale si sono distribuiti i circuiti in modo da avere un accesso immediato a tutti i componenti, (Vedi Fig. 9b). L'unità digitale è montata su un telaio standard insieme ai pannelli di comando e di manutenzione e agli amplificatori di potenza delle uscite audio (vedi Fig. 9c).

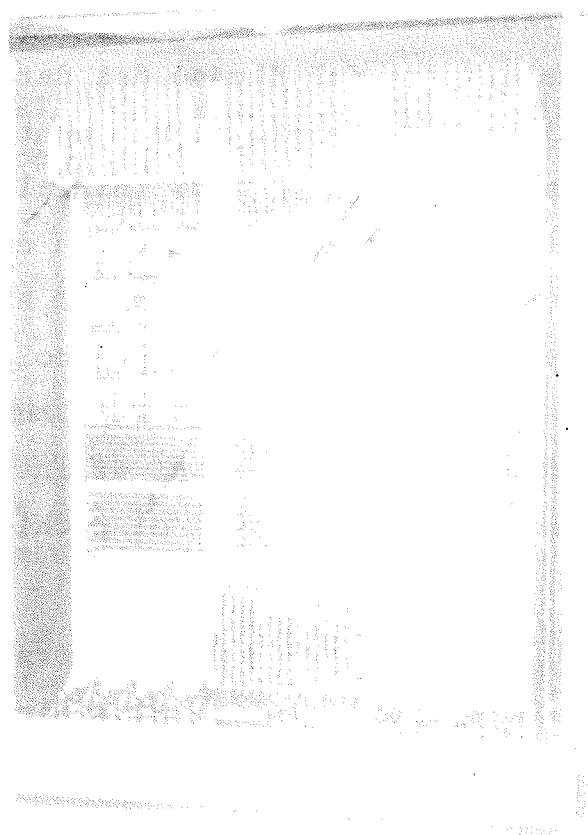
6 - Risultati sperimentali

Il terminale audio è funzionante dalla seconda metà del 1975; il sistema non è ancora dotato di circuiti che realizzano effetti speciali quali eco, riverbero, tremolo, ecc. Tali effetti sono attualmente realizzati per 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.

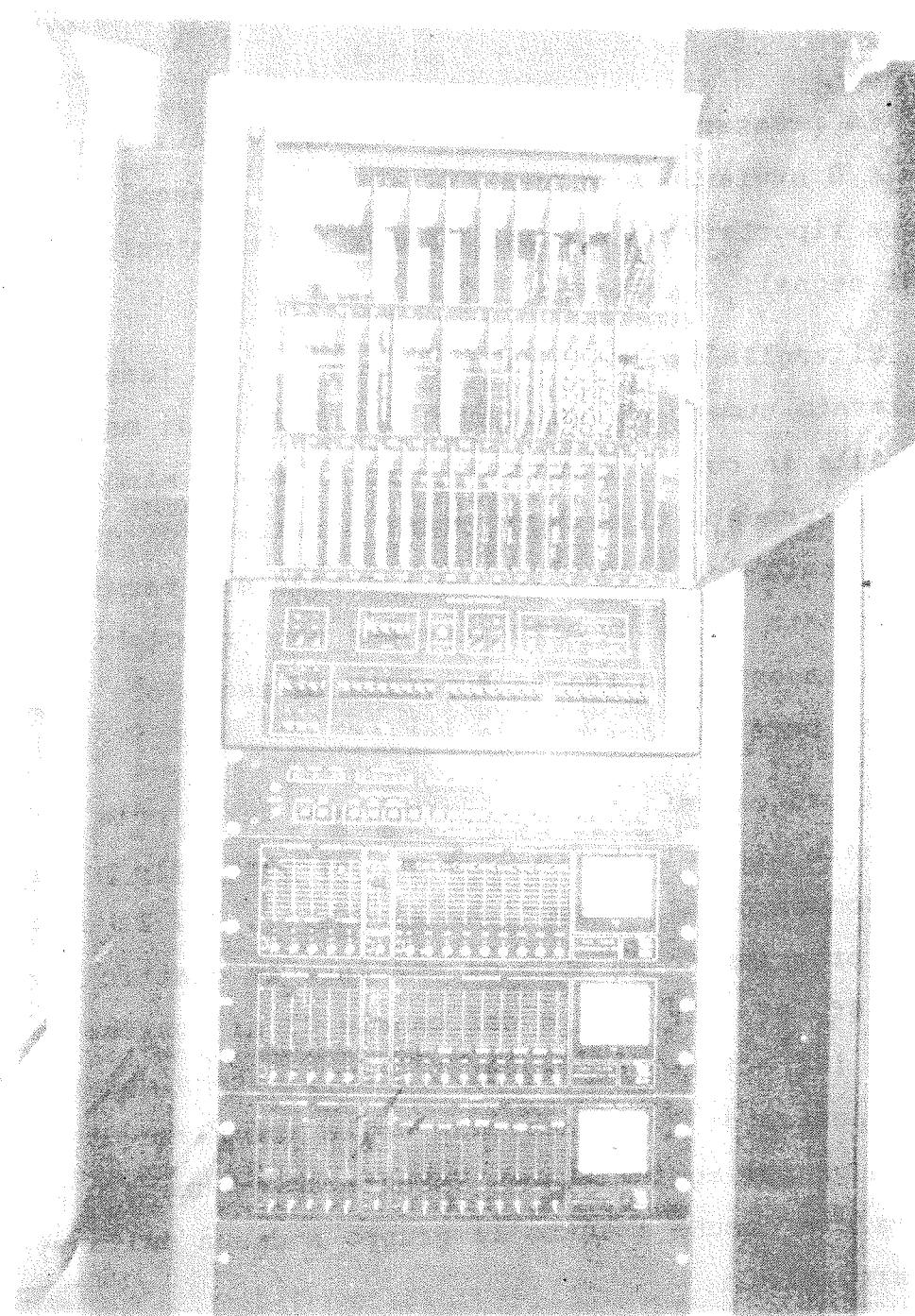
Il tempo d'impiego di unità centrale per elaborazioni complesse è di qualche secondo per ogni minuto di musica eseguita.



a



b



C

Fig. 9 - Il terminale Audio TAU2

- a) Vista dell'intero sistema. Da sinistra a destra:
Unità Digitale, Unità Audio, Telescrittente,
Tastiera Musicale.
- b) Unità Audio: disposizione della circuiteria.
- c) Unità Digitale. Dall'alto al basso: cartoline
stampate, pannelli di comando, amplificatori di
potenza.

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 strumento a corda. E' stato detto come una nota emessa dal terminale sia caratterizzata da sette armoniche che sono regolabili in maniera indipendente; in realtà è possibile estendere questo spettro, sia pure con certe limitazioni.

Sia ad esempio f_0 , la fondamentale della nota da emettere sul canale C1; dal canale C1 è quindi possibile ottenere il suono composto dalle armoniche $f_0, 2f_0, \dots, 7f_0$. Il canale C2 può essere programmato in modo da emettere le quattro note con frequenze $8f_0, 9f_0, 10f_0, 11f_0$ e dal canale C3 si possono avere le armoniche $12f_0 \div 15f_0$; si raddoppia così l'estensione complessiva dello spettro di f_0 . Le ampiezze delle armoniche di ciascuno dei due gruppi aggiunti sono forzate ad assumere o il valore 0 o un valore comune a tutto il gruppo a causa della struttura del terminale.

In Fig. 10) è mostrato lo spettro del suono da sintetizzare in un intervallo di tempo D della fase d'attacco: le ampiezze efficaci delle armoniche dipendono sia dai valori della timbrica di canale (A_1, \dots, A_7), sia dal volume di canale $V_{i,j} = 1, 2, 3$. I valori dei parametri $F, A_{i,j}, V_j$ e D vengono inviati al calcolatore tramite telescrivente con formato previsto dal programma

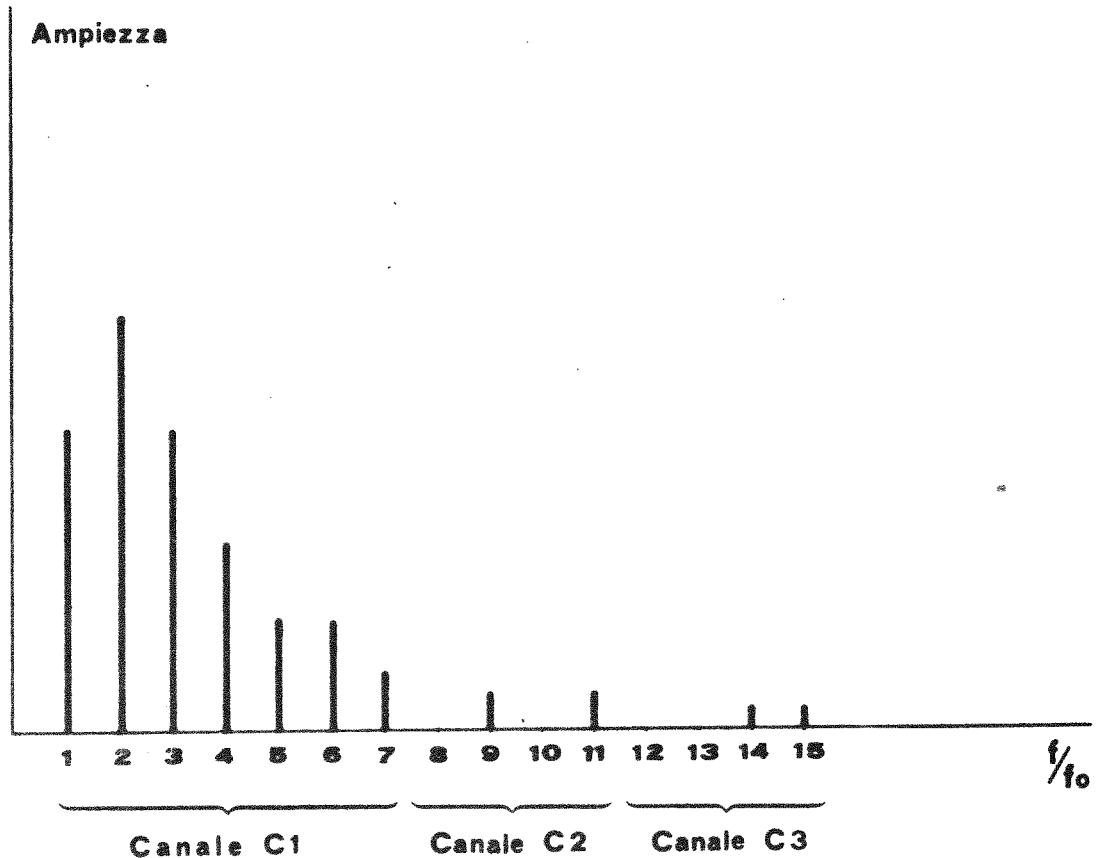


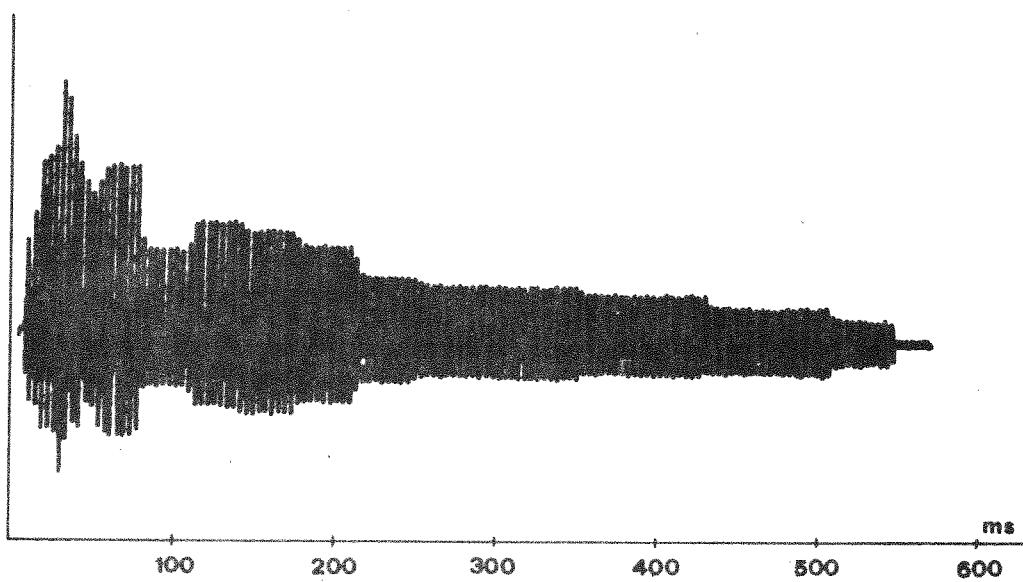
Fig.10 - Ripartizione delle armoniche di un segnale complesso nei tre canali del TAU 2.

f_0 = fondamentale

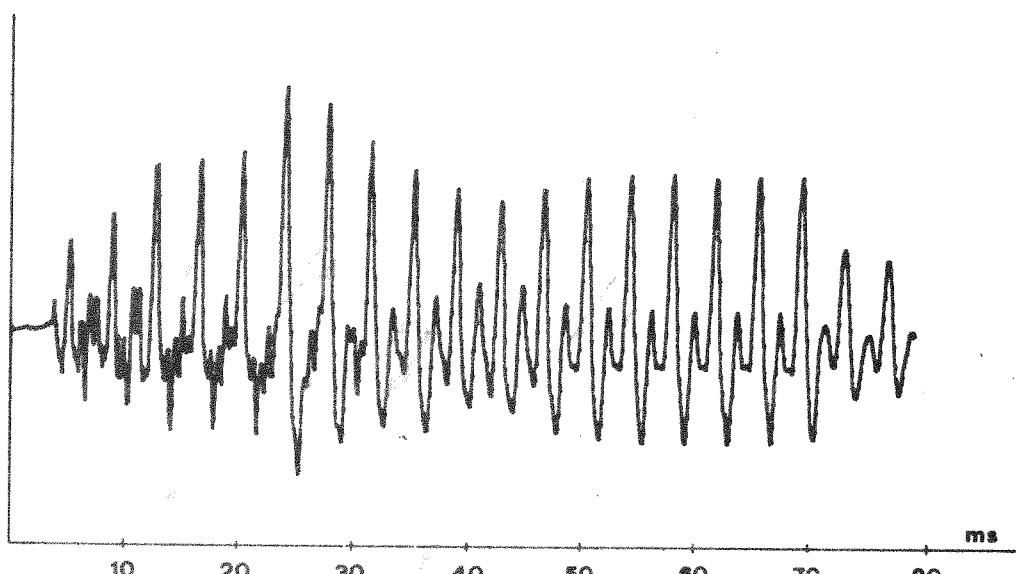
TAUMUS per l'uso del terminale (descritto in una pubblicazione in corso di stampa).

Il programma di codifica invia al terminale le corrispondenti istruzioni; nel caso in esame si ha l'istruzione timbro + suono secondo il formato di Fig. 3c).

Negli intervalli D successivi a quello preso in esame vengono variati le composizioni armoniche ed i volumi; con una sequenza di istruzioni opportune si può ad esempio ottenere il segnale mostrato in Fig. 11), il cui corrispondente effetto sonoro è del tipo richiesto.



a)



b)

Fig.11 - Segnale complesso sintetizzato col TAU 2
a) intero segnale
b) particolare della fase d'attacco

7 - Conclusioni

In questo lavoro viene descritto un terminale audio, il TAU2, realizzato presso l'Istituto di Elaborazione dell'Informazione per verificare la validità di un metodo di generazione di suoni sotto il 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 il terminale è dedicato al compito di interpretare tali codici e di sintetizzare i corrispondenti segnali sonori. Questa organizzazione consente all'utente di pilotare il terminale con un programma di conversazione, 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 diversi 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 è in uno stadio di avanzato sviluppo presso la Divisione Musicologica del C.N.U.C.E. e si possono già ottenere elaborazioni complesse. Numerose sperimentazioni condotte 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 tem-

pi relativamente brevi (poche settimane). 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".

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano 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 forte impegno dimostrato nella costruzione del terminale.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - P. Righini: Acustica musicale, Ed. RAI, 1963.
- 2 - P. Righini: Transitori d'attacco ed estinzione del suono e loro effetto sul timbro, Elettronica, 1965, pag. 3-7.
- 3 - M.R. Schroeder: Model of hearing, "Proc. IEEE", Vol. 63, n.9 Sept. 1975, pag. 1332-1350.
- 4 - J. Kymakis: Free stochastic music from the computer, Gravesaner Blatter, 1969.
- 5 - M.V. Mathews: Technology of computer music, MIT press, 1969.
- 6 - P. Grossi, G. Sessi: DCMP Studi Musicali, CNUCE, Istituto del CNR, Pisa, Nota Interna n. 53, 1974.
- 7 - M.R. Schroeder: Vocoders: analysis and synthesis of speech, "Proc. IEEE", Vol. 54, n.5, May 1966, pag. 720-734.
- 8 - P. Grossi: Computer and music, International Review of the Aesthetics and Sociology of Music, Vol. 4, n. 2, 1973.
- 9 - P. Grossi: Elettronica e Pentagramma; Nota Tecnica allegata al disco Computer Music, Ed. Musicali Fonos.
- 10 - G. Bertini, M. Chimenti: Descrizione del TAU1, I.E.I. del C.N.R., C74-7, 1974.
- 11 - G. Bertini: Progetto di un terminale audio per funzionamento in time-sharing, Univ. di Pisa, tesi di laurea 1975.
- 12 - J.L. Flanagan: Speech Analysis Synthesis and Perception, Springer Verlag, 1965.
- 13 - P. Righini: L'acustica per il musicista, Ed. Zanibon, 1970.
- 14 - 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, November 1968, pag. 1044-1061.

- 15 - G.F. Casaglia, G.B. Gerace, M. Vanneschi: Equivalent Models and Comparison of Microprogrammed Systems, IEI del CNR Nota Interna n. 3, Serie speciale ENI-CNR, Agosto 1971.
- 16 - M.V. Wilkes: The Growth of Interest in Microprogramming: a literature survey, Computing Surveys, Vol. 1, September 1969.
- 17 - E.W. Dijkstra: Cooperating Sequential Processes, In: Programming Languages, F. Genuys (Ed.), Academic Press, New York, 1968, pag. 43-111.
- 18 - G. Conti: Sui linguaggi e le strutture di microprogrammazione; IEI del CNR, Nota Interna n. 5, Serie speciale ENI-CNR, Dicembre 1971.
- 19 - V. Casarosa, G. Frosini, P. Maestrini: The Control Unit for a Small Size Microprogrammed computer, Atti del IX Convegno Internazionale dell'Automazione e Strumentazione, Milano 1970, pag. 999-1012.
- 20 - P. Maestrini: A Diode Matrix Read-only Memory, In : Proc. Symp. 1972 "Automation and Regulation Systems", Ostrava ARS 2-7.
- 21 - G. Bertini, M. Chimenti, L. Dall'Antonia: Unità digitale del TAU2, I.E.I. del C.N.R., Pisa, Nota Interna 1976.
- 22 - G. Bertini, M. Chimenti: L'unità audio del TAU2, I.E.I. del C.N.R. Pisa, C75-11, 1975.