

Il terminale musicale polifonico TAU2: il progetto, la realizzazione e il suo ruolo nella computer music

Graziano Bertini¹

Premessa

Nei primi mesi del 2003 si sono verificati due eventi fra loro legati: la collocazione del terminale audio TAU2 presso il Museo degli Strumenti per il Calcolo a Pisa e la nascita di un centro per il restauro di supporti audio presso il Conservatorio Musicale L. Cherubini di Firenze, dove il TAU2 era ospitato da diversi anni, ormai obsoleto. Una delle prime attività previste del centro (denominato MART, Musica, Audio, Recupero/Restauro, Tecnologie) è quella di ripristinare le incisioni su nastri e dischi LP e altre produzioni del sistema TAU2 e del linguaggio di controllo TAUMUS.

Queste circostanze e il fatto di aver partecipato direttamente ai primi progetti per l'impiego dei calcolatori in campo musicale, mi hanno indotto a ripensare ad alcune vicende degli anni Settanta, circa lo sviluppo della *computer music* in Italia. Ho così accettato di buon grado l'invito a ripercorrere le attività che si svolsero a Pisa in quel periodo, in particolare l'esperienza indimenticabile della realizzazione del sistema di *computer music* TAU2-TAUMUS.

Il progetto venne proposto dal Prof. Franco Denoth dell'IEI (Istituto Elaborazione Informazioni) del CNR di Pisa, per far fronte alle esigenze derivanti dall'iniziativa del Maestro Pietro Grossi nel campo della *computer music*. Grazie alla collaborazione fra esperti dell'Istituto CNUCE e progettisti hardware dell'IEI, coordinati dal Prof. Denoth, si giunse alla messa in funzione del sistema, nel 1975.

L'ambizioso obiettivo era quello della costruzione di un originale terminale audio da interfacciare come una qualunque periferica al sistema di calcolo *time-sharing* IBM 360/67 del CNUCE, per consentire, assieme al programma TAUMUS, la produzione elettronica di suoni e l'esecuzione di brani musicali polifonici e politimbrici in tempo reale. Grazie all'originale uso della tecnica di sintesi additiva e di altre particolari soluzioni, il TAU2 possedeva buone qualità foniche e permetteva una diretta interazione

¹ Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Informazione 'A. Faedo', ISTI-CNR, Via G. Moruzzi 1, 56124 Pisa, <graziano.bertini@isti.cnr.it>.

fra utente e calcolatore. L'aver affidato l'esecuzione dei brani ad un sistema diverso da quello necessario per la sua elaborazione, consentiva infatti una drastica riduzione del tempo di impegno della CPU del calcolatore, rispetto a quanto richiesto da altri sistemi dell'epoca.

Trattandosi di un'applicazione in un settore emergente e in assenza di riferimenti precisi, si incontrarono notevoli difficoltà nella definizione delle specifiche, nel progetto architettonico e nella fase realizzativa dell'apparato, che furono man mano superate. D'altra parte a quel tempo esistevano solo iniziative isolate in alcuni centri all'estero e in Italia, il cui operato era poco noto; non c'erano riviste di settore tramite le quali conoscere le attività dei vari gruppi. Ad esempio la rivista «Computer Music Journal» cominciò ad essere stampata al MIT (Massachusetts Institute of Technology di Boston) solo nel 1977, e in Italia i primi numeri arrivarono quando il TAU2 era stato costruito e funzionante già da alcuni anni.

La definizione e la scelta delle modalità di impiego, la produzione dei brani, le interazioni con musicisti, l'attività didattico/dimostrativa svolta col sistema TAU2-TAUMUS, di cui riferirò in questo articolo, hanno concorso a creare un originale ambiente musicale che ha dato un notevole contributo allo sviluppo dell'informatica musicale in Italia. Ritengo anche utile anteporre dapprima qualche cenno circa gli esperimenti tesi a utilizzare il nuovo 'strumentario elettronico' per le attività musicali, citando anche lo stato dell'arte e le problematiche poste dall'uso dei calcolatori all'epoca impiegati per la sintesi di suoni.

Introduzione. Dalla musica elettronica alla computer music

Un aspetto comunemente accettato è lo stretto rapporto esistente tra la musica, la matematica e la tecnologia (la meccanica degli strumenti musicali), riconosciuto a livello concettuale a partire dai Greci e successivamente elaborato nel tempo; basti pensare all'arricchimento della tipologia e delle caratteristiche della strumentazione musicale tradizionale avvenute nei secoli. Tale nesso si è fatto ancora più stretto nel XX secolo a seguito dell'impiego dell'elettronica e delle proposte di nuove prassi nella musica contemporanea.

È indubbio che la tecnologia elettronica ha portato notevoli vantaggi per la diffusione della musica, sia per quella colta, per secoli appannaggio quasi esclusivo di élite, che per quella popolare e quella sperimentale, facendola uscire da spazi confinati e ambiti locali. L'impiego di amplificatori, microfoni, altoparlanti, dischi, registratori e infine della radio, ha consentito la fruizione di ogni genere di musica in qualsiasi luogo e momento, non facendo per questo diminuire la suggestione dei concerti dal vivo, ma ridimensionandone fortemente la loro funzione di diffusione di nuovi messaggi musicali.

Il salto qualitativo notevole è stato poi quello di utilizzare l'elettronica non solo per manipolare segnali ripresi da varie sorgenti, bensì per generare *direttamente il suono*: la catena degli apparati che pilota l'altoparlante arricchita da *oscillatori*, fu pensata e utilizzata come un nuovo «strumentario musicale elettronico», in grado sia di imitare

i suoni di strumenti tradizionali, sia di produrre nuove e più estese tessiture sonore. Una panoramica storica dell'elettronica nella musica può essere rintracciata in http://obsolete.com/120_years/.

Tutto ciò si è accompagnato alle tendenze dei compositori più eclettici di opere contemporanee (anni Venti-Sessanta), tese al superamento delle regole classiche dell'armonia e della composizione, enfatizzando le caratteristiche timbriche dei suoni, la trama più fitta delle note (oltre le griglie predefinite del pentagramma) e introducendo nella musica concetti come «processi sonori in evoluzione». In tal senso le nuove regole compositive potevano usufruire di relazioni matematiche, leggi di distribuzione probabilistica e algoritmi vari, la cui esecuzione peraltro risultava difficoltosa con le apparecchiature disponibili all'epoca. Attorno agli anni Cinquanta si costituiscono i primi studi di fonologia², basati sull'uso di apparecchiature analogiche come oscillatori, modulatori ad anello, filtri, effetti ecc. Tutti questi moduli avevano ingressi e uscite portati su pannelli: tramite connessioni cablate con fili venivano realizzati vari percorsi (*patch*) e usando controlli manuali si ottenevano le sonorità desiderate registrandole su nastro e anche manipolandole successivamente con *cut & paste*. Con questa strumentazione e con le nuove prassi compositive venivano prodotte opere e brani di musica di vario genere, identificate con la terminologia di 'musica elettronica' e *tape music*.

Negli anni Cinquanta comparvero i primi calcolatori elettronici digitali, costosi e di grosse dimensioni, costruiti inizialmente per scopi scientifici e militari. In breve però, cominciarono ad essere impiegati per molte altre applicazioni industriali, civili e anche nelle arti. Una delle prime notevoli applicazioni delle tecniche elettroniche digitali aveva riguardato l'ammmodernamento delle centrali di commutazione telefonica e successivamente la codifica numerica del segnale vocale: i risultati conseguiti avranno importanti ricadute in tanti altri campi collegati.

Alcuni lungimiranti pionieri intuirono le possibilità di utilizzo dei calcolatori nel settore musicale e fin dagli anni Sessanta cominciarono ricerche e sperimentazioni per analisi, archiviazione e composizione di testi musicali, analisi e sintesi di suoni ecc. L'innovazione più evidente era che gran parte del lavoro e delle ricerche veniva svolto per mezzo di procedure software, cioè con la scrittura di *programmi* eseguibili dai calcolatori, e questa nuova attività fin dall'inizio fu identificata nel suo complesso col nome di «Computer Music» (Tenney, 1969).

In Italia l'interesse per l'impiego dei calcolatori nel campo musicale si è sviluppato concretamente attorno agli anni Settanta con la nascita di iniziative personali ed in centri di studio, ciascuno dotato di una propria vocazione e specializzazione. I nuovi metodi di lavoro furono subito sperimentati e condivisi dal Maestro Pietro Grossi, già a metà anni Sessanta: gli obiettivi intravisti e presentati in articoli dal contenuto emblematico (Grossi, 1969), trovarono poi modo di essere perseguiti efficacemente a Pisa, dove si erano costituiti i primi importanti centri scientifici per il calcolo elettronico, CSCE e CNUCE, divenuti in seguito istituti del CNR.

² Studi sorsero in Europa a Parigi, Colonia e Darmstadt, negli USA a New York, in Italia quello della RAI di Milano, poi a Torino, a Firenze (lo studio S 2F M promosso da Pietro Grossi presso il Conservatorio Cherubini).

Nascita ed evoluzione del settore informatico a Pisa: IEI e CNUCE del CNR

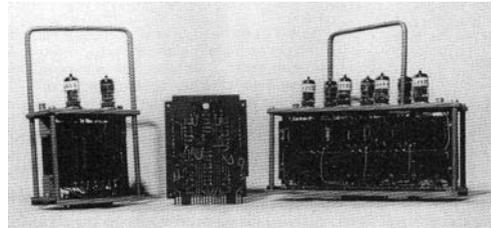
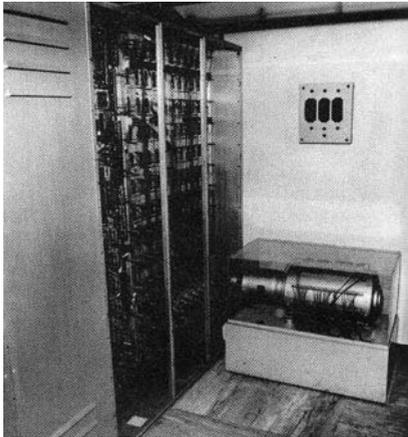
Subito dopo la realizzazione dei primi modelli di calcolatori elettronici digitali negli Stati Uniti anche in Italia, nella seconda metà degli anni 1950, fu costruita a Pisa la CEP (Calcolatrice Elettronica Pisana) il primo grosso calcolatore digitale italiano, ora esposta in mostra nel Museo dei Mezzi di Calcolo, nella stessa sala dove è collocato il TAU2. L'impresa del progetto e della realizzazione è dovuta al gruppo di ricercatori e tecnici del Centro Studi Calcolatrici Elettroniche (CSCE) formatosi grazie a varie collaborazioni scientifiche e contributi, fra cui principalmente quelli di Olivetti SpA, dell'Università di Pisa di altri enti (Denoth, 1991).

La CEP cominciò a lavorare nel 1960 e fu inaugurata nel 1961: era realizzata in parte su valvole termoioniche e in parte a transistor e può essere collocata tra la prima e la seconda generazione di calcolatori. Essa funzionava solo in modo locale, aveva una unica consolle principale (monoutenza), e come unità di I/O aveva alcuni perforatori e fotolettori di nastri di carta.

A quel tempo, neo-diplomato in radiotecnica, presi servizio nel 1962 al CSCE, in concomitanza con il passaggio del Centro al CNR. Come primo incarico partecipai a lavori di potenziamento della CEP, consistenti nell'aggiunta di una memoria esterna, un banco di 8 unità a nastro magnetico (i 'pizzoni' della Ampex), interfacciati alla macchina con un complesso apparato di controllo, un armadio di 2m x 2m pieno di schede elettroniche realizzate a transistor.

La CEP rimase in funzione per sei o sette anni e l'attività svolta per la sua progettazione e per la sua programmazione contribuì alla crescita della comunità scientifica pisana e nazionale, nel nascente settore dell'informatica. Nel 1968 il CSCE otteneva un riconoscimento importante diventando istituto del CNR: l'Istituto di Elaborazione dell'Informazione (IEI-CNR).

Al contempo l'Università ritenne l'ambiente pisano adatto per crearvi un altro importante centro, con lo scopo principale di supportare le crescenti esigenze di calcolo della comunità scientifica italiana. Fu così creato nel 1964 il CNUCE (Centro Universitario per il Calcolo Elettronico) dove furono installati calcolatori della IBM, a partire dal 7090, seguito dai sistemi *main-frame* a multiutenza 360/67, 370/168, ecc., funzionanti a partizione di tempo (in *time-sharing*).



Componenti modulari della CEP e telai con elementi a valvole termoioniche, realizzati al CSCE.

Fu sviluppata una rete di collegamenti, basata sulla rete dati della SIP, che consentiva la connettività remota (tramite modem, linee commutate o affittate ecc.) e l'utilizzo di risorse di calcolo adeguate in determinate sedi. Una complessa struttura organizzava lo svolgimento dei vari compiti, con differenti tariffe in base a priorità di servizio di enti pubblici, industrie ecc.

Le competenze richieste su computer, architetture dei sistemi numerici, linguaggi e tecniche di programmazione, resero necessaria l'introduzione di una nuova disciplina accademica nell'ordinamento universitario italiano, e così nel 1969 fu istituito presso l'Università di Pisa, con il determinante contributo dell'IEI, il primo Corso di Laurea in Scienza dell'Informazione.

I calcolatori in campo musicale

Uso dei calcolatori per la sintesi di suoni; utilità di un terminale audio

Già sul finire degli anni Sessanta le ricerche sull'uso del calcolatore in campo musicale, erano molto promettenti e lasciavano intravedere interessanti applicazioni. La possibilità d'impiego dei calcolatori in campo musicale deriva dal fatto che un brano può essere rappresentato e codificato con una successione di numeri sia a livello simbolico (la partitura, le sezioni e le note sul pentagramma), sia (pur con una certa approssimazione) a livello dei suoni associati alle note eseguite da ciascun strumento, per mezzo di opportuni parametri fisici³.

Inizialmente furono pensate e sperimentate tecniche e procedure software, per analizzare la struttura di un brano ed estrarne informazioni relative alle regole compositive che lo caratterizzano, per trasformarlo e anche per comporre nuovi brani (Tempelaars, 1972).

Presto fu avvertita anche l'esigenza di 'eseguire' in maniera automatica la musica così elaborata o composta dal calcolatore, svincolando l'uomo dalle difficoltà esecutive legate alla manualità degli strumenti, dove per 'eseguire' si intende *generare segnali con opportune forme d'onda (sintesi)*, atti a produrre, tramite un altoparlante, suoni con attributi musicali specificati dall'utente. Si sa che questa operazione risulta difficoltosa, dipendendo dalla complessità dei suoni da produrre: a tutt'oggi non esiste ancora un metodo standard efficiente, preciso e definitivo per l'analisi e sintesi di segnali musicali qualsiasi. Nel tempo si sono sviluppate varie tecniche basate su diversi modelli approssimati di rappresentazione matematica di segnali che consentono di avvicinarsi ad un risultato ottimale: queste tecniche sono caratterizzate da vantaggi e svantaggi, e la loro scelta dipende dagli obiettivi dell'applicazione e dalle tecnologie disponibili (De Poli, 1983).

Furono individuate due metodiche generali per elaborare un brano e per la sua esecuzione automatica per via elettronica:

- a) metodo digitale puro: oltre ad elaborare la struttura del brano musicale, il calcolatore è impiegato nel determinare la successione di numeri (i campioni) che, applicati ad un convertitore Digitale-Analogico (D/A), consentono di ottenere la forma analogica del segnale desiderato. Con questo metodo si impone un gravoso lavoro al calcolatore e nella maggior parte dei casi era impossibile ottenere una velocità di calcolo dei campioni sufficiente a garantire il corretto funzionamento del D/A⁴. Per ovviare a questo problema si era costretti a procedere in due

³ Una nota musicale è specificata dagli attributi altezza, tempo musicale e intensità: se eseguita da uno strumento dà luogo ad un suono complesso a cui è associato l'altro importante attributo, il timbro. Ai primi tre corrispondono le grandezze fisiche frequenza fondamentale, durata del suono e ampiezza. Il timbro dipende dalla forma d'onda o equivalentemente dalle parziali del suono, che evolvono dinamicamente nel tempo, inoltre è legato alle caratteristiche percettive dell'udito; comunque, sebbene con difficoltà e in modo approssimato, può anch'esso essere specificato con opportuni insiemi di parametri numerici (P. Righini, U. Righini, *Il Suono*, Tamburini, Milano 1974).

⁴ Il numero dei campioni/sec generati deve essere in teoria (teorema del campionamento) almeno il doppio della banda del segnale da trattare (due o più campioni/periodo alla frequenza più alta). In pratica,

tempi: dapprima si eseguiva l'elaborazione delle partiture e l'accumulo dei campioni su una memoria di massa, in genere impiegando molto più tempo rispetto alla durata effettiva del brano; in un secondo tempo si rileggevano i campioni applicandoli al convertitore D/A alla giusta velocità, ottenendo così il suono nella maniera corretta. L'inconveniente principale di tale procedura era che volendo modificare il brano, il percorso precedente doveva essere ripetuto più volte. Tale modalità era definita *esecuzione in tempo differito* (Mathews, 1969).

- b) metodo ibrido: il calcolatore elabora le strutture musicali, produce dati e parametri dei suoni da emettere, codificati in modo opportuno (a *macro livello*) e li invia ad un apparato esterno, un sintetizzatore specializzato, che si occupa della generazione dei segnali (a *micro livello*) in base ai comandi ricevuti. Con questo metodo si aveva in genere meno flessibilità nella definizione della forma d'onda, delegata al sintetizzatore esterno, però si riduceva di molto il tempo di calcolo, riuscendo ad ottenere così i suoni in *tempo reale* anche dai calcolatori di quell'epoca. Da notare che il minore *tempo macchina* significava anche risparmio sul costo per l'uso del calcolatore, allora assai elevato.

Volendo riassumere le situazioni si può dire così: nel primo caso il calcolatore svolge le funzioni di *aiuto-compositore/direttore/strumento*; nel secondo caso svolge le due prime funzioni mentre quella di *strumento* è esterna e delegata al terminale musicale. D'altronde per avere i vantaggi del metodo ibrido occorreva o *riadattare* moduli di sintesi tradizionali, in origine a controllo manuale, con un opportuno controllo digitale (Zinovief, 1969), o *progettarli ex novo* (come nel caso del TAU2): ambedue le soluzioni risultavano tanto più costose quanto più complesse erano le tecniche di sintesi e di controllo adottate.

Un'altra soluzione, meno elaborata, fu utilizzata da Grossi nelle sue prime esperienze e consisteva nell'utilizzare il segnale digitale (con escursione fra livello di zero e livello di tensione) prelevato direttamente da un bit dell'unità aritmetica del calcolatore: facendo eseguire delle opportune procedure tramite l'apposito programma DCMP (Digital Computer Music Program) si producevano onde quadre con frequenza fondamentale variabile in banda audio, in modo da generare melodie ad una sola voce, seguendo canoni tradizionali o altre regole di composizione (Grossi, 1974).

Il progetto di un terminale audio per il lavoro in tempo reale

Le ricerche al CNUCE

Quando si rivolse a Pisa (1969), il Maestro Grossi aveva già fatto esperienze per la generazione elettronica del suono con oscillatori, modulatori ed altri apparati analogici-

in applicazioni musicali ritenute allora di qualità (banda di 15 KHz) e con i dispositivi di conversione e filtraggio a disposizione, erano necessari almeno 5-6 campioni/periodo; Quindi in ingresso al D/A occorreva avere un flusso continuo di almeno 75000 campioni/sec. Tenendo conto delle altre pre-elaborazioni sulle complesse partiture dei brani, i calcolatori non potevano soddisfare tali requisiti.

ci, proponendone l'uso anche in sede didattica al Conservatorio Cherubini di Firenze, dove peraltro insegnava da anni violoncello. Convinto delle notevoli potenzialità dei nuovi calcolatori elettronici numerici in tutti i campi dell'attività musicale, si rivolse agli enti dove poteva ottenere mezzi e competenze disponibili per essere aiutato a realizzare le sue intuizioni.

Fin dalle prime esperienze nell'uso dei calcolatori, si attenne a tre principi fondamentali, quali: il *tempo reale* (anche accettando dei compromessi sulla qualità dei suoni), *l'interattività* (locale e remota), *l'automazione dei processi* (anche quelli decisionali) (Grossi, 1971).



Sala macchine del CNUCE (circa 1978).

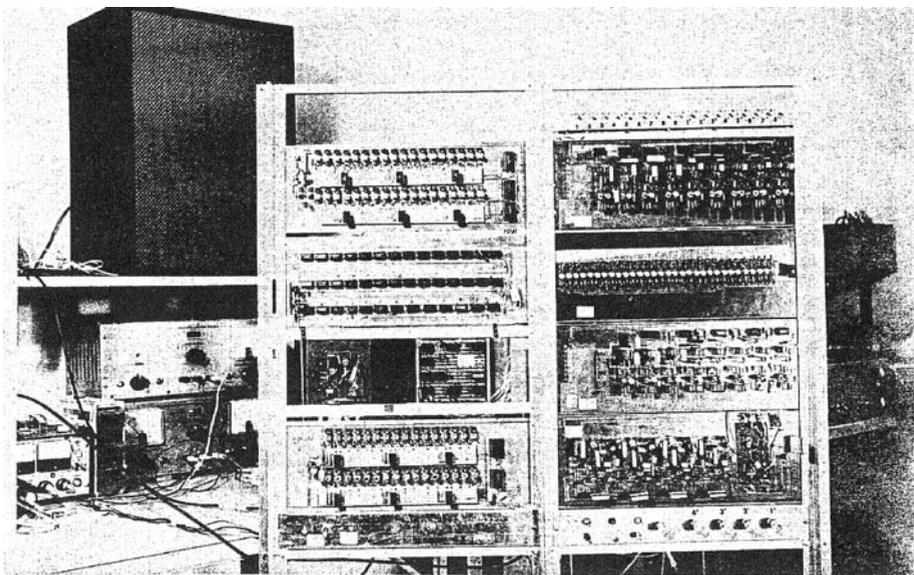
Le proposte di Grossi trovarono buona accoglienza presso il direttore del CNUCE, Prof. Guido Torrigiani e in quello dell'IEI Prof. Gianfranco Capriz, ambedue matematici, appassionati personalmente di musica e convinti dell'utilità dell'impiego dei calcolatori anche in questo campo. Anche con l'aiuto di esperti del Centro Scientifico IBM di Pisa, sorto a fianco del CNUCE, Grossi cominciò a sperimentare procedure di generazione di musica sia in tempo differito, col sistema IBM 1800 e S/7 provvisto di convertitore D/A, sia in tempo reale, con le procedure del DCMF per l'uscita diretta del segnale a onda quadra. Inoltre cominciò a utilizzare la rete dati del CNUCE per gli esperimenti remoti: in tutti i casi il notevole ammontare del tempo macchina richiesto dai calcolatori rappresentava un notevole inconveniente, per il superamento del quale fu richiesto anche l'interessamento dell'IEI.

Le ricerche all'IEI: realizzazione del TAU1

Presso l'IEI l'invito ad occuparsi delle problematiche relative alla sintesi di suoni tramite calcolatore fu accolto dal Prof. F. Denoth, che aveva maturato competenze di tecniche digitali-analogiche, nell'ambito di ricerche d'avanguardia nel settore bio-

II TAU1

Nel TAU1 i segnali sinusoidali di partenza erano ottenuti con dei VCO (Voltage Controlled Oscillator) a onda quadra, seguiti da divisori e da filtri analogici adattivi; le regolazioni di ampiezza erano ottenute con dei VCA (Voltage Controlled Amplifier) a controllo digitale. I circuiti erano realizzati in parte con tecnologia analogica e in parte con circuiti integrati DTL (Diode Transistor Logic). Fu costruito un prototipo da laboratorio comprendente una parte circuitale analogica per la sintesi di due voci a 4 armoniche, e una parte digitale in grado di fornire dinamicamente i parametri Frequenza e Durata delle note.



II TAU1.

La parte digitale, da me progettata (Bertini, 1974), gestiva dei buffer per contenere i parametri dei suoni e un lettore fotoelettrico (di quelli dismessi dalla CEP) che estraeva i dati con le informazioni del brano da eseguire da un nastro di carta, prima preparato al CNUCE dai collaboratori di Grossi.

Era ancora una modalità in tempo differito, sebbene provvisoria; inoltre, a causa del rumore emesso dalla meccanica lettore di nastro, l'ascolto del brano doveva essere fatto in un secondo momento, registrando prima i suoni su nastro magnetico analogico. Alcuni brani eseguiti col TAU1 sono stati inseriti nel disco LP dimostrativo "Computer Music", Ed. Musicali Fonos (1972), comprendente anche dei pezzi eseguiti col DCMP e altri col sistema IBM 1800 e S/7 con convertitore D/A.

medico⁵. La direzione seguita fu quella del metodo ibrido, con la scelta di progettare e realizzare uno speciale terminale audio polifonico e politimbrico e tale anche da potersi collegare come una qualunque periferica ai calcolatori IBM, possibilmente non interferendo col normale lavoro dei sistemi *time-sharing*.

Il primo passo fu quello di sperimentare e valutare alcune soluzioni sulle tecniche da adottare per la sintesi. Il lavoro fu svolto inizialmente con una tesi di laurea in Fisica (Chimenti, Denoth, 1976) e in seguito con un finanziamento condiviso con altri gruppi di ricerca, nell'ambito di un Progetto di Ricerca del CNR sul tema "Analisi e sintesi della voce e dei suoni".

Fra le varie tecniche possibili Denoth scelse la sintesi additiva a componenti sinusoidali, una scelta coraggiosa all'epoca, per la difficoltà della sua implementazione (risultata in genere onerosa fino a pochi anni fa anche con i moderni DSP): così fu realizzato un primo prototipo da laboratorio, il TAU1.

Criteri di progetto, architettura e funzionamento del TAU2

Con il TAU1 fu possibile compiere le necessarie valutazioni per la definizione degli intervalli di quantizzazione e dei campi di validità dei parametri: ad es. si potevano variare dinamicamente le frequenze (ottenendo dei glissando), le regolazioni di ampiezza delle note, le durate minime da assegnare al metronomo e valutarne gli effetti; le timbriche erano prefissate con degli *switch* manuali.

Ci si rese conto a quel punto della complessità dei problemi inerenti alla *computer music* e della sua natura ampiamente multidisciplinare che vede coinvolte: elettronica, elaborazione segnali, programmazione dei calcolatori, informatica, ovviamente, musica (in molti dei suoi aspetti), e inoltre elettroacustica, psicoacustica ecc. Quest'ultima disciplina studia le caratteristiche della percezione uditiva per stimare le soglie differenziali rispetto alle variazioni delle grandezze fisiche (frequenza, intensità, durate e timbro dei suoni) che intervengono nella determinazione dei livelli di quantizzazione dei parametri associati. L'obbiettivo è infatti quello di simulare le variazioni continue di tali grandezze, come si verificano in realtà, adoprando il minor numero di livelli di definizione dei parametri numerici, in modo da far gestire al calcolatore la quantità di dati più piccola possibile.

Oltre alle considerazioni fin qui esposte e alle sperimentazioni già effettuate col TAU1, per definire le caratteristiche di progetto del TAU2 furono considerate altre esigenze, di cui riportiamo le principali:

- Esigenze acustico-musicali: possibilità di emissione di un numero sufficiente di note e su più canali, tale da eseguire brani di una certa complessità strutturale, senza ricorrere a tecniche di *play-back*;

⁵ Dopo il successo ottenuto nella realizzazione di un originale *pacemaker* cardiaco (brevettato) e per meglio contribuire ad importanti ricerche per l'impiego delle tecniche numeriche per l'analisi di segnali elettromiografici e cardiaci, all'IEI si era infatti costituita negli anni 1967/68 una sezione di ricerca per applicazioni dell'informatica nel settore biomedico, diretta da Franco Denoth.

- Esigenze funzionali: operare in tempo reale con interfacciamento ad un sistema in *time-sharing* con il minimo impegno di calcolo per il sistema;
- Esigenze costruttive del terminale: realizzazione con dimensioni, tempi e costi ragionevoli;
- Esigenze di facilità di programmazione del calcolatore: interfaccia intuitiva verso il sistema con facilità di lavoro anche per persone non particolarmente esperte.

Il problema era quello non banale di fissare quantitativamente i dati di specifica del terminale con il miglior bilanciamento fra tutte queste esigenze. Dopo aver valutato altre soluzioni sulle tecniche da adottare per la generazione dei segnali ed aver eseguito prove su nuovi componenti considerati per il progetto del TAU2 (non essendo del tutto soddisfacenti le soluzioni adottate sul TAU1), si arrivò a definire i campi di variabilità dei parametri ed in generale tutte le altre specifiche seguite per il progetto e la realizzazione effettiva del terminale audio (Bertini, Denoth, 1975).

L'organizzazione del sistema è mostrata in Fig. 1. In breve si notano:

- il TAU2, composto da due parti, anche fisicamente distinte:
 - a) unità digitale, che riceve i dati tramite il collegamento col sistema IBM, li memorizza in un buffer circolare, li interpreta e li fornisce nel giusto formato e al tempo debito alla parte analogica;
 - b) unità audio, che genera i segnali elementari, li modula in ampiezza e li combina producendo segnali musicali complessi, in base ai parametri presenti ai suoi ingressi;
- il sistema IBM con tutte le sue componenti hw e sw, che ospita il programma TAUMUS, l'archivio di brani musicali, e le procedure di elaborazione dei parametri e di trasmissione dati verso la connessione col TAU2;
- il terminale (telescrivente+video) vicino al TAU2, con cui l'utente dialoga con l'elaboratore, attiva il TAUMUS, introduce dati e programmi, fa eseguire le elaborazioni e comanda l'esecuzione sul TAU2.

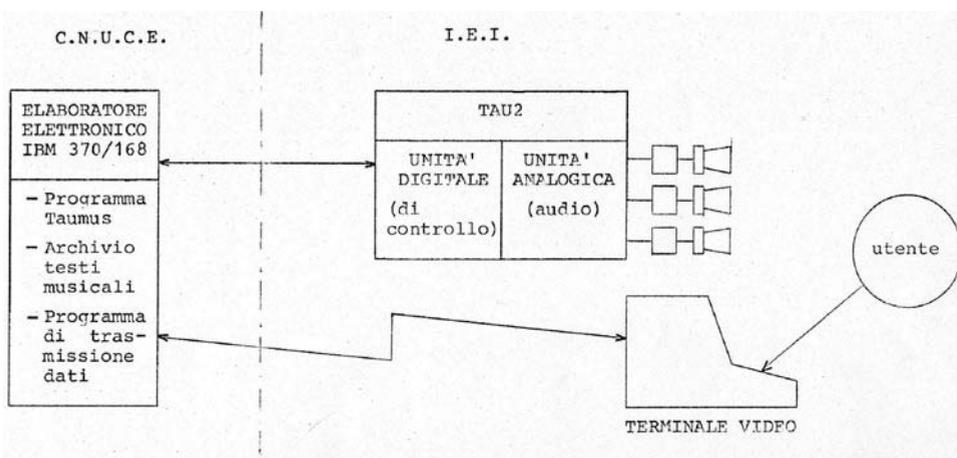


Figura 1. Architettura e risorse del sistema TAU2-TAUMUS.

Principio di funzionamento e caratteristiche musicali del TAU2

I segnali audio sono ottenuti, in linea di principio, con un processo di sintesi additiva armonica a spettro variabile, programmabile a 'brevi intervalli di tempo' (dell'ordine di alcuni ms, vedere in Appendice i dettagli sul modello di sintesi adottato). I segnali di partenza sono sinusoidali con ampiezze fisse: il segnale a frequenza più bassa, o fondamentale, identifica una 'voce' (può essere una nota della scala ben temperata od un suono intermedio qualsiasi fra quelli disponibili), mentre l'evoluzione delle ampiezze delle armoniche associate, regolabili singolarmente e dinamicamente da appositi VCA (Voltage Controlled Amplifier) contribuisce a caratterizzare il timbro del suono.

Il TAU2 dispone di un complesso di generatori con una gamma di 324 segnali sinusoidali con frequenze fisse molto stabili (vedi oltre per i particolari realizzativi) comprese fra 32,7 Hz e 16.425,1 Hz, con un rapporto intervallare di 1/3 di semitono, sufficientemente fine per simulare una scala quasi continua.

L'unità audio comprende tre canali uguali tra loro. Nella Fig. 2 sono indicate le parti principali di un canale; il banco dei generatori è unico e fornisce i segnali sinusoidali in modo continuativo a tutti e tre i canali. Mantenendo in ingresso il codice numerico F_j relativo ad una voce ($1 \leq F_j \leq 255$), una particolare struttura hw costituita da migliaia di interruttori analogici a comando digitale integrati (rete di selezione e miscelazione) individua dal banco dei generatori e commuta sulla prima uscita (barra B1) la corrispondente frequenza fondamentale $f_0(F_j)$, automaticamente anche sulle altre sei uscite B2...B7 le armoniche $2f_0(F_j)$... $7f_0(F_j)$ relative a quella fondamentale.

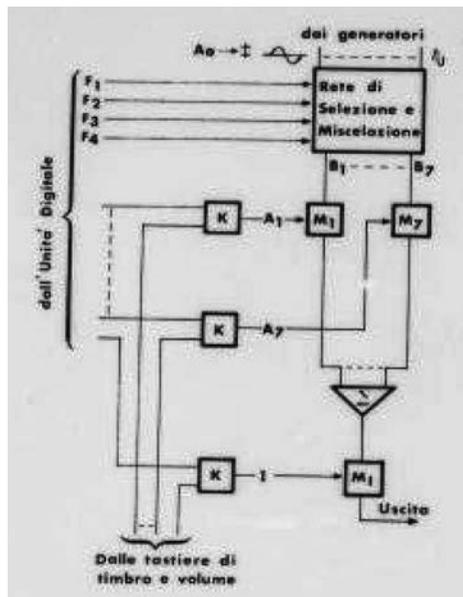


Figura 2. Struttura di un canale audio. Rete di selezione e miscelazione frequenze, B1-B7 Barre di somma delle armoniche, Mi = VCA circuiti regolatori delle ampiezze delle armoniche e dell'intensità di uscita, K = Selettori.

La rete di selezione può gestire contemporaneamente fino a quattro voci distinte e per ciascuna di esse seleziona dal banco le relative armoniche, facendo confluire i segnali sulle rispettive barre: quindi su ogni barra B_n vi è un segnale che è formato dalla somma al più di quattro armoniche. I segnali in uscita dalle barre prima di confluire nel sommatore di canale sono regolati in ampiezza tra otto livelli (27 dB di dinamica) per conferire la timbrica di canale (blocchetti $M_1 \dots M_7$); a sua volta il segnale d'uscita di quel canale è controllato in volume con 16 possibili livelli (29 dB di dinamica, blocchetto M_p). Si fa notare che le quattro voci hanno la stessa timbrica, cioè gli stessi rapporti di ampiezza tra le armoniche dello stesso ordine: in pratica è come se fossero quattro strumenti della stessa famiglia.

I parametri che controllano i suoni sono specificabili per ciascun canale e sono costituiti da codici di frequenza $F_{j1} \dots F_{j4}$ relativi alle voci da emettere, altri insiemi di valori $A_1 \dots A_n$ per le ampiezze delle armoniche, I (intensità) per il volume di canale ed il parametro D per la durata.

La durata dei suoni in esecuzione (t in ms), corrispondenti ad un dato set di parametri che rimangono invariati, è definita dalla relazione:

$$dt = D \times T, \text{ dove:}$$

D = è un parametro definibile via sw dal TAUMUS e può assumere valori interi da 1 fino a 31;

T = tempo base (o metronomo) è prefissato in hw sul TAU2 e può essere regolato manualmente tra 1 ms e 999 ms, normalmente fissato a 10 ms (1/100 di sec.).

Tramite il pannello di controllo è possibile fare delle prove di timbrica variando manualmente i livelli A_i ed I per ogni canale; ciò può essere utile per la taratura dei livelli o per altre prove di lavoro.

Il segnale d'uscita $U(t)$ di un canale è rappresentabile con la seguente espressione:

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

dove:

g = funzioni di trasferimento dei modulatori

A_0 = ampiezza dei segnali di ingresso

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

φ = fase dei segnali di ingresso.

$U(t)$ è quindi un segnale periodico definito, all'interno di ogni intervallo ($dt = D \times T$), dai parametri F_j , A_i e I ed ha una dinamica notevole (da pochi millivolt ad alcuni volt); la fase φ dei segnali è casuale, cioè non programmabile e questo non ha causato inconvenienti, rispetto ai risultati fonici aspettati. Un filtraggio hardware interviene all'inizio di ogni intervallo di definizione per ridurre i *click* al cambio dei parametri.

In tal senso particolari accorgimenti sui valori da assegnare ai parametri devono essere adottati, per evitare scarti eccessivi di ampiezza nei segnali prodotti, ad es. operando la scalatura graduale dei livelli. Un esempio di segnale ottenuto dal TAU2 è mostrato nel seguito.

Organizzazione dei dati

Ai parametri inviati dall'elaboratore al TAU2 per mezzo di una codifica binaria, sono aggregate anche altre informazioni necessarie alla loro identificazione e/o smistamento ai rispettivi canali. Venne in pratica definito un protocollo che prevedeva degli insiemi opportuni detti 'istruzioni musicali' a formato variabile (una specie di protocollo MIDI primitivo) riportate in Fig. 3, le cui principali sono: a) l'Istruzione Timbro, che contiene i parametri A_i relativi ai tre canali, b) l'Istruzione Suono, che raggruppa i valori delle frequenze ed altri campi di bit relativi al comando di circuiti per gli effetti speciali (vibrato, tremolo, riverbero) posti in uscita ad ogni canale audio. Il primo byte contiene il codice operativo (CO), mentre il campo IC (indirizzo canale) specifica il canale da attivare; MT sta per Modulo Timbro (con le ampiezze A_i) e MS per Modulo Suono (con le quattro frequenze F_k , Intensità e ES effetti speciali) relativi ad ogni canale. I bit R sono di riserva per altri eventuali usi.

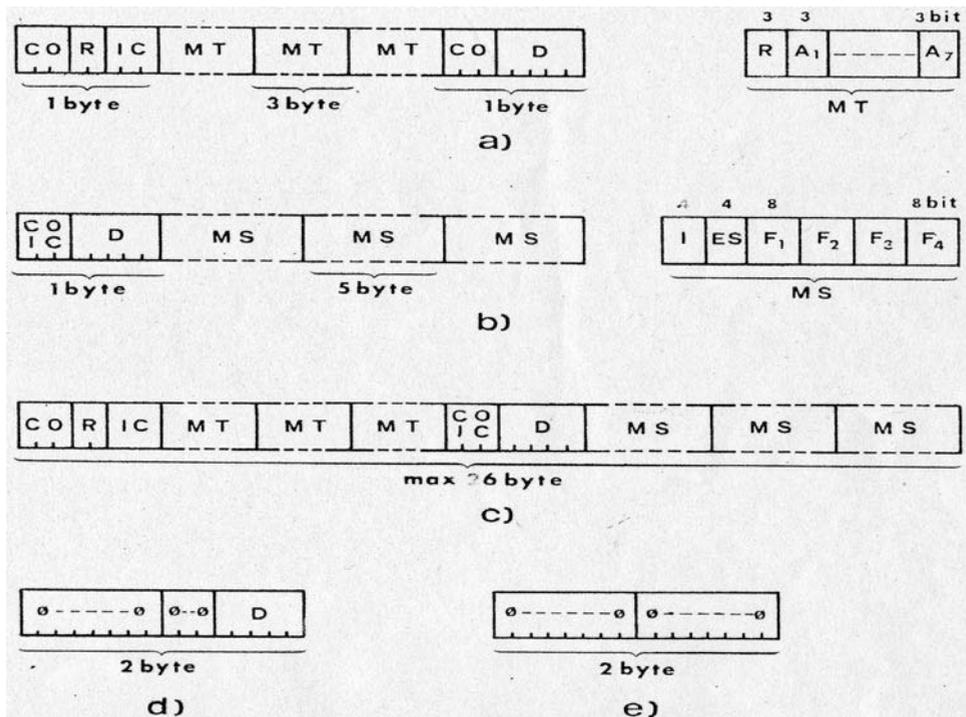


Figura 3 – Formato istruzioni: a) Timbro; b) Suono; c) a + b; d) Parametri Invarianti; e) Fine Brano.

Tutti i tipi di istruzioni contengono il parametro Durata, ad eccezione del Fine Brano. È possibile rallentare o accelerare il tempo di esecuzione del brano agendo su D tramite il programma TAUMUS, oppure agendo manualmente sul pannello del TAU2, per variazioni fini.

Lo spettro (quindi la forma d'onda) può essere regolato a livello di canale. Le combinazioni spettrali diverse sono 2^{21} per canale e consentono una gamma timbrica notevole che può essere variata in sequenza durante lo stesso brano, consentendo una modulazione continua del timbro (*morphing*).

Sono quindi disponibili 12 voci contemporanee, suddivise in tre timbriche distinte, per un totale di:

4 voci x 7 armoniche x 3 canali = 84 segnali in uscita dal TAU2, fornendo una stereofonia più il canale centrale, per avere la possibilità di realizzare una efficace spazializzazione del suono.

Descrizione funzionale del TAU2

Lo schema funzionale a blocchi delle unità principali del TAU2 è riportato in Fig. 4. Non sono specificate alcune parti secondarie come gli alimentatori stabilizzati, gli amplificatori, i mixer ecc.

Il TAU2 è collegato al calcolatore ospite, funzionante in *time sharing*, tramite un collegamento diretto parallelo, con 16 bit di informazione e alcuni segnali di controllo: la trasmissione avviene a circa 50 K doppi byte/sec, con blocchi di 1024 doppi byte. Nell'unità digitale si notano le interfacce di ingresso per gli adattamenti elettrici e per la sincronizzazione dei segnali di controllo della trasmissione. I blocchi di dati contenenti le istruzioni musicali vengono memorizzati *per byte* in una memoria tampone (buffer di 4 Kbyte), tramite opportune operazioni gestite dall'unità di controllo. A regime il controllo estrae i dati byte a byte dalla memoria, li interpreta e ricostruisce le istruzioni musicali ricompattandole nel giusto formato in registri intermedi di comodo (Reg. Istruzioni Suono e Timbro). Trascorso il tempo associato ai suoni da emettere per una certa durata D, il controllo trasferisce in parallelo i nuovi parametri dal Reg. Istruz al Reg. di Uscita, sostituendoli a quelli scaduti e così via sino alla fine dell'esecuzione del brano.

Visto il tipo di funzioni da eseguire e le velocità richieste il controllo è basato su una struttura microprogrammata, usufruendo così dei vantaggi di una maggiore strutturazione del progetto e facilità di manutenzione, rispetto ad altre soluzioni. Le funzioni di controllo sono memorizzate in una speciale ROM (Read Only Memory) a componenti discreti ed implementate con programmazione di tipo 'orizzontale', per cui alcune parti operative (reti e registri) lavorano assieme con un certo grado di parallelismo (Maestrini, 1972). La procedura di lettura della memoria è eseguita in background mentre quella di scrittura dei dati è eseguita su interrupt per rispettare i vincoli del collegamento; il passaggio dei nuovi parametri viene eseguito al verificarsi dell'evento 'tempo scaduto' per l'istruzione attuale.

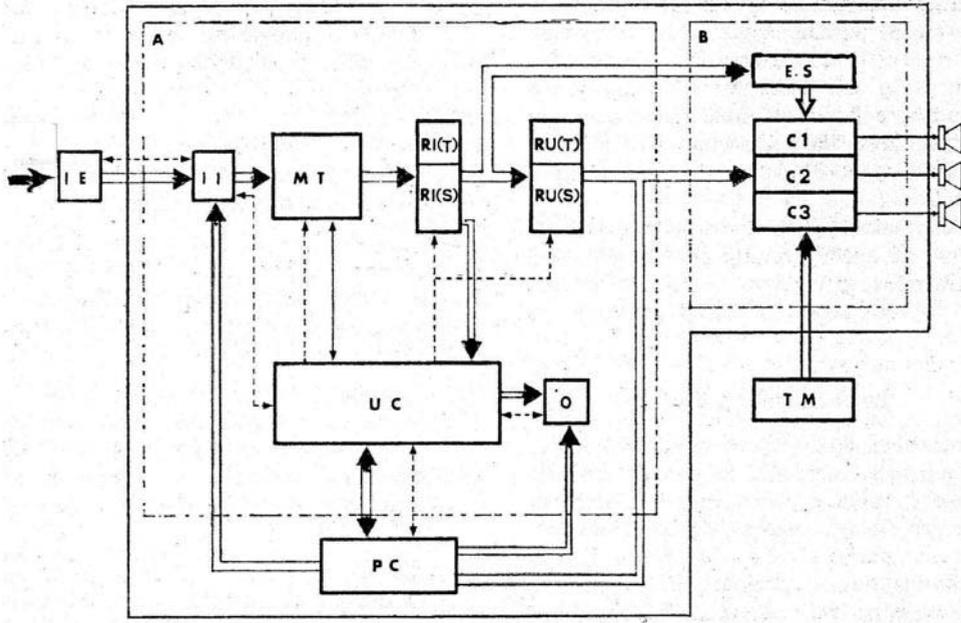
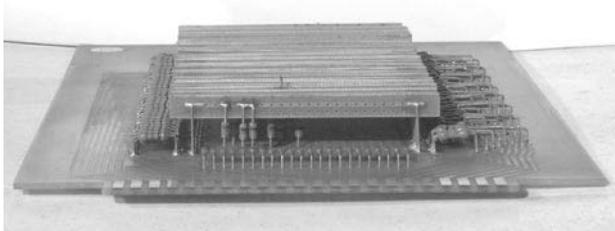


Figura 4 – Struttura del TAU2 A) Unità digitale: IE-Interfaccia di Ingresso, II-Interfaccia Interna, MT-Memoria Tampone UC-Controllo, RI-Registro Istruzioni, RU-Registro Uscita parametri, PC-Pannelli di Comando, O-Orologio del metronomo. B) Unità audio: C1,2,3-Canali Audio, ES-Effetti Speciali, TM-Tastiera Manuale.

La memoria è suddivisa in due blocchi: mentre in uno vengono letti i byte delle istruzioni da preparare per sostituire i suoni attuali, nell'altro è possibile inserire i byte relativi ai blocchi delle istruzioni in arrivo dal calcolatore per il seguito del brano e così via. I contatori degli indirizzi di lettura e scrittura in memoria sono realizzati a incremento unitario e organizzati per far funzionare la memoria come 'buffer circolare' (in modo simile alle moderne applicazioni sui microprocessori DSP). È stata sufficiente una limitata capacità di memoria (4 Kbyte) per compensare sia i ritardi dei tempi di risposta del canale alla richiesta del TAU2 (inviata quando c'è un blocco vuoto), che le differenti velocità di arrivo dei dati in ingresso e in uscita dall'unità digitale.



Una delle due schede della ROM, memoria a sola lettura, realizzata a diodi.

Quando l'utente ordina da terminale video l'elaborazione e l'esecuzione di un brano, il TAU2 è attivo in *stand by*, in grado di ricevere il primo blocco dal canale, spedito in modo automatico dal TAUMUS; dopodiché è l'unità di controllo che gestisce la trasmissione, inviando la richiesta di un nuovo blocco di dati, quando si è liberata una metà del buffer. Altri particolari in (Bertini, 1978).

Sulla base di esperienze di lavoro si era accertato che il tempo reale, senza interruzioni dei suoni per 'mancanza dati', era assicurato quasi sempre, ad eccezione delle ore centrali di alcune giornate in cui erano connessi al sistema *time sharing* oltre cento utenti o nel caso di aggravio di lavoro sul canale specifico cui era allacciato il TAU2.

Per quanto riguarda l'unità audio abbiamo già spiegato in dettaglio la struttura di un canale: in pratica è ripetuta per i tre canali in modo identico. Sono stati aggiunti successivamente dei circuiti con tecnologia mista analogica e digitale per gli effetti speciali (riverbero, vibrato, tremolo, coro) regolabili manualmente e via sw tramite alcuni bit dell'istruzione suono. Nel percorso del segnale, all'uscita di ogni canale, erano presenti inoltre diversi moduli circuitali di manipolazione analogica (non riportati nello schema): un mixer, che ha in ingresso le uscite degli altri canali e ingressi esterni: una sezione con preamplificatore-equalizzatore grafico a sette sottobande; un amplificatore finale integrato, con 50 watt di potenza d'uscita. Anche tutte queste parti, progettate e costruite appositamente all'IEI, erano alloggiare nel rack della parte digitale e poste al disotto dei pannelli di controllo della parte digitale.

Cenni alle funzioni principali del TAUMUS

Progettato e realizzato al CNUCE principalmente da P. Grossi, il TAUMUS è un insieme di procedure per elaborare le strutture musicali di un brano, tramite una serie di comandi ad alto livello richiamati da consolle in ambiente VM (Virtual Machine) del sistema IBM. Via via che sono pronti i parametri dei suoni da emettere, il programma li converte nel formato adatto ad essere interpretato dal TAU2 e li invia al terminale con la temporizzazione gestita a livello fisico dal protocollo di comunicazione e in osservanza ai tempi dettati dall'esecuzione delle note. Dato il tipo di sintesi su cui è basato il TAU2 il lavoro richiesto al calcolatore è sempre molto inferiore alla durata dei suoni per cui, da questo punto vista il funzionamento in tempo reale è sempre assicurato.

Composizione ed elaborazione vengono controllate dall'utente con varie possibilità di intervento, di cui diamo un breve cenno. Le funzioni principali del TAUMUS sono tre: *Composizione*, *Rielaborazione*, *Gestione della libreria*. Il programma usa due zone di lavoro: la prima è detta Area Operativa ed è la porzione di memoria dove vengono effettuate tutte le elaborazioni sulle strutture musicali e al termine delle quali i parametri dei brani vengono indirizzati ad una seconda area di archivio, detta Libreria e, a richiesta, al TAU2 per l'esecuzione.

La funzione di Composizione contiene varie opzioni: il comando Text per la trascrizione e l'introduzione da testi tradizionali (vedi Fig. 5), comandi Create con sottoambienti per la generazione guidata di brani, mediante un certo grado di controllo sulle composizioni, o produzione automatica di brani prelevati casualmente o con opzioni dall'archivio.

Le funzioni di Rielaborazione consentono di apportare modifiche al materiale presente dell'area operativa (comando Modify), specificando con varie opzioni le zone, le voci del brano e i parametri da trattare. Il comando Vary può operare tutta una serie di modifiche in modo automatico o casuale, e consente l'immediata esecuzione sul TAU2 senza limiti di tempo.



Figura 5 – Livelli di codifica del testo musicale: a) pentagramma, b) alla consolle; c) area di lavoro, d) codici inviati al TAU2.

Interessante è l'insieme di comandi per la Modulazione che operano delle variazioni su tutti i parametri (F_i , A_n e V_i) di un dato brano, in base a 'modelli' richiamabili dall'archivio o definibili al momento. Per eseguire il comando, i modelli vengono posti in tabelle apposite dell'area operativa e influenzano direttamente i valori correnti, producendo delle modifiche al brano in uscita.

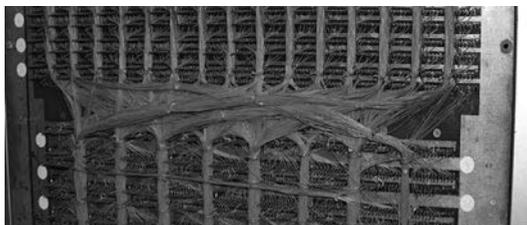
Oltre ad una serie di funzioni tipiche della gestione di archivi, i comandi della Libreria consentono di sfruttare in modo automatico tramite il comando Exec l'esecuzione di brani con tutte le altre funzioni previste. In questo modo si può simulare un utente che sceglie brani, li modifica e li fa eseguire in modo ininterrotto. Particolari delle funzioni del TAUMUS sono riportati in Grossi (1976).

Tecnologia realizzativa e costruzione del TAU2

Come primo passo fu deciso di affrontare la progettazione e sperimentazione di alcuni nuovi dispositivi da impiegare nell'unità audio, ritenuta la parte più critica del sistema. Tale compito fu affidato a Chimenti, Ferrucci e Bertini coordinati dal Prof Denoth. La difficoltà maggiore incontrata fu quella della sistemazione pratica di alcu-

ni blocchi circuitali di grosse dimensioni, derivati dall'aver adottato soluzioni diverse da quelle del TAU1, per generare i segnali. Infatti per produrre le sinusoidi non si sono utilizzati i VCO, come nella maggior parte dei sintetizzatori analogici di quel tempo, per evitare l'instabilità in frequenza e nel nostro caso, anche per l'elevato numero di segnali da generare simultaneamente. Sono invece stati realizzati degli oscillatori ad onda quadra quarzati e mediante filtri risonanti LC (a induttore e condensatore) si sono ottenute le 326 frequenze perfettamente sinusoidali e stabili. Il banco dei generatori fu dislocato su 36 schede di dimensioni 20×40 cm.

Per selezionare le frequenze specificate nelle istruzioni e farle confluire sulle uscite delle reti di selezione, furono usati i primi interruttori analogici CMOS integrati a controllo digitale disponibili in commercio (CD 4009 e CD 4010). Essendo necessarie centinaia di chip (contenenti ciascuno sei di tali interruttori) per canale, non era conveniente porli tutti su di un piano: fu adottato un compromesso realizzando tante piccole schede, con tre chip ciascuna, innestate in grosse piastre, però di dimensioni ragionevoli. Furono progettati anche nuovi regolatori d'ampiezza dei segnali con moltiplicatori integrati a controllo di tensione, con prestazioni migliorate rispetto a quelli adottati nel TAU1.

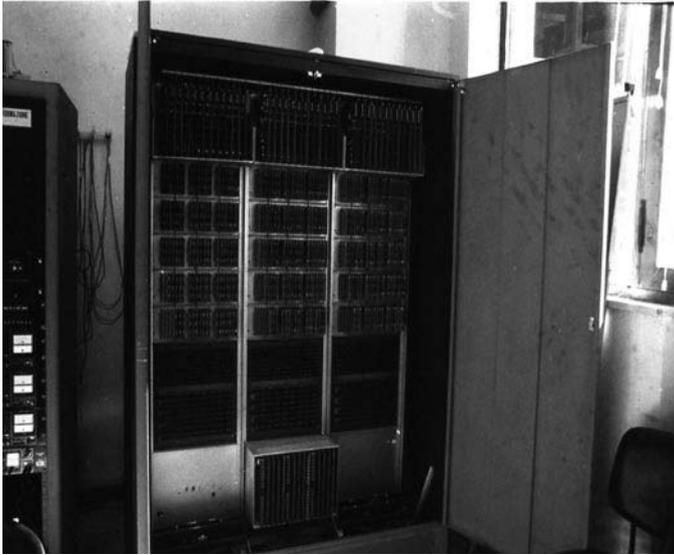


Parte di una matrice di selezione delle frequenze con cablaggio realizzato a *wire-wrap*.

Una volta dimensionato il progetto logico delle varie parti di una macchina, l'abilità tecnica nella realizzazione, stava nel riuscire a suddividere le parti circuitali di grosse dimensioni, in sottoblocchi più piccoli, tali da essere contenuti in schede uguali tra loro, realizzabili a circuiti stampati con piste di rame. Dove ciò non era possibile si ricorreva alla tecnica del *wire-wrap* (più scomoda e meno affidabile nel tempo), che consiste nell'unire i punti da connettere con fili sottili, usando con pazienza degli appositi attrezzi.

Con la tecnologia realizzativa disponibile all'epoca, il gruppo di tecnici provetti dell'IEI si prese l'impegno e la cura di realizzare tutte le parti nei propri laboratori (circuiti stampati, cablaggi, disegni, ecc.), non essendo facilmente disponibili all'esterno le competenze richieste.

Anche il progetto della parte digitale e di interfaccia con il sistema *time-sharing*, ritenuto un problema più tecnico e con minori difficoltà implementative, si rivelò invece complicato. La scelta del tipo di connessione con il sistema *time-sharing*, comportò diverse riunioni con esperti della IBM: le specifiche dal punto di vista elettrico e logico richieste dalle interfacce IBM erano piuttosto delicate e ciò obbligava a fare un lavoro meticoloso di analisi delle caratteristiche su vari manuali, per valutare le caratteristiche delle varie periferiche e dei collegamenti possibili (uso di linea seriale veloce con modem a 4800, oppure collegamenti con cavo diretto).



Vista dell'unità audio (lato componenti): in alto 36 schede degli oscillatori; al centro la matrici di selezione delle frequenze; in basso le schede delle timbriche; nel fondo del rack gli alimentatori stabilizzati.

Una circostanza che accelerò i lavori e influenzò in parte le successive soluzioni tecniche, fu il fatto che nel 1973 la direzione dell'istituto individuò nel progetto del TAU2 la realizzazione che meglio avrebbe rappresentato le capacità e le competenze esistenti in istituto per le tecnologie informatiche, e i cui risultati potevano quindi essere esibiti in occasione di un importante convegno da organizzare per il ventennale di costituzione del CSCE-IEI, previsto per la metà del 1975.

Preso atto delle difficoltà oggettive del progetto⁶, fu rafforzato lo staff con il coinvolgimento di altri collaboratori tecnici e fu chiesta la priorità per il TAU2 a tutti i servizi tecnici (lab. di montaggio, officina meccanica, ecc.). Poiché ricercatori esperti erano già impegnati su altri temi e ci potevano assicurare l'aiuto solo su singoli aspetti, la direzione affiancò alla corresponsabilità del progetto, assieme a Denoth, sia il Chimenti (allora borsista CNR) che il sottoscritto, confidando nella mia esperienza tecnica e come laureando al Corso di Informatica.

Nell'ottica di accelerare i tempi di realizzazione della connessione col calcolatore, fu deciso di basarsi su una soluzione già sperimentata in un precedente progetto tra CNUCE ed IEI. Si scelse quindi un collegamento parallelo diretto tra il calcolatore e il TAU2 (a 16 bit), tramite un canale Selector in modalità Block-Multiplex del sistema time-sharing IBM 360/67, gestito da una interfaccia 2701 PDA (Parallel Data Adapter Unit-Original Equipment Manufacturer Information, IBM System Ref. Library). La realizzazione era

⁶ Non è da stupirsi dei lunghi tempi di lavoro previsti, perché con le tecnologie di allora, alcuni elaboratori *special purpose* realizzati in precedenza avevano richiesto dai due ai tre anni e l'impegno di una decina di persone fra tecnici e ricercatori.

piuttosto onerosa in termini di costo, comprendendo la stesura di un cavo multipolare di circa 150 metri tra CNUCE ed IEI, attestato su apposite interfacce hw, ma ci avrebbe però garantito una buona affidabilità di funzionamento, come in effetti si verificò.



Vista d'assieme del TAU2: a sinistra il posto di lavoro utente, il rack dell'Unità Digitale, con gli apparati di mixaggio e amplificazione e a destra l'Unità Audio.

La messa in funzione del sistema fu una sfida piuttosto importante per tutti ed in modo particolare per me, visto che in pratica mi trovai a coordinare l'intero progetto, assieme a Denoth e Chimenti per la parte analogica e L. Dall'Antonia per la parte del collegamento. Durante quei due anni lavorammo tutti alacremente, con il timore di non farcela per la scadenza del programmato convegno, e negli ultimi mesi anche oltre il normale orario, per completare la costruzione ed effettuare il collaudo della parte digitale e del collegamento col calcolatore e quindi riuscire a fare eseguire i primi brani dal sistema.

Infine in occasione del Convegno ("Venti anni di Informatica a Pisa", 16-19 giugno 1975), varie autorità e gli specialisti dell'Informatica a livello mondiale poterono assistere alle prime dimostrazioni del Maestro Grossi, con il sistema TAU2-TAUMUS funzionante!

Messa a punto hw e sw ed esperienze con il sistema

Il collaudo iniziale del TAU2 era consistito nel verificare essenzialmente il funzionamento operativo, cioè che il colloquio col sistema IBM avvenisse in modo corretto e che si generassero i suoni corrispondenti alle informazioni inviate.

A differenza dei sistemi di calcolo digitali, l'uscita del sintetizzatore produce segnali in banda audio e questi devono rispettare delle caratteristiche di qualità adeguate. In effetti l'uscita audio del TAU2 presentava alcuni ronzii, instabilità ai bassi livelli di ampiezza delle armoniche (inizialmente mascherati con qualche 'astuzia del mestiere') e altri difetti fastidiosi che non permettevano di lavorare con la dovuta precisione sulle mappe timbriche e nelle registrazioni dei brani.

La rimozione di questi inconvenienti ha richiesto una successiva meticolosa fase di messa a punto. I ronzii a 50 Hz e 100 Hz erano dovuti principalmente all'uso di trasformatori con normali nuclei lamellari E + I per gli alimentatori stabilizzati: essendo in gioco delle elevate correnti (10-15 Ampere) si verificavano notevoli emissioni di flusso disperso dagli spigoli dei ferri che venivano captate dalle strutture in ferro degli armadi e ritrasmesse a tutti i circuiti della sezione audio, provocando disturbi sulle uscite. Fu allora necessario il rifacimento di tutte le alimentazioni con l'adozione di nuclei a doppio C ed una stabilizzazione più accurata, tenendo conto delle effettive correnti di picco a sistema funzionante. Fu aggiunta una ulteriore stabilizzazione delle tensioni sulle singole schede dei regolatori VCA per evitare fluttuazioni dei livelli di ampiezza delle armoniche. Altri interventi riguardarono la sistemazione dei ritorni di massa sui molti cavetti schermati delle reti di selezione delle frequenze.

Anche per il TAUMUS furono apportati miglioramenti ed ampliamenti da parte dei componenti della Sezione Musicologia del CNUCE; nel programma, scritto per la maggior parte in FORTRAN, furono inseriti dei moduli scritti in assembler, arricchito l'archivio musicale di brani e modelli timbrici, migliorate le procedure di analisi e di generazione automatica di brani (Grossi, 1976).

Infine dopo aver regolato anche i livelli sulle ampiezze delle formanti per evitare saturazioni in presenza di tutti i segnali selezionati, la qualità risultante risultò sufficientemente buona per iniziare il lavoro di ricerca sulle mappe di timbrica e le registrazioni dei brani su disco.

Verifica delle prestazioni foniche e prove di sintesi di suoni

È già stato detto che fra gli obiettivi ritenuti prioritari per il TAU2, non c'era quello di riottenere il suono di strumenti musicali tradizionali con l'ottica di una loro precisa imitazione. Ognuno avrebbe programmato il sistema nell'ambito delle gamme disponibili, per ottenere i suoni con timbriche più vicino possibile a quelli desiderati. In tal senso il terminale + calcolatore era come un nuovo duttile strumento, caratterizzato da uno spazio sonoro ampio e definibile molto finemente, ma sempre entro limiti prefissati. Era comunque doveroso eseguire appositi test per la valutazione della capacità di sintesi del TAU2 nel ricostruire segnali con determinate caratteristiche; questo aspetto, tenuto in sospenso con una certa apprensione, fu poi affrontato una volta completata la messa a punto il terminale, proprio per saggiarne in modo corretto le caratteristiche foniche.

Va anche detto che ricerche su analisi/sintesi di segnali in generale ed in particolare di segnali audio, con le conoscenze ed i mezzi dell'epoca, erano parecchio difficili

sia con tecniche analogiche che numeriche⁷. Ad ogni modo, furono effettuati da me e Chimenti degli esperimenti di analisi/sintesi su diversi segnali e come esempio qui citiamo le prove fatte su un 'pizzicato' di una corda di violino, in corrispondenza ad una nota DO₃, il Do centrale: un tipo di suono con attacco repentino, che poteva meglio evidenziare i limiti del TAU2.

Per eseguire l'analisi e ricavare i parametri del suono si procedette in due modi:

- a) modo analogico: il suono, della durata di circa un secondo, fu registrato in camera antiriverberante e poi trasferito su un nastro analogico circolare, in modo da poterlo leggere in continuazione da un registratore. Impiegando dei filtri passa banda analogici, un circuito inseguitore di inviluppo realizzato appositamente, un oscilloscopio con tracce ad alta persistenza, furono ricavati, uno dopo l'altro, gli inviluppi di ampiezza delle parziali (a frequenza armonica della fondamentale) riportandoli su grafici e tabelle (Flanagan, 1965).
- b) modo numerico: fu impiegato un metodo basato sulla DFT, grazie ad un elaboratore HP2100 nel frattempo acquistato dall'IEI, dedicato all'analisi multicanale di segnali biomedici e provvisto di amplificatori e convertitori ad alte prestazioni: con tale strumento, programmato opportunamente e con adatte finestre di pesatura, si sono stimati gli spettri, a brevi intervalli di tempo, del nostro segnale.

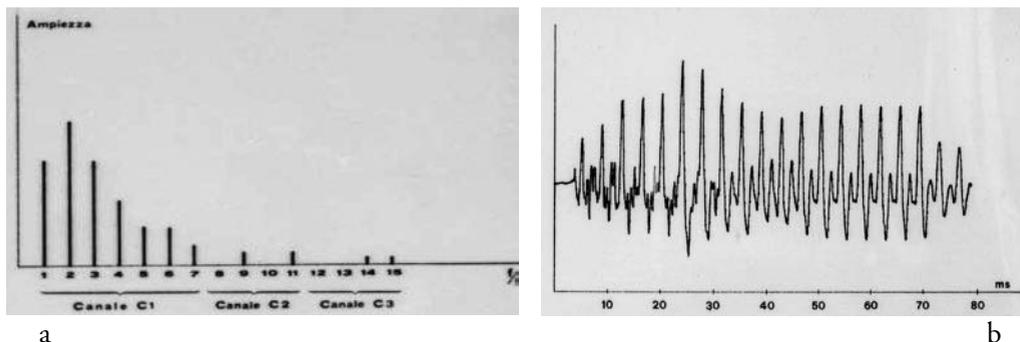


Figura 6 – Analisi e sintesi di un pizzicato di violino: a) Spettro armonico di un tratto iniziale (durata di 5 ms) della fase di attacco; b) Andamento del segnale nel tempo in uscita dal TAU2: fasi di attacco, decay e inizio sostegno.

Pur avendo condotto le prove di analisi in modo non troppo rigoroso, i risultati delle due modalità risultarono abbastanza concordanti. Eravamo riusciti a tracciare gli inviluppi per tutta la durata del suono, con sicurezza fino alla settima armonica; per

⁷ I convertitori analogico-digitali erano costosi specie se si dovevano soddisfare i requisiti per l'audio di qualità e difficilmente si arrivava a 32 KHz di frequenza di campionamento e risoluzioni di 14-16 bit. Le difficoltà verranno superate dalla tecnologia solo alla fine degli anni Ottanta con le tecniche di sovra-campionamento, e con dispositivi basati sulla conversione sigma-delta, inizialmente usate nei lettori CD audio e poi disponibili come chip in commercio negli anni Novanta, quando fu introdotto lo standard di 44.1 KHz e 16 bit di risoluzione, valido tutt'oggi.

quelle superiori, con qualche incertezza si riuscì a stimarne la presenza fino alla quindicesima, discriminando un livello di ampiezza dal rumore solo nella fase di attacco, nei primi 10-15 ms.

Furono quindi introdotte una successione di istruzioni suono e timbro per la nota DO_3 (F_{109}) contenenti i parametri con i livelli di ampiezza scelti in modo tale da approssimare al meglio i dati spettrali. Si codificava la fondamentale e le prime sei armoniche regolarmente su di un canale, specificando invece le altre 8 armoniche sugli altri due canali, con degli artifici: ad ogni armonica nf (F_{109}) con n compreso tra 8 e 15, che si voleva aggiungere al suono, si associava una voce, con frequenza di valore più vicino possibile a quello desiderato e ampiezze tutte a zero eccetto A_1 ($A_1 = \underline{A_1}$, $A_2 \dots A_7 = 0$, si veda la Fig. 6-a relativa ad un intervallo della fase di attacco). Ponendo il tempo base del metronomo T a 5 ms, per simulare meglio la fase di attacco, il risultato sonoro era soddisfacente, tale da somigliare effettivamente ad un pizzicato di corda.

A tale proposito per simulare bene segnali con tratti di spiccata aperiodicità (specie nei primi istanti della fase di attacco), sarebbero stati utili dei generatori di rumore + filtri. Tale opzione avrebbe richiesto l'aggiunta di altri circuiti (poi non realizzati), per il cui controllo si dovevano prevedere apposite istruzioni, per es. usando i bit R nel primo byte dell'Istruzione Timbro, come estensione di codice.

Sulla base di queste esperienze fu poi costruito assieme a ricercatori della Sezione Musicologica (Milani, 1976) un insieme di andamenti dinamici delle ampiezze delle formanti (archivio di un centinaio di timbriche), da richiamare in base alle necessità foniche desiderate per un certo brano, oppure da prelevare in modo casuale, verificando successivamente il risultato sonoro.

Giudizio sulle prestazioni foniche condotto da esterni

Dai risultati di uno studio condotto nell'ambito di una Tesi di Laurea in Fisica (Nencini, 1976) per una comparazione tra i vari sistemi di *computer music* operanti in quel momento in Europa, risultava che il sistema TAU2-TAUMUS era tra i più quotati e adatto alla produzione di *computer music* anche nell'ambito di un ente radio-televisivo (Nencini era dipendente della RAI).

Il giudizio teneva conto di diversi criteri di cui i principali erano: semplicità del linguaggio; non necessità di intermediazione tecnica; capacità di sintesi di strutture complesse e di elaborazione in tempo reale; capacità di analisi e trattamento di segnali esterni; archiviazione di modelli e testi; tempo di lavorazione, ecc. L'unica mancanza rilevata rispetto ad altri sistemi era la non disponibilità nel TAU2 di un supporto per l'analisi di segnali; d'altra parte ciò non era negli obiettivi del progetto, dal momento che esistevano già sistemi dedicati, sia in commercio che all'IEI, per fornire in modo ottimale tale funzionalità.

Anche dal punto di vista della qualità audio sono stati espressi giudizi positivi, come ad es. nella recensione del doppio LP *Computer Music - CNUCE/IEI del CNR* apparsa sulla prestigiosa rivista «Computer Music Journal» (*Review* di Thomas Blum, vol. 3, 1979, n. 4, pp. 58-59).

Una volta messo a punto il sistema si è iniziata a svolgere un'intensa attività di produzione musicale con composizioni originali, rielaborazioni di brani classici, condotta principalmente da Grossi ma alla quale era consentita la più ampia partecipazione di giovani autori e sperimentatori di *computer music*, come risulta da alcune incisioni su LP effettuate. Non è questa la sede per entrare nel merito dei generi e delle scelte di tipo musicale operate. Comunque, riportando i pareri della critica, sono state espresse a volte perplessità su alcune trascrizioni-elaborazioni di musica tradizionale, ma è stata anche sottolineata una varietà di aspetti interessanti nelle composizioni originali. Ad es. la trascrizione-adattamento di Grossi dell'opera *Arte della fuga* di J.S. Bach è stato considerato un insolito e indovinato connubio, nel quale la precisione dell'esecuzione col computer ben si adatta alla particolare difficoltà strutturale della composizione.

Il primo colloquio di informatica musicale a Pisa

Dopo circa un anno di attività di sperimentazione delle modalità di lavoro interattivo, di composizione, di effettuazione dei primi collegamenti remoti in sedi italiane, il sistema TAU2-TAUMUS si pose sia come un punto di riferimento per i vari ricercatori ed operatori dell'informatica musicale, sia come incentivo per uno scambio di idee sullo stato delle ricerche e sulla situazione in Italia. Nei giorni 23 e 24 febbraio 1976 si tenne così un convegno a Pisa organizzato dalla Divisione Musicologica del CNUCE-CNR svoltosi, dove furono appunto presentate le relazioni sulle attività dei gruppi che nel frattempo si erano formati (Pisa, Padova, Venezia, Pavia, Napoli, Milano, Pesaro, Bologna) e una delegazione della RAI (Gruppo D.O.C.), questi ultimi per avere delle indicazioni per un eventuale aggiornamento dello Studio di Fonologia RAI di Milano. Furono fatte delle dimostrazioni in tempo reale col TAU2 e fu gettata l'idea per un coordinamento delle attività tra le varie iniziative, poi sfociata nella costituzione dell'AIMI, Associazione Informatica Musicale Italiana. Una mio particolare interesse riguardò le relazioni del Prof. G.B. Debiassi, coordinatore del gruppo di Padova inizialmente attivo sulla sintesi della voce, e di P. Di Giugno che illustrò le sue proposte circa il progetto di terminali di sintesi basati completamente su tecniche digitali (allora non ancora a microprocessori) e controllabili da calcolatori della classe 'medie-dimensioni'.

Anche se svolto solo con relazioni orali, quell'incontro di Pisa è stato poi considerato come il primo Colloquio di Informatica Musicale in Italia e fu seguito da una serie di altri Colloqui, con cadenza di un anno e mezzo circa uno dall'altro, caratterizzati da una crescente partecipazione di addetti, di temi e allargata a livello internazionale.

Attività compositiva e didattica/dimostrativa del TAU2-TAUMUS

Fra i molti aspetti di interesse musicologico quali analisi, elaborazione di testi, sintesi di suoni, simulazione di processi compositivi, particolare importanza fu attribuita da Grossi all'aspetto divulgativo, dal momento che per promuovere l'interesse attorno

all'argomento era necessaria specie, in quel momento, una paziente attività di sensibilizzazione a tutti i livelli nei vari ambienti attinenti al settore musicale.

Raggiunto l'obiettivo dell'esecuzione in tempo reale con buone qualità foniche mediante l'impiego del TAU2-TAUMUS, fu possibile svolgere l'attività didattica e dimostrativa in modo efficace, superando i notevoli inconvenienti dei primissimi esperimenti effettuati con il DCMF.

Dal 1976 in poi furono organizzati corsi quindicinali denominati "Applicazioni Musicali" inclusi regolarmente nel calendario didattico del CNUCE: ai corsi venivano ammessi studenti di varie discipline musicali, principalmente composizione e musica elettronica (interessati alle metodologie operative in uso al centro pisano) e anche studenti provenienti da discipline scientifiche interessati maggiormente ai metodi di sintesi, alle soluzioni circuitali e altri aspetti di informatica connessi.

Gli argomenti trattati erano i seguenti:

- introduzione sulle possibili applicazioni e linee di tendenza della *computer music*;
- esperienze e indirizzi di lavoro dei vari centri di ricerca attivi a quel momento;
- descrizione del sistema TAU2-TAUMUS e modalità di uso;
- esemplificazioni di elaborazione e creazione di strutture sonore;
- brevi sedute con composizioni estemporanee degli studenti.

I più capaci e interessati all'attività compositiva erano assistiti nello sviluppo di lavori originali, presentati anche a vari concorsi e manifestazioni nazionali e internazionali e inseriti in alcuni dischi LP curati musicalmente dal Maestro Grossi e in qualche misura, nella parte tecnica, dal sottoscritto.

I corsi venivano svolti presso l'IEI nel locale dove era situato il TAU2, che poteva ospitare al massimo una decina di persone: nel caso di necessità (come in occasione dei concerti della Gioventù Musicale Italiana) veniva usata un'aula universitaria posta a poche decine di metri dall'IEI, prolungando semplicemente i collegamenti sia del terminale consolle-video che delle uscite audio del TAU2.

Per motivi organizzativi interni del CNUCE nel 1978 l'attività didattica a Pisa fu ufficialmente sospesa e da allora si ricorse con maggiore frequenza alle dimostrazioni remote. Nel 1981 fu finalmente istituito un corso annuale sperimentale di Informatica Musicale al Conservatorio 'L. Cherubini', che trattava in modo esteso tutte le problematiche inerenti questa nuova disciplina.

L'impostazione e il contenuto delle *dimostrazioni remote* a scopo didattico in scuole di musica, accademie, teatri, ecc. fu simile a quelli già ricordati dei corsi, sebbene più concisi, a causa ovviamente dei costi dei collegamenti. Per svolgere tale attività venivano utilizzati due tipi di connessione: uno con linea dati, con consolle-video per il colloquio col sistema *time-sharing* che controllava in linea il TAU2, l'altro in fonia per trasmettere il segnale audio su cui venivano sommati i tre canali del TAU2. Per la fonia nella maggior parte dei casi si usava una solo canale telefonico (a causa del costo di affitto delle linee), per cui la banda in remoto era molto ridotta, nonostante si cercasse di equalizzare al meglio il canale telefonico sia in partenza che in arrivo.

In occasioni importanti dove era richiesta la piena fedeltà per trasmettere i segnali di uscita del TAU2 si faceva intervenire la RAI, tramite servizi di trasmissione in FM o

con ponti radio in UHF: in tal caso il percorso dei segnali e le apparecchiature di ausilio erano disposte di solito come in Fig. 7. L'obiettivo di questa attività fu efficacemente perseguito e raggiunto, come dimostrano i resoconti del lavoro svolto, sia come mole e come tipologia delle sedi destinatarie (Nencini, 1985); da un riepilogo risulta che in cinque manifestazioni fu utilizzata la trasmissione RAI, in una quindicina i collegamenti telefonici dati-fonia e in altra trentina di occasioni le registrazioni su nastro magnetico.

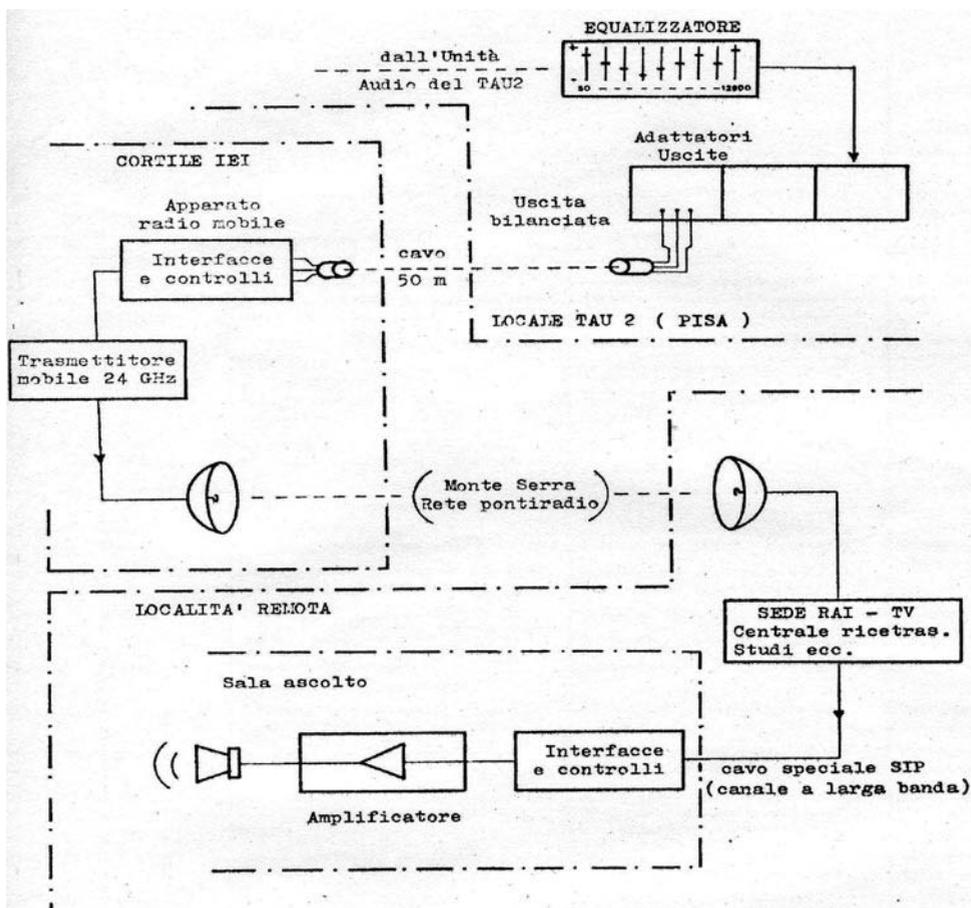


Figura 7 – Componenti e connessioni per l'impiego del collegamento audio via radio con supporto della RAI.

Possiamo qui citare alcuni di questi eventi:

- programma RAI 1° Canale TV *Anche questa è musica*, con un articolo sul TAU2 di Luigi Fait, sul «Radiocorriere TV», n. 1, pp. 82-86, gennaio 1976;
- dimostrazione-concerto all'Accademia S. Cecilia, Roma, rete dati e audio tramite la RAI, 1977;
- due giornate di Audizione permanente, rete dati e audio tramite la RAI al 41° Maggio Musicale Fiorentino, 1978;

- lavori presentati con nastri al festival di Como e al Premio Italia dal Gruppo DOC della RAI, impegnati a utilizzare i mezzi elettronici per la produzione di musica nel 1977 e 1979.
- *Computer valzer*, nastri, Stagione Lirica, Comunale di Firenze, pp. 437-441 del libretto, 1980;
- Esercitazioni al sistema TAU2-TAUMUS rete dati+fonia per il Corso Sperimentale di Informatica Musicale del Conservatorio L. Cherubini di Firenze (dal '78 all'83);
- Collegamento con rete dati e fonia in occasione della mostra "Il tempo dell'uomo nella società della tecnica", Biennale di Venezia 1980, oltre alle demo per il calendario della manifestazione la fonia in banda telefonica fu utilizzata nel periodo 8 novembre-20 dicembre 1980, per un lavoro di composizione a distanza del Maestro Teresa Rampazzi, registrato poi in banda piena presso il TAU2, in un secondo tempo.

Un elenco completo e il dettaglio delle procedure per l'effettuazione dei collegamenti remoti è contenuto in Bertini (1982).

Progetti di spostamento del TAU2 a Firenze

Furono fatti anche degli studi di fattibilità per l'istallazione del TAU2 direttamente al Conservatorio, per poter disporre della sintesi dei suoni localmente a Firenze e di sfruttare le risorse del TAUMUS in remoto (Bertini, 1981).

Un primo studio, fatto nell'ambito di una tesi di laurea in Informatica (Bertini Giuliano, 1976), aveva considerato la realizzazione di una semplice interfaccia costituita da uno dei primi ed economici microprocessori (SC/MP a 4bit della National Semiconductors). In pratica si sarebbe sostituito il canale diretto di collegamento parallelo a 16 fili esistente col CNUCE, con una linea sincrona ad alta velocità (per l'epoca) a 4800 bit/sec. tra Firenze e Pisa. Per varie perplessità quali il costo di affitto della linea, il possibile degrado delle prestazioni del TAU2 per problemi di accesso al sistema *time-sharing* IBM ecc. non fu dato corso alla realizzazione.

Un secondo studio fu effettuato (1979-80) da me e con esperti della Sezione Musicologia del CNUCE, prevedeva una interfaccia con un microprocessore Z80 verso un calcolatore della classe 'medie dimensioni', di cui avrebbe dovuto dotarsi il Conservatorio (un SEL 27/32 della Gould Computer). Con questa soluzione le risorse locali di calcolo del SEL avrebbero assicurato una sufficiente autonomia al TAU2, potendo disporre di un archivio locale. Anche in questo caso però non si procedette a causa di ritardi nell'acquisizione del SEL e poi per altri motivi.

Ipotesi per un servizio di telematica musicale

Agli inizi degli anni Ottanta, a nostro modo di vedere, era possibile intraprendere due direzioni di sviluppo per le applicazioni musicali con i computer:

- a) impiego di sistemi molto potenti, del tipo di quelli progettati da P. Di Giugno all'IRCAM (Institute de Recherche et Coordination Acoustique/Musique) a Parigi, provvisti di sintetizzatori basati su tecniche numeriche di Signal Processing, in grado di soddisfare esigenze di ricerca e impegnative opere musicali. Un altro esempio sono i grossi sistemi messi poi in funzione negli studi Lucas Film per la creazione di colonne sonore per la produzione cinematografica.
- b) sviluppo di applicazioni su sistemi personali-home computer, che, pur con limitate capacità foniche, avrebbero permesso di lavorare a molti utenti, con propria autonomia e comodità.

Sembrava quindi che in prospettiva l'attività del lavoro in remoto svolto col TAU2-TAUMUS con l'apporto di un servizio centrale di calcolo, fosse destinata a ridursi e a concludersi. Invece, sollecitati dall'interesse dimostrato per le nostre modalità di lavoro, anche da parte di ditte private, sentimmo l'esigenza di sperimentare ulteriormente la possibilità offerte dalla telematica, specie nel disporre di un archivio musicale opportunamente organizzato e sfruttabile in multiutenza e con possibilità di sintesi locale e remota. A ciò contribuivano anche realtà di fatto quali: la messa in funzione della rete BITNET-EARN-NORTHNET, che già collegava centinaia di centri nel mondo; la presenza della rete di trasmissione dati ITAPAC della SIP; la disponibilità sul mercato di personal computer con prestazioni orientate anche alla trattazione di segnali audio e in particolare alla sintesi di segnali musicali; le tante funzionalità del TAUMUS, inizialmente concepito per operare assieme al TAU2, talmente accresciute da renderlo adattabile alla multiutenza e al controllo di stazioni di lavoro musicali remote, opportunamente predisposte (Nencini, 1986).

Una prima serie di esperienze furono circoscritte alla zona di Firenze, tra Conservatorio-IROE/CNR-CNUCE, con i mezzi disponibili nei tre centri. Un altro esperimento ufficiale del servizio fu effettuato nel giugno 1985 durante la manifestazione "La luce a Venezia" dove la stazione remota era costituita da un Commodore 64 (con modem), usato come terminale dati remoto del sistema *time-sharing* di Pisa, e come esecutore sonoro, avendolo dotato di un ambiente che simulava in qualche modo la filosofia del TAU2 e sfruttando la sintesi hw di cui era dotato (Tarabella, 1985; Bertini, 1986). Il sistema dopo essere stato usato per altre prove di collegamento, rimase a livello di prototipo per diverse cause (inaffidabilità delle trasmissioni con linea commutata e cambi di direzione di lavoro).

Sviluppi dell'attività nell'Informatica Musicale a Pisa e Firenze

Dopo una decina di anni dalla costruzione, nel TAU2 cominciarono a verificarsi con maggiore frequenza vari guasti, dovuti ad obsolescenza e difetti dei materiali impiegati, che ne pregiudicavano il funzionamento. Per prime cominciarono a presentare un funzionamento difettoso le grosse schede per la selezione delle frequenze, realizzate a *wire-wrap*. Per problemi dovuti a stress meccanici (accorciamenti) la guaina isolante dei fili si tranciava sugli spigoli ad angolo vivo dei pin che venivano sfiorati nel loro percorso, provocando spesso guasti e difetti di funzionamento.

Un altro tipo di guasto si verificava poi anche sulle schede a circuito stampato. I connettori di alcune schede specie quelle sottoposte a ripetute estrazioni e inserimenti nella fase di collaudo e/o ricerca guasti, cominciarono a provocare falsi contatti: nonostante il ripristino della 'doratura' sui contatti maschio e la sostituzione di alcuni connettori femmina (operazione non semplice a causa dei molti fili da rimuovere e saldare), si ripetevano spesso guasti di difficile individuazione.

Il funzionamento del sistema fu assicurato più o meno con continuità fino a tutto il 1986. Agli inizi del 1987, tenendo conto che nel frattempo cominciarono a diffondersi sia i personal e home computer (PC IBM, Apple, Atari ecc.) che i microprocessori per Digital Signal Processing (sui quali anche noi stavamo impegnandoci), fu giudicato non produttivo assicurare la manutenzione al TAU2 e fu deciso di farne cessare l'attività, considerando veramente soddisfacente il lungo periodo di attività svolto.

Il Maestro Grossi diminuì il suo quasi quotidiano andirivieni tra Pisa e Firenze, continuando le esperienze solo sulla telematica musicale (Camilleri, 1988) e poi spostando la sua attenzione su altre possibilità di lavoro offerte dai personal computer. Fedele sempre ai suoi principi ispiratori sviluppò delle procedure sw per automatizzare processi compositivi e di produzione di grafica, utilizzando algoritmi mutuati dalla matematica e dalla fisica e lanciando nuovi paradigmi come la HOME ART. Un po' di tempo dopo lasciò che l'attività sulla *computer music* fosse proseguita dai suoi collaboratori in parte a Pisa, e in parte a Firenze, nell'ambito di una convenzione tra Conservatorio e CNUCE.

L'attività di ricerca del CNUCE si è quindi sviluppata seguendo essenzialmente due filoni:

- il primo in collaborazione con il Conservatorio di Firenze, dove era stato già in precedenza avviato, ha riguardato vari aspetti di musicologia computazionale e alcune problematiche circa l'interpretazione cognitiva di alcune caratteristiche musicali (Camilleri, 1991; Leman, 1995).
- il secondo ha riguardato i linguaggi di composizione algoritmica e lo sviluppo di sistemi dedicati per l'esecuzione di performance interattive con controllo gestuale, basati su l'uso di telecamere o dispositivi a infrarossi. Il livello di originalità raggiunto in questo campo ha consentito di tenere un Workshop a Pisa nel 1991, con atti riportati sulla rivista «Interface – Journal of new music research» (Tarabella, 1991);

Nei laboratorio dell'IEI oltre a collaborare per la parte hw alle realizzazioni dei sistemi proposti dal CNUCE (Tarabella 1989; Bertini, 1991), alcuni anni fa è ripreso lo studio sulla implementazione della sintesi additiva ricorrendo a circuiti VLSI per la generazione di un elevato numero di sinusoidi (Barutti, 1993; De Bernardinis, 1998). Inoltre sono stati sviluppati sistemi basati su processori DSP sia per l'elaborazione di segnali musicali che in generale per la banda audio (Bertini 1995; 1996) attivando anche collaborazioni con ditte private che si sono introdotte nel mercato dei processori audio.

Conclusioni

Le caratteristiche operative del sistema TAU2-TAUMUS si sono dimostrate particolarmente idonee per il loro impiego in diversi aspetti dell'informatica musicale, quali la composizione basata su algoritmi di generazione automatica e/o guidata, la gestione ed esecuzione di brani da archivi di musica, la didattica, la musicologia, le dimostrazioni remote, tutte applicazioni facilitate dal poter lavorare in tempo reale in connessione con sistemi potenti dell'IBM. Per la verità, come per tutte le vicende umane, vi sono state luci, ma non sono mancate le ombre, come ad es. lo scarso sfruttamento del sistema su alcuni aspetti di ricerca psicofisica e di studio sulle timbriche, in parte dovuto alla prematura scomparsa di un ricercatore del CNUCE, che era l'elemento catalizzatore di altre forze su quegli argomenti.

Comunque l'esperienza della progettazione del TAU2 e la collaborazione con il Maestro Grossi ha senz'altro contribuito positivamente ad indirizzare e a far proseguire l'attività di ricerca, nei gruppi di lavoro del CNR a Pisa e del Conservatorio a Firenze, relativamente ad alcuni aspetti peculiari dell'Informatica Musicale e con risultati riconosciuti anche a livello internazionale.

In particolare all'IEI, ultimamente riunitosi al CNUCE in un unico istituto, (denominato ISTI-CNR) si è continuato proficuamente il lavoro di studio su alcuni temi specifici di ricerca nell'informatica musicale, seguendo lo sviluppo delle tecnologie applicate ai segnali musicali ed aprendosi anche a problemi di elettroacustica. D'altra parte si può osservare che le tecniche per il trattamento di segnali musicali erano, e tanto più lo sono ora, di base ad applicazioni in molti altri settori, per alcuni dei quali effettivamente è stato fatto riferimento ai nostri istituti, sia da enti di ricerca pubblici che privati. Inoltre le molte tesi di laurea proposte e seguite dal nostro gruppo, riguardanti sistemi hw e sw basati su processori per DSP in applicazioni musicali, hanno contribuito alla formazione di molti laureati impegnati positivamente nel mondo della didattica, della ricerca e nell'industria elettronica su temi coincidenti o affini a quelli da noi trattati.

APPENDICE

Negli anni Settanta, quando era in fase di progettazione il TAU2, la sintesi dei segnali in banda audio veniva realizzata principalmente con apparecchiature elettroniche analogiche: il circuito di base era l'*oscillatore*, usato come elemento modulare per generare vari tipi di forme d'onda (quadre, sinusoidali, triangolari ecc.) che poi sommate tra loro, filtrate e manipolate con varie modalità, permettevano di ottenere una certa varietà di timbri. Successivamente si sono aggiunte tecniche di sintesi di tipo numerico, che presentano il vantaggio di una maggiore flessibilità e la possibilità di aderire meglio a modelli fisico-matematici ed anche percettivi. Rimandando alla letteratura per approfondimenti sulle varie tecniche di sintesi (De Poli, 1983), di se-

guito accenniamo ad alcuni concetti di base sui segnali musicali, utili a comprendere la tecnica di sintesi additiva utilizzata nel TAU2.

È ben noto che un segnale periodico può essere considerato come la somma di un numero infinito di sinusoidi con ampiezza, frequenza e fase opportune. Questo fatto è alla base delle tecniche di analisi e di sintesi dei suoni basate sulla trasformata di Fourier. Nel caso di segnali reali, l'ampiezza delle sinusoidi tende a zero al crescere della frequenza; da un punto di vista pratico, si può pertanto assumere che un segnale periodico è scomponibile in un numero finito di sinusoidi, dette armoniche, ciascuna delle quali ha una frequenza multipla della frequenza fondamentale, che ha un valore pari all'inverso del periodo del segnale. Tali tecniche vengono utilizzate, se possibile, anche nel caso di segnali non perfettamente periodici, suddividendo il segnale in intervalli di tempo successivi ed applicando la trasformata di Fourier a ciascun intervallo. In questo modo al segnale vengono associate tante serie di Fourier quanti sono gli intervalli in cui è stato suddiviso il segnale.

Un primo modo di caratterizzare i segnali musicali è quello di fare riferimento, quindi, al loro grado di periodicità. In tale senso si possono definire due tipologie di segnali: i segnali *quasi periodici* o armonici ed i segnali *aperiodici* o inarmonici. Tra i primi rientrano i suoni generati dalla maggior parte degli strumenti orchestrali a corda, a fiato ecc.; tra i secondi quelli generati, ad esempio, da strumenti a percussione.

Un secondo modo è quello di fare riferimento alla evoluzione temporale dell'*inviluppo* di ampiezza del segnale (linea che unisce i livelli massimi dell'onda sonora durante il suo svolgimento). In modo schematico, in una singola nota generata da uno strumento musicale, di regola si possono distinguere almeno tre fasi successive: una fase di attacco, una fase di sostegno ed la fase di estinzione. La durata di ciascuna fase e l'andamento temporale del segnale in ciascuna fase sono caratteristiche distintive dei vari suoni. La fase di attacco è caratterizzata da un tratto iniziale con rapide variazioni, a cui corrisponde la presenza di molte componenti sinusoidali con frequenze anche fluttuanti e con ampiezze in rapida crescita, fino al raggiungimento della fase di sostegno, prima della quale quelle di ordine più elevato in genere si estinguono. Nella fase di sostegno la forma d'onda è quasi periodica, con lievi variazioni delle componenti. Nella fase di estinzione l'intensità del segnale diminuisce più o meno velocemente, fino all'annullamento. Nel caso di 'note sostenute', eseguite cioè per un tempo relativamente lungo, dal punto di vista energetico ha preponderanza la fase di sostegno; viceversa nel caso di note staccate e di breve durata hanno più importanza le fasi di attacco e rilascio.

Accettando un certo grado di approssimazione, giustificato anche dalle caratteristiche della percezione uditiva, si può assumere che ciascuna fase si possa suddividere in piccoli intervalli temporali di valore opportuno, entro i quali il segnale si possa considerare quasi-periodico. A ciascun intervallo è possibile applicare l'analisi armonica di Fourier e, risolvendo in qualche modo il problema dei punti di discontinuità sulle giunzioni, si può pensare di rappresentare un segnale $S(t)$ mediante una sequenza di serie di Fourier, ciascuna associata ad un intervallo, con un espressione 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 $kT < t \leq (k+1)T$

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;

φ_n = fase dell'ennesima componente armonica;

T = unità di misura degli intervalli temporali.

Supponendo per comodità che gli intervalli abbiano tutti la stessa durata T e k sia l'indice con cui sono numerati, la somma di tutti gli intervalli con indice k dà il tempo totale, da quando inizia il segnale fino alla sua estinzione.

Un suono con determinate caratteristiche può quindi essere ricavato giustappo-
nendo di seguito delle sezioni di durata opportuna, ciascuna ottenuta sommando dei
segnali sinusoidali specificati da parametri f , A_n e fase, definiti in ogni intervallo, tali
da conferire al suono le caratteristiche desiderate. Un filtraggio hardware e particolari
accorgimenti sui valori assegnati via sw ai parametri, devono essere adottati per ridurre
eventuali disturbi sui punti di giunzione delle sezioni.

Il TAU2 aveva come compito principale quello di eseguire in tempo reale *com-
puter music*, con un certo grado di polifonia, di poter variare i parametri timbrici
entro una vasta gamma di valori (più altri requisiti funzionali, come specificato in
precedenza) e non era necessario che i suoni prodotti fossero 'identici' a quelli di
strumenti tradizionali. In considerazione di ciò e tenendo conto di fattori di costo,
si è adottato il principio della sintesi armonica, come specificato nell'espressione (1),
introducendo le seguenti semplificazioni: M è stato limitato a 7 per ciascun canale
(può arrivare a 15 utilizzando però tutti canali); la fase φ dei segnali è omessa, stante
la verificata scarsa sensibilità dell'udito verso tale parametro, almeno nell'ambito del
nostro modello di sintesi; tutti i parametri controllabili (f , A_n , T) sono definiti con
un numero di livelli ed entro gamme di valori ragionevolmente contenuti, scelti te-
nendo conto di criteri di semplicità per la realizzazione. Per la generazione di segnali
con parti di spiccata aperiodicità, era stato ipotizzato l'uso di generatori di rumore,
per il cui controllo dovevano essere formulate apposite istruzioni. Tale opzione non
è stata poi implementata.

Ringraziamenti

Un sentito grazie a tutti i colleghi ed amici (sarebbe troppo lungo farne l'elenco)
con i quali ho lavorato proficuamente e che in vario modo hanno collaborato per la
buona riuscita dei numerosi progetti e alle attività a cui è stato fatto riferimento nel-
l'articolo.

*Bibliografia*⁸

- R. Andreoni, G. Bertini, P. Grossi (1982), *Ipotesi per un Servizio di Telematica Musicale*, V Colloquio di Informatica Musicale (Tirrenia, Pisa), «Quaderni di Musica/Realtà», n. 1, Ed. Unicopli, Milano, pp. 51-62.
- G. Baruzzi, P. Grossi, M. Milani (1975), *Compendio dell'attività svolta nel periodo 1969-1975*, Collana Studi Musicali CNUCE-CNR, Pisa, nota int. n. 98.
- M. Barutti, G. Bertini (1993), *Una tecnica di sintesi additiva basata sulla Trasformata Inversa di Fourier*, Atti X° CIM, Milano, pp. 127-133.
- G. Bertini, M. Chimenti (1974), *Descrizione strutturale e operativa del terminale audio 1 (TAU1)*, nota tecnica IEI-CNR C74-7, Pisa.
- G. Bertini (1975), *Progetto di un Terminale Audio per funzionamento in Time-sharing*, tesi di laurea in Scienze dell'Informazione, Univ. di Pisa, rel. F. Denoth, a.a. 1974-75.
- G. Bertini, M. Chimenti (1975), *L'unità audio del TAU2*, nota tecnica IEI-CNR Pisa C 75-11, 1975.
- G. Bertini, M. Chimenti, F. Denoth (1976), *TAU2-An Audio Terminal for Computer Music Experiments*, Int. Symp. on "Technology for Selective Dissemination of Information", Rep. di San Marino, Italia, IEEE Computer Society, New York, NY, pp. 143-149, 1976.
- Giuliano Bertini (1976), *Applicazione di un microprocessore al collegamento remoto TAU2-Sistema 370/168 IBM*, tesi di Scienze dell'Informazione, Univ. di Pisa, rel. P. Piram, a.a. 1976-77.
- G. Bertini, M. Chimenti, F. Denoth (1977), *TAU2-un terminale audio per esperimenti di computer music*, «Alta Frequenza», vol. XLVI, n. 12, pp. 600-609, dicembre 1977.
- G. Bertini, E. Bozzi, M. Chimenti, L. Dall'Antonia (1978), *L'unità digitale del TAU2 – collegamento 370/168*, nota tecnica IEI-CNR, Pisa, C 78-05, 1978.
- G. Bertini, T. Bolognesi, M. Chimenti, P. Grossi, L. Tarabella (1978), *Computer Music*, Libretto dell'Audizione permanente del sistema TAU2-TAUMUS al 41° Maggio Musicale Fiorentino, Ridotto del Teatro Comunale (Firenze, 29-30 giugno 1978), pp. 598-627.
- G. Bertini, P. Grossi (1980), *Computer Music-Studi, Ricerche e Realizzazioni degli Istituti Pisani del CNR, CNUCE ed IEI*, Libretto di partecipazione ed esposizione materiale sul TAU2-TAUMUS alla mostra "Il tempo dell'uomo nella società della tecnica", Percorso 5 – L'uso artistico delle macchine informatiche, Biennale di Venezia, 1980.
- G. Bertini, T. Bolognesi, P. Grossi (1980), *TAU2-TAUMUS-Il sistema di computer music in tempo reale realizzato a Pisa. Descrizione ed esperienze*, «Automazione e Strumentazione», vol. XXVIII, n. 2, pp. 134-143.
- G. Bertini, P. Grossi (1981), *Trasferimento del TAU2 al Conservatorio L. Cherubini di Firenze – Considerazioni sulla fattibilità e sui modi di pilotaggio*, nota int. IEI-CNR, B82-20.
- G. Bertini, P. Grossi (1982), *Utilizzazione del sistema TAU2-TAUMUS per attività didattica e dimostrativa*, nota int. IEI-CNR, C81-06.
- G. Bertini, L. Camilleri, P. Grossi (1982), *Attività della sezione musicologica del CNUCE*, V° Colloquio di Informatica Musicale (Tirrenia, Pisa), «Quaderni di Musica/Realtà», n. 1, Ed. Unicopli, Milano, pp. 33-50.

⁸ Parte dei lavori citati in bibliografia è disponibile nella biblioteca ISTI-CNR Pisa e presso il Conservatorio 'L. Cherubini' di Firenze.

- G. Bertini, L. Tarabella, P. Guerrini (1986), *Una stazione di lavoro con un Home-Computer per esperimenti di telematica musicale*, nota int. IEI-CNR, B4-78.
- G. Bertini, P. Carosi (1991), *Light Baton: A System for Conducting Computer Music Performance*, «Interface – Journal of New Music Research», Lisse, Netherlands, vol. 22, n. 3, pp. 243-247.
- G. Bertini, D. Fabbri, L. Tarabella (1993), *MuStC25 una stazione di lavoro musicale con schede LeonardC25*, Atti X° CIM (Colloquio di Informatica Musicale), Milano.
- G. Bertini, M. Marani (1995), *Methodology and Digital Systems for Electroacoustical Applications*, Proc. 2nd Int. Conf. on Acoustic and Musical Research, Ferrara, CIARM '95, pp. 189-194.
- G. Bertini, L. Leodori, M. Marani, V. Mazzacca (1996), *AUDIOLab: una stazione per audiometria sperimentale in ambiente Windows*, Atti del XXIV Congr. Naz. AIA Associazione Italiana Acustica, (Trento), pp. 46-464.
- T. Bolognesi, M. Milani, L. Tarabella (1977), *Tre esperienze di psico-acustica musicale*, nota interna CNUCE-CNR Pisa, n. 132, presentato anche al Symp. di Psicoacustica Musicale, IRCAM Parigi.
- T. Bolognesi (1977), *Caratteristiche dei programmi di composizione in uso al CNUCE di Pisa*, Studio Report, Sez. Musicologica del CNUCE, Atti del II Colloquio di Inf. Musicale, Milano.
- L. Camilleri, F. Giomi, P. Grossi, M. Ligabue, G. Nencini (1988), *TELETAU: Un package per l'informatica musicale*, Atti VII Colloquio di Informatica Musicale, Roma, Ed. Ass. Musica Verticale, pp. 147-149.
- L. Camilleri, F. Carreras, F. Giomi (1991), *An Expert System for Analytical Discoveries on the Harmonic structure of a Musical Piece*, Proc. of Computers in Music Research (A. Marsden ed.), Queen's Univ. of Belfast.
- M. Chimenti (1971), *Terminale audio per calcolatore*, Tesi di laurea in Fisica, Univ. di Pisa, rel. F. Denoth, G. Torelli, P. Grossi, a.a. 1970-71.
- F. De Bernardinis, R. Roncella, R. Saletti, P. Terreni, G. Bertini (1998), *A New VLSI Implementation of Additive Synthesis*, «Computer Music Journal», MIT, Boston, vol. 22, n. 3, pp. 49-56.
- F. Denoth (1991), *CEP (Calcolatrice Elettronica Pisana) dal CSCE all'IEI*, Convegno Internazionale su Storia e Preistoria del Calcolo Automatico e dell'Informatica, AICA, Siena, pp. 105-115.
- De Poli (1983), *A tutorial on digital sound synthesis techniques*, «Computer Music Journal», vol. 7, n. 4, pp. 20-29.
- P. Grossi (1969), *Sulla Computer Music*, «I Futuribili», III, n. 8, Bardi, Roma.
- P. Grossi (1971), *Musica in tempo reale*, «I Futuribili», V, n. 34, Bardi, Roma.
- P. Grossi, G. Sommi (1974), *DCMP, versione per il Sistema 360/67*, collana Studi musicali, n. int. CNUCE n. 53.
- P. Grossi (1976), *Modalità operative del TAUMUS software di gestione del terminale audio TAU2*, collana Studi Musicali, nota interna CNUCE-CNR, Pisa, n. 120.
- P. Grossi, G. Bertini (1983), *A Program for Tomographic Analysis of Musical Texts*, Proc. ICMC '82, Venezia, Italia, CMA Press, San Francisco, CA (USA), pp. 563-576.
- P. Grossi, G. Bertini (1983), *Computer Music as a permanent service. Towards musical telematics*, Proc. ICMC '82, Venezia, Italia, CMA Press, San Francisco, CA (USA), pp. 409-425.

- J.L. Flanagan (1965), *Speech Analysis, Synthesis and Perception*, Cap. 5, Springer Verlag, N.Y.
- M. Leman, F. Carreras (1995), *Simulation of cognitive learning by listening to Bach's Well Tempered Clavier*, XI CIM, Bologna.
- P. Maestrini (1972), *A Diode Matrix Read-Only Memory*, Proc. Symp. Automation & Regulation Systems, Ostrawa, pp. 2-7.
- M.V. Mathews (1969), *The Technology of Computer Music*, MIT Press, Boston.
- M. Milani, M. Busico (1976), *Forme d'onda e timbri – distinguibilità e criteri di scelta*, Nota Interna, CNUCE-CNR Pisa, n. 119.
- G. Nencini (1976), *Meccanizzazione di processi di generazione di musica elettronica*, tesi di laurea in Fisica, Univ. di Milano, rell. V. Guanziroli, G. Degli Antoni, M. Maiocchi, a.a. 1975-76.
- G. Nencini, P. Grossi, L. Tarabella, G. Bertini (1985), *Studi sulla Telematica Musicale*, Atti del VI CIM (Napoli, 1985), «Quaderni di Musica/Realtà», n. 14, Ed. Unicopli, Milano 1987, pp. 295-299.
- Nencini, P. Grossi, G. Bertini, L. Camilleri, L. Tarabella (1986), *Teletau: A Computer Music Permanent Service*, Int. Computer Music Conference, ICMC '86 (The Hague, Netherland), pp. 451-453.
- L. Tarabella, P. Grossi (1985), *Un'esperienza di Telematica Musicale*, nota int. CNUCE-CNR, C-85, n. 7.
- L. Tarabella, G. Bertini (1989), *A Digital Signal Processing System and a Graphic Editor for Synthesis Algorithm*, Int. Computer Music Conference, ICMC (Columbus, Ohio), pp. 312-315.
- L. Tarabella (1991), Guest editor of Special Issue of «Interface – Journal of New Music Research», Lisse, Netherlands, vol. 22, n. 3, 1993, on Int. Workshop *Man-Machine Interaction in Live Performance (Pisa 1991)*, and author of the paper *Real-Time Concurrent Pascal-Music*, pp. 229-241.
- J. Tenney (1969), *Computer Music Experiments, 1961-1964*, «Electronic Music Reports», vol. 1, n. 1, pp. 23-61.
- S. Tempelaars, G.M. Koenig (1972), *The computer at the Institute of Sonology, Utrecht*, «Interface», vol. 1, n. 2, pp. 167-174.
- P. Zinovieff (1969), *A Computerized Electronic Music Studio*, «Electronics Music Reports», vol. 1, n. 1, pp. 5-22.